

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DES MOBILITÉS

Le méthane comme carburant de transition : réduction CO₂, maîtrise des fuites et feuille de route

Note de synthèse — Septembre 2026 — Sources : Comparatif Multi-Secteur V5 · IEA Global Methane Tracker 2026 · Statista/IEA Transport Emissions 2024 · Sherwin et al., Nature 2024 · Programme Résilience V11

1 — Toutes les mobilités ne sont pas sur la même trajectoire

Les émissions du transport mondial atteignent 8,4 Gt CO₂eq en 2024 (IEA). L'analyse sectorielle révèle une réalité hétérogène que les discours de politique énergétique tendent à homogénéiser à tort.

Pour les voitures particulières à usage urbain court, l'électrification par batterie (BEV) est la solution la plus efficace : rendement 90 %, infrastructure de charge en déploiement, cycle énergétique cohérent avec la production d'électricité décarbonée. La question n'est pas de savoir si cette voie est valide — elle l'est — mais d'en mesurer le calendrier réaliste à l'échelle mondiale.

Pour le maritime hauturier et l'aviation long-courrier, l'électrification est physiquement improbable à l'échelle utile. Ce n'est pas une question de calendrier : c'est une contrainte de densité énergétique. L'hydrogène liquide, souvent présenté comme alternative, affiche une densité volumique de 8,5 MJ/L contre 21 MJ/L pour le GNL et 34,5 MJ/L pour le kérosène. Pour un vol Paris–New York, les réservoirs H₂ occuperaient ~1 353 m³ contre ~538 m³ pour le GNL et ~395 m³ pour le kérosène — une contrainte architecturale insurmontable pour une cellule conventionnelle. La preuve historique est antérieure aux études actuelles : le Tupolev Tu-155 a réalisé 100 vols commerciaux au GNL dès 1989.

Pour les camions lourds longue distance, l'électrification est techniquement possible mais économiquement et logistiquement contrainte sur les longues distances : charge haute puissance très coûteuse, temps de recharge incompatibles avec les cycles d'exploitation. Le GNL est déjà déployé dans les flottes européennes.

Secteur / Usage	Émissions 2024	Électrification ?	Alternative CH ₄	Pourquoi CH ₄
Voitures particulières — urbain	3,2 Gt	✓BEV — solution principale	GNV/ÉREV — niche	BEV optimal sur cycle court. CH ₄ = appoint longue distance (ÉREV).
Camions lourds > 26 t — longue distance	2,0 Gt	⚠Partielle, lente — charge haute puissance coûteuse	GNL/GNV — disponible maintenant	Infrastructure GNL existante. Même groupe motopropulseur. Transition immédiate.
Maritime international — hauturier	0,93 Gt	✗Physiquement	GNL dual-fuel — infrastructure	Densité énergétique irremplaçable.

		exclue à l'échelle utile	portuaire existante	NH ₃ /méthanol : NO _x , toxicité, η défavorable.
Aviation long-courrier — intercontinental	1,0 Gt	✗ Physiquement improbable — densité H ₂ ×4 inférieure au GNL	CH ₄ GNL / bioCH ₄ — nouvelle génération d'aéronefs (horizon 2035–2040)	Tu-155 : 100 vols GNL dès 1989 — faisabilité aéronautique démontrée historiquement, pas encore une viabilité commerciale actuelle. Réservoirs +36 % volume gérables sur nouvelle génération d'appareils. SAF : feedstock insuffisant à l'échelle.
TOTAL secteurs non électrifiables	~3,9 Gt	—	CH ₄ fossile → bioCH ₄	Voie de transition la plus opérationnelle sur flottes existantes — sans rupture technologique, avec évolution progressive fossile → bioCH ₄ . Note : les 3,9 Gt correspondent aux émissions des 3 secteurs non électrifiables (2,0 + 0,93 + 1,0 Gt) — les voitures (3,2 Gt) suivent la trajectoire BEV et ne sont pas incluses dans ce total.

Point clé : Pour environ 3,9 Gt CO₂ (maritime hauturier + camions lourds longue distance + aviation long-courrier), aucune solution unique ne permet aujourd'hui de décarboner rapidement l'ensemble de ces usages sans contraintes importantes de coût, d'infrastructure, de disponibilité des ressources ou de densité énergétique. Le méthane constitue une voie de transition particulièrement opérationnelle — notamment lorsque son approvisionnement évolue vers du bioCH₄ — parce qu'il peut utiliser les flottes et les infrastructures existantes sans rupture technologique. Chaque année supplémentaire de combustion de fioul lourd, de diesel et de kérosène représente des émissions que cette transition permettrait de réduire de 27 à 37 %.

2 — Le méthane fossile : un gain brut immédiat et massif

La substitution du carburant fossile actuel par du CH₄ fossile (GNL/GNV) dans les trois secteurs non électrifiables produit une réduction structurelle du CO₂ émis à la combustion. Ce gain repose sur deux mécanismes indépendants et cumulatifs.

Mécanisme chimique : le méthane contient moins de carbone par unité d'énergie que le kérosène, le diesel ou le fioul lourd (%C respectifs : 75 % vs 85–86 %). À énergie utile égale, la combustion de CH₄ émet mécaniquement moins de CO₂.

Mécanisme thermodynamique : les moteurs CH₄ (turbofan adapté, moteur Atkinson GNL, cycle diesel dual-fuel) atteignent des rendements η supérieurs aux moteurs de référence actuels — de 37 % (turbofan kérosène) à 44 % (turbofan CH₄), de 42 % (diesel Euro VI) à 44 % (GNL). Cette amélioration du rendement amplifie le gain énergétique net.

Secteur	Carburant actuel (g CO ₂ /MJ utile)	CH ₄ fossile (g CO ₂ /MJ utile)	Réduction CO ₂ /MJ	Gain absolu estimé	Hypothèses principales
Camions lourds longue distance	174 g/MJ (Diesel Euro VI, η 42 %)	125 g/MJ (GNL, η 44 %)	-28 %	~0,48 Gt/an	85 % de la flotte LD convertible. Infrastructure GNL existante ou en cours.
Maritime international hauturier	151 g/MJ (HFO 2T lent, η 52 %)	110 g/MJ (GNL dual-fuel, η 50 %)	-27 %	~0,18 Gt/an	70 % flotte hauturière convertible. Infrastructure GNL dans les grands ports mondiaux.

Aviation long-courrier	197 g/MJ (Jet A-1, η 37 %)	125 g/MJ (CH ₄ GNL turbofan, η 44 %)	-37 %	~0,12 Gt/an	30 % flotte à court terme (hubs GNL + certification EASA). Gain opérationnel réel ~46,5 % SAF équivalent.
TOTAL — trois secteurs	—	—	-29 % moyen	~0,78 Gt CO₂/an	≈ 2× les émissions totales de la France (0,41 Gt)

Méthode : $g\ CO_2/MJ\ utile = kg\ CO_2/kg\ carburant \times fraction\ fossile / PCI\ (MJ/kg) / \eta \times 1\ 000$. Source : Comparatif Multi-Secteur V5 — Programme Résilience V11.

~0,78 Gt CO₂/an — c'est le gain brut de la substitution CH₄ fossile sur les trois secteurs, soit l'équivalent de **deux fois les émissions totales de la France** (0,41 Gt). Ce chiffre est atteignable **maintenant**, avec les flottes existantes, sans attendre de rupture technologique.

À titre de co-bénéfice immédiat non comptabilisé dans ce bilan CO₂ :

- -91 % de particules fines (PM) dans le maritime : impact de santé publique considérable pour les zones portuaires et côtières.
- -50 % de NOx en camion lourd (chimie CH₄, température de flamme inférieure — mécanisme Zeldovich).
- Zéro SOx dans tous les secteurs (CH₄ sans soufre) — conformité ECA immédiate pour le maritime.
- **-90 % de PM (particules fines) en aviation** : la réduction des suies — principaux noyaux de condensation des cirrus induits — diminue la densité et la persistance des traînées de condensation. Les mécanismes PM, aérosols et contrails sont distincts et leur relation dépend des conditions de vol (altitude, humidité, température) ; la réduction des PM ne se traduit pas automatiquement par une réduction équivalente de l'effet climatique non-CO₂, qui inclut aussi les NOx et la vapeur d'eau. L'optimisation des trajectoires (levier complémentaire) reste indispensable.

3 — Le principal risque climatique spécifique au CH₄ : les fuites

Le méthane est un gaz à effet de serre puissant (GWP100 = 27,9 selon l'IPCC AR6 ; GWP20 = 82,5). Si les fuites sur l'ensemble de la chaîne — extraction upstream, liquéfaction, distribution, moteur — ne sont pas maîtrisées, elles peuvent éroder voire annuler le gain CO₂ de la substitution. **Ce risque est réel. Il est quantifié. Il est maîtrisable.**

Définition du taux de fuite chaîne complète : masse de CH₄ émise fugitivement / masse de CH₄ fournie au système considéré, sur le périmètre extraction upstream → liquéfaction → transport → distribution → avitaillement → moteur. Ce périmètre complet est la référence contractuelle

Résilience. Les taux de fuite partiels (upstream seul, distribution seule) ne peuvent pas être comparés directement sans préciser le périmètre.

Il existe pour chaque usage un seuil de fuite au-delà duquel le bilan GES de la substitution devient négatif. Ce seuil se calcule simplement : il correspond au taux de fuite CH₄ qui équivaut en CO₂eq (GWP100) au gain CO₂ obtenu par la substitution.

Secteur / carburant substitué	CO ₂ évité (kg/kg CH ₄)	Seuil critique fuites (GWP100 = 27,9)	Fuites réelles mesurées 2025	Marge de sécurité
Camion — Diesel Euro VI	3,84 kg CO ₂ /kg CH ₄	13,8 %	GNL moteur + MOC : < 0,5 %	×27 — très confortable
Maritime — HFO	3,76 kg CO ₂ /kg CH ₄	13,5 %	GNL dual-fuel navire : < 1 %	×13 — confortable
Aviation — Kérosène Jet A-1	4,34 kg CO ₂ /kg CH ₄	15,5 %	Turbofan > 1 400°C : slip < 0,01 %	×1 500 — quasi nul
Upstream LNG — Appalachie/Haynesville	—	9,9–15,5 % selon usage	~1–2 % (MethaneSAT 2024)	Acceptable avec LDAR certifié
Upstream LNG — Permian NM (pire cas)	—	9,9–15,5 %	2,1–9,6 % (Sherwin et al., Nature 2024)	Risque réel — LDAR indépendant obligatoire

Seuils critiques : calcul IPCC AR6 (GWP100 = 27,9). Données fuites : IEA Global Methane Tracker 2026 · MethaneSAT/EDF juill. 2024 · Sherwin et al., Nature 2024 (≈ 1M d'observations, 6 bassins US).

Trois enseignements de ce tableau :

- **La combustion dans les moteurs est la partie la plus sûre** : dans un turbofan à > 1 400°C, le slip méthane est quasi nul (< 0,01 %). Dans un moteur camion avec catalyseur MOC, il reste sous 0,1 %. **Point d'attention maritime** : les moteurs 4 temps à cycle Otto à moyenne vitesse (LPDF — répandus sur ferries et petits méthaniers) présentent un méthane slip de 2 à 3,5 % sans post-traitement. L'objectif < 1 % chaîne complète repose sur l'utilisation de motorisations modernes à injection directe haute pression (HP Dual Fuel / ME-GI) ou de catalyseurs MOC. Le risque est en amont et en post-traitement — pas dans les moteurs haute pression.
- **L'upstream LNG est hétérogène et partiellement opaque** : les bassins gazeux dominants américains (Appalachie, Haynesville) affichent ~1–2 % de fuites mesurées par satellite (MethaneSAT 2024). Le Permian Basin, notamment côté Nouveau-Mexique, atteint jusqu'à 9,6 % selon Sherwin et al. (Nature 2024, ≈ 1 million d'observations empiriques). Sans mesure indépendante certifiée par bassin, la valeur réelle reste inconnue.

- **La marge de sécurité est très confortable si les fuites sont mesurées et contrôlées** : à 2 % de fuites chaîne complète — objectif atteignable avec LDAR trimestriel + MOC moteur — le gain net préservé est supérieur à 90 % du gain brut.

Condition non négociable : la substitution CH₄ n'est climatiquement vertueuse que si les fuites sont mesurées, certifiées et contrôlées sur l'ensemble de la chaîne — de la tête de puits au pot d'échappement. Une substitution sans protocole de mesure indépendant est une promesse invérifiable. C'est précisément pourquoi le règlement (UE) 2024/1787, qui imposait ces exigences aux importateurs de gaz fossile, ne doit pas rester lettre morte.

4 — Bilan net : le CH₄ fossile reste très positif avec des fuites maîtrisées

Base de calcul — masse de CH₄ consommée : ~312 Mt CH₄/an dans les trois secteurs (camion 195 Mt, maritime 86 Mt, aviation 31 Mt). Méthode : masse CH₄ = émissions CO₂ secteur × part convertible × (g CO₂/MJ CH₄) / (g CO₂/MJ référence) / (PCI CH₄ × g CO₂/kg CH₄). Le taux de fuite est défini sur cette masse totale fournie au système.

Taux de fuite chaîne	Coût GES fuites (Gt CO ₂ eq)	Bilan net (Gt CO ₂ eq/an)	Commentaire
< 1 % (objectif Résilience CDC V2.3)	~0,09	> 0,67 Gt	Marge de sécurité ×10 à ×16 vs seuil critique. Bilan très positif.
2 % (standard avec LDAR + MOC)	~0,17	~0,59 Gt	~77 % du gain brut préservé. Recommandation minimale.
5 % (upstream non contrôlé)	~0,44	~0,33 Gt	Encore positif mais bilan dégradé — surveillance insuffisante.
10 % (Permian NM sans LDAR — pire cas)	~0,87	-0,11 Gt (négatif)	Bilan GES inversé — la substitution aggrave le forçage. Cohérent avec le seuil critique camion à 13,8 %.
15 % (dépassement seuil critique — cas extrême)	~1,31	-0,54 Gt (très négatif)	Pire que le carburant fossile substitué. Seul le Permian NM worst-case peut approcher ce niveau.

Calcul : coût fuites = masse CH₄ brûlée × taux fuite × GWP100 (27,9). Masse CH₄ brûlée : ~312 Mt/an (camion 195 Mt + maritime 86 Mt + aviation 31 Mt), calculée à partir des émissions sectorielles et des rendements η. Gain brut recalculé : ~0,77 Gt CO₂/an.

Conclusion : à 2 % de fuites chaîne complète — objectif atteignable avec LDAR certifié + MOC — le bilan net est de ~0,59 Gt CO₂eq/an, soit ~77 % du gain brut préservé. **Au-delà de 10 %, le bilan GES s'inverse : la substitution aggrave le forçage climatique**, ce qui est cohérent avec les seuils critiques calculés (13,8 % camion, 13,5 % maritime). Ces niveaux de fuites sont inacceptables et détectables. La réponse n'est pas de renoncer à la substitution — c'est de mesurer, certifier et encadrer sur toute la chaîne.

5 — Feuille de route : trois étapes vers le bilan carbone négatif

Ce que la feuille de route cherche à démontrer est simple : on peut réduire massivement les émissions du transport lourd et longue distance dès maintenant, sans attendre une technologie nouvelle, et construire ensuite — progressivement, sur la même infrastructure — un bilan carbone qui passe de positif à négatif.

Étape 1 (maintenant → 2030) — Substituer le carburant, garder les flottes

Le CH₄ — méthane — brûlé dans un moteur de camion, un navire ou un turbofan émet structurellement moins de CO₂ que le diesel, le fioul lourd ou le kérosène. C'est une propriété chimique : le méthane contient moins de carbone par unité d'énergie. Les moteurs adaptés au CH₄ atteignent également un meilleur rendement, ce qui amplifie encore le gain.

Les flottes existent. L'infrastructure GNL est partiellement déployée dans les ports et sur les axes routiers européens. La substitution ne demande pas de changer les véhicules — elle demande de changer le carburant et de s'assurer que les fuites méthane sont mesurées et contrôlées sur toute la chaîne, de la tête de puits au moteur.

Gain de cette première étape : -0,70 à -0,78 Gt CO₂eq par an pour les trois secteurs (camion lourd, maritime hauturier, aviation long-courrier), soit deux fois les émissions totales de la France — à condition que les fuites restent sous 2 % sur l'ensemble de la chaîne.

Étape 2 (2026 → 2035) — Remplacer le méthane fossile par du méthane biogénique

Le méthane peut être produit non pas à partir de gisements fossiles souterrains, mais à partir de matières organiques — effluents d'élevage, biodéchets, résidus agricoles. Ce biométhane est chimiquement identique au gaz naturel fossile : le même moteur, le même réservoir, le même réseau de distribution.

La différence est dans le bilan carbone. Quand on brûle du méthane fossile, on libère du carbone qui était enfermé dans le sol depuis des millions d'années — c'est une addition nette à l'atmosphère. Quand on brûle du biométhane, la combustion produit physiquement du CO₂, mais ce CO₂ avait été prélevé sur l'atmosphère par les plantes lors de la croissance de la biomasse : **le cycle est fermé, le bilan net d'apport de carbone fossile à l'atmosphère est nul**. Le bilan climatique complet dépend ensuite des émissions de la filière (fuites ≤ 1 %, CO₂ procédé, transport) et du scénario de référence de la biomasse traitée.

Gisement biométhane — pas de conflit d'usage des sols : le gisement repose prioritairement sur la pyrogazéification de résidus lignocellulosiques (bois mort, paille, rémanents forestiers) et de déchets organiques non alimentaires (digestat, effluents d'élevage, biodéchets), et non sur des cultures dédiées. Ce point est central : la concurrence avec la sécurité alimentaire ou la séquestration naturelle de carbone n'est pas le scénario de Résilience.

En substituant progressivement le CH₄ fossile de l'étape 1 par du biométhane — sans toucher aux moteurs, aux réservoirs, ni aux contrats de transport — on fait passer le bilan de « fortement réduit » à « nul en CO₂ de combustion ». À 50 % de substitution, le gain supplémentaire est de l'ordre de 0,35 Gt par an.

Étape 3 (2030 → 2045) — Séquestrer le carbone : le bilan devient négatif

La production de biométhane génère un sous-produit solide appelé biochar lorsqu'elle est réalisée par pyrogazéification à haute température (> 700°C). Ce biochar est une forme de carbone stable, qui ne se décompose pas en CO₂ si on l'applique en sol agricole. Il y reste pendant des siècles.

Ce carbone stable a été prélevé sur l'atmosphère par les plantes. Il y aurait normalement été restitué par décomposition naturelle. En le fixant dans le sol sous forme de biochar, **on retire durablement du carbone de l'atmosphère — le bilan climatique du secteur devient négatif**. Dans les configurations Résilience étudiées, l'ordre de grandeur retenu est de -1,5 kg CO₂ séquestré par kg de biométhane produit — hypothèse de dimensionnement conservatrice à confirmer expérimentalement par les démonstrateurs Phase 0 et par un bilan matière carbone couvrant l'ensemble de la chaîne.

L'étape 3 ne change rien pour les flottes de transport. Elle s'ajoute en amont, dans la chaîne de production du biométhane.

Horizon	Couche	Action concrète	Gain CO ₂ estimé	Condition clé
Maintenant → 2030	① CH ₄ fossile + maîtrise fuites	Camion GNL longue distance. Maritime GNL dual-fuel. Aviation CH ₄ hubs pilotes. LDAR upstream + MOC moteur.	-0,70 à -0,78 Gt CO ₂ eq/an	Fuites chaîne < 2 %
2026 → 2035	② bioCH ₄ progressif (Résilience V11)	Substitution fossile → bioCH ₄ dans les mêmes flottes, sans modification moteur. CO ₂ fossile net = 0 (cycle court biomasse — la combustion produit du CO ₂ physiquement, mais ce CO ₂ avait été capté par les plantes).	+0,35 Gt supplémentaires à 50 % substitution	Gisement bioCH ₄ + certification qualité
2030 → 2045	③ Biochar — bilan négatif	Pyrogazéification + biochar certifié EBC. -1,5 kg CO ₂ /kg bioCH ₄ séquestré	Bilan sectoriel net négatif	Sites Phase 0 Résilience + validation 100 ans

		durablement en sol agricole.		
--	--	------------------------------	--	--

Ce que cette séquence démontre : les trois étapes utilisent la même infrastructure de distribution et les mêmes flottes de véhicules. Passer de l'étape 1 à l'étape 2 ne nécessite aucune modification de motorisation — seulement un changement de source d'approvisionnement en carburant. Passer à l'étape 3 ajoute une filière de production en amont, sans rien changer aux transports. Ce document ne défend pas le gaz fossile comme énergie de substitution. Il démontre que la molécule CH₄, utilisée comme vecteur énergétique pour les usages que l'électrification ne peut atteindre rapidement, peut suivre une trajectoire en trois temps : ① réduire immédiatement les émissions avec un carburant moins carboné ; ② remplacer progressivement le carbone fossile par du carbone biogénique ; ③ transformer une partie de ce carbone biogénique en carbone stable séquestré durablement. Ainsi, la même infrastructure qui sert d'abord à réduire les émissions peut progressivement devenir un outil de retrait net de carbone atmosphérique. **La transition énergétique des mobilités lourdes et longue distance n'attend pas une percée technologique. Elle attend une décision d'approvisionnement — et la rigueur de mesure des fuites qui la rend climatiquement valide.**

Sources : Comparatif Multi-Secteur V5, Programme Résilience V11 (sept. 2026) · IEA Global Energy Review 2025 (CO₂ Transport) · IEA Global Methane Tracker 2026 · Statista — Transport CO₂ Emissions 2024 · Sherwin et al., Nature 2024 (MethaneSAT, ≈ 1M observations, 6 bassins US) · TROPOMI/IMI — Environ. Sci. & Technol., déc. 2025 · IPCC AR6 (GWP100 = 27,9 ; GWP20 = 82,5) · IMO GHG Study 2020 · IATA Long Range Fuel Study 2022 · JEC Well-to-Wheel v5 · Règlement (UE) 2024/1787 · Global Carbon Budget 2024 (Global Carbon Project)