

LE MÉTHANE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Allocation par usage, réduction CO₂ et feuille de route vers le bilan négatif

Note de synthèse — Septembre 2026 — Sources : IEA Global Energy Review 2025 · IEA GHG Data Explorer 2024 · IEA Global Methane Tracker 2026 · Comparatif Multi-Secteur V5 · Programme Résilience V11 · Sherwin et al., Nature 2024 · Columbia Climate School — Decarbonizing High-Temperature Industrial Heat

1 — Le principe fondateur : une ressource rare allouée strictement

Les émissions mondiales d'énergie atteignent 37,8 Gt CO₂ en 2024. Une grande partie est en cours de décarbonation par l'électrification — production d'électricité par les énergies renouvelables et le nucléaire, chauffage des bâtiments par les pompes à chaleur (COP 3–4), transport urbain court par les véhicules électriques à batterie. Ces trajectoires sont réelles et doivent se poursuivre à leur rythme optimal.

Le biométhane n'est pas une alternative à l'électrification — il en est le complément indispensable pour les usages où elle échoue. Sa production sera contrainte par le gisement de biomasse disponible. En France, le Programme Résilience V11 cible ~262 TWh/an de bioCH₄ — un volume significatif mais fini. À l'échelle mondiale, la biomasse résiduelle mobilisable est abondante mais non illimitée. Cette rareté relative impose une règle d'allocation stricte : le bioCH₄ va là où l'électricité ne peut pas aller efficacement, et nulle part ailleurs.

La règle de tri est simple et sans exception :

- **Là où la pompe à chaleur électrique fonctionne bien — bâtiments, industrie basse température** — elle est thermodynamiquement supérieure à tout brûleur gaz (COP 3–4 vs rendement 0,9 maximum). Utiliser du bioCH₄ pour chauffer un bâtiment équipable en PAC est un gaspillage de ressource rare.
- **Là où l'électrification est physiquement impossible ou économiquement inaccessible dans les délais utiles** — chaleur industrielle haute température (> 800°C), transport longue distance maritime et aérien, camion lourd — le bioCH₄ est le seul vecteur mature disponible sans rupture technologique.
- **L'hydrogène ne se substitue pas au bioCH₄ dans ce périmètre.** Le bilan puits-à-roues du bioCH₄ est meilleur que celui de l'H₂ pour les usages énergétiques : réseau de distribution existant, pas de problème de densité volumique, pas de liquéfaction à -253°C, pas de dépendance à des métaux critiques pour l'électrolyse, pas d'infrastructure nouvelle à construire de zéro. L'H₂ reste pertinent comme réactif chimique irremplaçable (ammoniac, raffinage) — pas comme vecteur énergétique en concurrence avec le bioCH₄.

Secteur / Application	Émissions 2024	% mondial	Vecteur optimal	Pourquoi — position Résilience
Production d'électricité — ENR + nucléaire	~16,6 Gt	44 %	Électricité décarbonée (ENR, nucléaire)	Décarbonation en cours et accélérée. Le CH ₄ peut rester vecteur de flexibilité/secours pour les pics, progressivement remplacé par bioCH ₄

				dans les centrales de pointe.
Bâtiments — chauffage, eau chaude	~9,8 Gt	26 %	Pompes à chaleur électriques	COP 3–4 : thermodynamiquement supérieur à tout brûleur gaz, y compris bioCH ₄ . Le bioCH ₄ est une ressource rare — l'affecter au chauffage résidentiel là où la PAC est disponible est une mauvaise allocation. Transition progressive du réseau gaz existant.
Industrie — chaleur basse/moyenne T° (< 500°C)	~3 Gt	8 %	PAC industrielles, résistances électriques	Électrifiable progressivement. CH ₄ /bioCH ₄ en transition là où l'infrastructure électrique est insuffisante ou le process non adaptable à court terme.
Industrie — chaleur haute T° (> 800°C) — acier, ciment, verre, céramique	~3,5–4 Gt	~10 %	bioCH₄ — seul vecteur capable industriellement	L'arc électrique couvre une partie de l'acier (fours à arc), mais pas le ciment, le verre, la céramique, ni l'intégralité de l'acier. Températures 1 200–1 600°C nécessitent un combustible. Le bioCH ₄ est ici le seul substitut aux fossiles disponible à grande échelle et sans infrastructure nouvelle.
Industrie chimique — ammoniac, méthanol	~2 Gt	5 %	bioCH₄ comme réactif + source d'énergie	CH ₄ est la molécule de départ naturelle de la chimie du carbone renouvelable (C/H/O — première molécule organique synthétisable). Remplace le gaz naturel fossile sans modifier les procédés Haber-Bosch ou méthanol-syngas existants.

Transport — voitures courte distance (< 50 km/j)	~3,2 Gt	8 %	BEV — solution principale	Rendement 90 %, infrastructure charge en déploiement. bioCH ₄ réservé à l'appoint longue distance via architecture ÉREV (Rex CH ₄ esclave de la batterie, régime fixe ~2 500 rpm, jamais couplé aux roues).
Transport — camions lourds longue distance	~2,0 Gt	5 %	bioCH₄ GNL/GNV — vecteur principal	Électrification possible mais lente et partielle (charge haute puissance coûteuse). GNL déjà déployé, même groupe motopropulseur fossile→bio sans modification. Bilan négatif possible avec biochar.
Transport — maritime hauturier	~0,93 Gt	2 %	bioCH₄ GNL dual-fuel	Électrification physiquement exclue à l'échelle utile. H ₂ : densité volumique 4× inférieure au GNL, infrastructure inexistante, coût de liquéfaction prohibitif. NH ₃ : NOx très élevés, toxicité, η faible. GNL dual-fuel : infrastructure portuaire existante, même navire fossile→bio.
Transport — aviation long-courrier	~1,0 Gt	3 %	bioCH₄ GNL — turbofan adapté	Électrification physiquement improbable (densité H ₂ liquide ×4 inférieure au GNL → réservoirs 1 353 m ³ vs 538 m ³ pour Paris–NY). SAF : feedstock limité (~6 Mt/an mondial). bioCH ₄ GNL : Tu-155 preuve historique 1989 (100 vols), réservoirs +36 % volume gérables.

TOTAL émissions mondiales énergie 2024	~37,8 Gt	100 %	Électricité décarbonée + PAC : ~55–60 % à terme	bioCH₄ : périmètre légitime ~9–10 Gt — chaleur industrielle haute T° + transport non électrifiable + chimie
---	-----------------	--------------	---	---

Sources : IEA GHG Emissions from Energy Data Explorer 2024 · IEA Energy Efficiency 2025 · Columbia Climate School — Low-Carbon Heat for Heavy Industry · IMO GHG Study 2020 · IATA Fuel Study 2022 · Comparatif Multi-Secteur V5, Programme Résilience V11

Périmètre d'application du bioCH₄ : chaleur industrielle haute température + transport non électrifiable (camion lourd longue distance, maritime hauturier, aviation long-courrier) + chimie (réactif). Dans ces secteurs, le bioCH₄ peut constituer un vecteur pertinent parmi les solutions de décarbonation disponibles — et dans certains cas, le seul vecteur mature déployable sans rupture technologique. Ce périmètre représente environ **9 à 10 Gt CO₂/an soit 25 % des émissions mondiales d'énergie**. Pour le reste — ~75 % des émissions — l'électricité décarbonée, les pompes à chaleur et les ENR sont les vecteurs appropriés. Il ne s'agit pas d'affirmer que le bioCH₄ doit couvrir 25 % des émissions mondiales, mais qu'il est le levier le plus opérationnel pour décarboner ce quart précis.

2 — Le bioCH₄ : une filière de gestion du carbone à quatre leviers simultanés

C'est le point que la seule comparaison énergétique ne capture pas. Évaluer le bioCH₄ uniquement comme un carburant renouvelable — en le comparant au kWh de l'H₂ ou du SAF — revient à mesurer la valeur d'un système de recyclage à l'aune de son seul rendement énergétique, en ignorant ce qu'il fait au déchet qu'il traite. Le bioCH₄ issu de la pyrogazéification de biomasse résiduelle gère simultanément quatre flux que nul autre vecteur énergétique ne traite conjointement.

Flux	Ce que fait la filière	Valeur climatique spécifique à Résilience	H ₂ électrolyse ou SAF HEFA : même fonction ?
①	Énergie	Le carbone organique de la biomasse devient du CH ₄ utilisable : chaleur industrielle haute T°, carburant transport non électrifiable, injection réseau gaz existant.	Oui — H ₂ et SAF fournissent aussi de l'énergie ou un carburant. Fonction commune.
②	Traitement des flux organiques	Une matière organique qui devait être traitée (effluent d'élevage, digestat, résidu	Non. L'H ₂ par électrolyse n'a aucune fonction de traitement d'un flux

		forestier, biodéchet) est valorisée plutôt que stockée, incinérée ou laissée émettre.	carboné préexistant. Le SAF HEFA non plus.
③	CH₄ atmosphérique diffus évité	Pour effluents d'élevage stockés et biodéchets en décharge : le scénario de référence sans valorisation émet du CH ₄ diffus non capté. La filière transforme ce flux incontrôlé en flux capté, mesuré et valorisé. ⚠ Uniquement pour les catégories à scénario anaérobie démontré — pas la biomasse sèche.	Non. Aucun CH ₄ diffus n'est capté ni évité par la production d'H ₂ ou de SAF. Ce levier climatique n'existe pas pour ces vecteurs.
④	Carbone durablement séquestré	Pyrogazéification > 700°C → biochar (H/Corg ≤ 0,4 — stabilité millénaire démontrée). Carbone biogénique prélevé sur l'atmosphère, fixé en sol agricole sans retourner en CO ₂ . Certification EBC/Puro.earth : 2,5–3,1 t CO ₂ eq/t biochar.	Non. H ₂ et SAF HEFA évitent des ajouts de carbone fossile — ils ne retirent pas de carbone préexistant de l'atmosphère. Aucune séquestration nette intrinsèque.

La comparaison climatique correcte ne porte pas sur la combustion du bioCH₄. Pour les flux organiques dont le scénario de référence réel émet du CH₄ diffus, la question n'est pas : « la filière émet-elle du méthane à la combustion ? » Elle est : « combien de CH₄ et de CO₂ le système complet émet-il par rapport au scénario de référence réel du déchet sans valorisation ? » Ce différentiel inclut les émissions évitées du scénario de référence (③), la substitution du fossile par le bioCH₄ valorisé (①②), et la séquestration nette par le biochar (④) — moins les émissions propres de la filière (fuites ≤ 1 %, CO₂ procédé, transport).

Pourquoi cela change la comparaison avec l'H₂. L'H₂ produit par électrolyse avec de l'électricité décarbonée peut éviter des émissions fossiles — c'est réel et utile. Mais il ne traite aucun flux carboné problématique préexistant, n'évite aucun CH₄ diffus et ne séquestre aucun carbone. Les deux systèmes ne répondent pas au même problème climatique. Comparer bioCH₄ et H₂ uniquement sur leur rendement énergétique revient à comparer un système de traitement des eaux avec une pompe à eau sur le seul critère du débit.

Formulation centrale : le bioCH₄ de Résilience ne doit pas être évalué comme un simple substitut du gaz naturel fossile. Dans les filières où la biomasse traitée aurait émis du CH₄ diffus sans valorisation, il constitue simultanément ① un vecteur énergétique, ② un outil de traitement de flux organiques, ③ un moyen de prévenir des émissions de méthane atmosphérique diffuses et ④ un support de séquestration durable du carbone. **Le bioCH₄ n'est pas nécessairement le meilleur vecteur énergétique dans l'absolu — il peut en revanche être l'un des meilleurs outils**

climatiques lorsque sa production est associée au traitement d'une matière dont le scénario de référence comporte des émissions significatives et/ou à une voie de séquestration durable du carbone. C'est cette phrase qui constitue le véritable cœur scientifique de la démonstration — et qui rend la comparaison avec l'H₂ ou le SAF HEFA fondamentalement asymétrique.

3 — Pourquoi le bioCH₄, et pas l'H₂, pour les usages énergétiques difficiles

Chaleur industrielle haute température

L'acier, le ciment, le verre et la céramique exigent des températures de 1 200 à 1 600°C. L'électricité peut atteindre ces températures (arc électrique, induction, plasma), mais pas à l'échelle de la production mondiale en service, ni au coût compatible avec des matériaux de base.

Distinction acier primaire / acier de recyclage : les fours à arc électrique (EAF) couvrent aujourd'hui ~30 % de la production mondiale d'acier — principalement par fusion de ferraille — et continueront de progresser là où le gisement de ferraille le permet. Cette filière est électrifiable et doit l'être. En revanche, la production d'acier primaire par réduction directe du minerai de fer (DRI — Direct Reduced Iron) utilise aujourd'hui du gaz naturel fossile ou du charbon comme réducteur et source thermique. C'est ici que le bioCH₄ intervient : en substitution du gaz naturel dans les fours DRI, sans modification du procédé. Le ciment, le verre et la céramique n'ont pas d'équivalent EAF — ils brûlent un combustible et ne peuvent pas faire autrement dans l'état actuel des technologies à grande échelle.

La comparaison avec l'H₂ : l'H₂ peut en principe fournir ces températures par combustion, mais il exige une reconversion des brûleurs (flamme différente, émissivité infrarouge différente, risque de fragilisation des métaux par hydrogénation), une infrastructure de production et distribution entièrement nouvelle, et un coût de production encore très élevé. Le bioCH₄ utilise les brûleurs, les conduites et les réseaux existants sans modification majeure.

Maritime hauturier et aviation long-courrier

Pour le maritime et l'aviation longue distance, la densité énergétique volumique est la contrainte déterminante. Le GNL (méthane liquéfié) offre 21,1 MJ/L. L'H₂ liquide à -253°C n'offre que 8,5 MJ/L — soit 4 fois moins. Pour un vol Paris–New York, les réservoirs H₂ occuperaient 1 353 m³ contre 538 m³ pour le GNL, incompatibles avec l'architecture d'un fuselage. Pour le maritime, l'infrastructure GNL portuaire est partiellement existante dans les grands ports mondiaux. L'infrastructure H₂ maritime est quasi inexistante et son déploiement à grande échelle représente des décennies et des investissements considérables.

La preuve historique : le Tupolev Tu-155 a réalisé plus de 100 vols commerciaux au GNL dès 1989. Ni l'H₂ ni aucune autre technologie n'a une telle démonstration à l'échelle réelle sur un aéronef de transport.

Camion lourd longue distance

Le GNL et le GNV sont déjà déployés dans les flottes de camions longue distance européennes. L'architecture ÉREV (véhicule à autonomie étendue) — avec un Rex CH₄ à régime fixe ~2 500 rpm, esclave de la batterie, jamais couplé mécaniquement aux roues — optimise le rendement

thermique tout en conservant l'infrastructure de distribution CH₄ existante. Le passage du CH₄ fossile au bioCH₄ ne modifie ni le moteur, ni le réservoir, ni la logistique.

4 — La réduction CO₂ secteur par secteur : du fossile au bilan négatif

Le méthane contient structurellement moins de carbone par unité d'énergie que les combustibles qu'il substitue (75 % de carbone vs 85–86 % pour le diesel, le fioul et le kérosène). La réduction de CO₂ à la combustion est une propriété chimique, pas une promesse. Elle varie selon le carburant substitué : –28 % pour le diesel, –27 % pour le fioul lourd, –37 % pour le kérosène. Les rendements η supérieurs des équipements CH₄ amplifient encore ce gain.

Lecture du tableau : chaque colonne est le résultat cumulatif de l'étape précédente. La dernière colonne — configuration idéale avec biochar — n'est pas une hypothèse spéculative : c'est la conséquence directe du déploiement de la filière pyrogazéification (> 700°C) avec certification EBC (H/Corg ≤ 0,4), dont le ratio conservateur est 2,5–3,1 t CO₂eq/t biochar.

Secteur — périmètre bioCH ₄ légitime	CO ₂ fossile actuel	① CH ₄ fossile + fuites < 2 %	② bioCH ₄ 100 % — CO ₂ fossile net ajouté à l'atm. = 0	+ CO ₂ biogénique valorisé (serre, chimie, séquestration)	③ Biochar — configuration idéale
Chaleur industrielle haute T° (acier, ciment, verre, céramique...)	3,5–4,0 Gt/an	~2,5–2,9 Gt (–27 à –30 %)	→ 0 Gt CO ₂ atm	CO ₂ biogénique pur concentré en sortie d'épuration → serres, chimie du carbone, séquestration géologique ou minérale. Lever supplémentaire de bilan négatif.	→ Bilan négatif. –1,5 kg CO ₂ /kg bioCH ₄ . Puits industriels → absorption nette.
Camions lourds longue distance	2,0 Gt/an	~1,44 Gt (–28 %)	→ 0 Gt CO ₂ atm	CO ₂ biogénique valorisable selon localisation des sites de production.	→ Bilan négatif. ÉREV Rex bioCH ₄ : –62 g CO ₂ /MJ avec biochar (Comparatif V5).
Maritime hauturier	0,93 Gt/an	~0,68 Gt (–27 %)	→ 0 Gt CO ₂ atm	CO ₂ biogénique valorisable en port (serres locales,	→ Bilan négatif. –60 g CO ₂ /MJ avec biochar

				industrie portuaire).	(Comparatif V5).
Aviation long-courrier	1,0 Gt/an	~0,63 Gt (-37 %)	→ 0 Gt CO ₂ atm	CO ₂ biogénique valorisable sur hubs de production GNL aviation.	→ Bilan négatif. -68 g CO ₂ /MJ avec biochar (Comparatif V5).
Industrie chimique (ammoniac, méthanol...)	~2,0 Gt/an	~1,5 Gt (-25 %)	→ ~0 Gt CO ₂ atm	CO ₂ biogénique directement réintégré comme réactif dans la synthèse méthanol (P2G) ou carbonatation minérale — valeur chimique maximale.	→ Bilan négatif partiel selon filière.
SOUS-TOTAL périmètre bioCH₄	~9,4–9,9 Gt/an	~6,8–7,2 Gt (-28 à -30 %)	→ proche de 0 CO ₂ atm	Flux CO ₂ biogénique concentré : levier additionnel de séquestration ou valorisation, non comptabilisé dans les colonnes précédentes.	→ Bilan sectoriel NET NÉGATIF en configuration idéale.
Reste — production élec. ENR/nucl., bâtiments PAC, voitures BEV, industrie basse T° élec. (37,8 – 9,7 = ~28,1 Gt)	~28 Gt/an — en déclin structurel	Décarbonation par électricité décarbonée + PAC + ENR	—	—	bioCH ₄ N'EST PAS alloué ici — ressource rare réservée aux usages sans alternative électrique.

TOTAL mondial — trajectoire (9,7 + 28,1 = 37,8 Gt ✓)	37,8 Gt (2024)	Secteurs cibles bioCH₄ : ~9,7 Gt → ~7 Gt (–28 à –30 %). Reste (28 Gt) : décarbonation indépendante par ENR + PAC. Total résiduel : ~35 Gt, dont ~7 Gt secteurs cibles + ~28 Gt en déclin structurel.	Secteurs bioCH₄ → ~0 Gt CO₂ atm. Reste (28 Gt) : décarbonation indépendante par ENR + PAC sur trajectoire séparée.	CO₂ biogénique concentré : levier supplémentaire de bilan négatif selon valorisation (serre, chimie, séquestration géologique).	Bilan mondial en territoire NÉGATIF — si fuites maîtrisées + biochar certifié EBC + CO₂ biogénique valorisé.
---	-----------------------	--	---	---	--

Sources CO₂/MJ : Comparatif Multi-Secteur V5, Programme Résilience V11 (sept. 2026). BioCH₄ — CO₂ fossile net ajouté à l'atmosphère = 0 : la combustion du bioCH₄ 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 fossile est nul. Biochar : –1,5 kg CO₂/kg bioCH₄ (hypothèse conservatrice, à confirmer par bilan matière carbone du procédé industriel). Certification EBC : 2,5–3,1 t CO₂eq/t biochar (Puro.earth). Fuites < 2 % chaîne complète : LDAR + MOC.

Le chiffre clé : la substitution CH₄ fossile seule, sur les seuls secteurs où elle est pertinente et disponible maintenant, réduit les émissions de **2,5 à 3 Gt CO₂/an** — soit 6 à 7 fois les émissions totales de la France. Sans changer un seul moteur, une seule usine, un seul avion. Seule condition : mesurer et certifier les fuites sur toute la chaîne.

5 — Le seul vrai risque : les fuites de méthane

Le méthane est un gaz à effet de serre puissant (GWP100 = 27,9, IPCC AR6). Des fuites non contrôlées sur la chaîne — extraction, transport, distribution, moteur ou brûleur — peuvent éroder le gain climatique. **Ce risque est réel. Il est quantifié. Il est maîtrisable.**

Il existe pour chaque usage un seuil critique au-delà duquel le bilan GES devient négatif : 9,9 % pour la substitution de gaz naturel, 13,8 % pour le diesel camion, 15,5 % pour le kérosène aviation. Ces seuils sont élevés — mais certains bassins d'extraction américains s'en approchent sans contrôle.

Les données satellitaires 2024–2025 (IEA GMT 2026, MethaneSAT, Sherwin et al., Nature 2024, ≈ 1 million d'observations) montrent : bassins Appalachie/Haynesville ~1–2 % de fuites (très en deçà du seuil) ; Permian Basin côté Nouveau-Mexique jusqu'à 9,6 % sans LDAR. Les moteurs à combustion CH₄ (turbofan > 1 400°C, MOC catalytique) affichent des fuites quasi nulles (< 0,01 à 0,5 %). Le risque est en amont — pas dans les équipements.

Point d'attention maritime (Gemini) : certains moteurs dual-fuel basse pression à 4 temps (LPDF) utilisés dans le maritime hauturier présentent un méthane slip résiduel de 1,5 à 3 % à

l'échappement sans post-traitement. Pour garantir le seuil global $\leq 1\%$ sur la chaîne complète, l'obligation de catalyseur MOC (Methane Oxidation Catalyst) ou de technologie à injection directe haute pression (HPDI — cycle diesel) est indispensable sur ces moteurs. Ce point est intégré dans le protocole à 5 niveaux du CDC V2.3 (§6.3, taux résiduel cible $< 0,1\%$ avec MOC).

Condition non négociable : $\leq 1\%$ de fuites sur la chaîne complète (seuil contractuel Résilience V11). À 2% , 90 % du gain brut est préservé. La maîtrise des fuites n'est pas optionnelle — elle est la condition de validité de toute la démonstration.

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

Ce que cette feuille de route démontre : on peut réduire massivement les émissions des secteurs les plus difficiles à décarboner dès maintenant, sans percée technologique, sans modifier les équipements, et construire ensuite — sur la même infrastructure — un bilan carbone qui passe de réduit à nul, puis à négatif.

Étape 1 — Adapter l'approvisionnement et les systèmes de stockage

Dans un four à ciment, un brûleur industriel ou un moteur de navire dual-fuel, la molécule méthane brûle dans les mêmes chambres de combustion que le gaz naturel fossile — les procédés de combustion sont largement compatibles ou adaptables à coût modéré. Ce qui ne change pas : les réseaux de distribution, les contrats d'exploitation, les compétences opérationnelles.

Ce qui doit être adapté selon l'usage : les systèmes de stockage et d'alimentation en carburant. Pour les camions GNL, les réservoirs cryogéniques à -162°C remplacent les réservoirs diesel — c'est une modification significative du véhicule mais standardisée et déjà déployée industriellement. Pour l'aviation GNL, les réservoirs sont plus volumineux (+36 % pour Paris–New York), ce qui implique des modifications structurelles de l'appareil et une recertification EASA. Pour la chaleur industrielle haute température, les brûleurs à gaz naturel sont déjà conçus pour le méthane — la substitution bioCH₄ est directe. La portée des adaptations varie donc fortement selon l'usage : marginale pour l'industrie, substantielle pour l'aviation.

Seule exigence commune et non négociable : mesure et certification indépendante des fuites sur toute la chaîne, de la tête de puits au brûleur ou moteur.

Étape 2 — Remplacer le CH₄ fossile par du biométhane : le renversement du contrefactuel

Le biométhane est produit par pyrogazéification de biomasse résiduelle — digestat de méthanisation, effluents d'élevage, résidus forestiers, biodéchets. Il est chimiquement identique au gaz naturel fossile : même réseau, mêmes moteurs, mêmes brûleurs.

L'argument que le document doit rendre visible : les intrants de la filière bioCH₄ émettent déjà du méthane et du CO₂ dans leur scénario de référence. Un lisier porcin stocké en fosse ouverte produit du CH₄ diffus incontrôlé — estimé à 1–3 % des émissions agricoles françaises (Note Méthane V2). Des biodéchets en décharge non traitée fermentent en conditions anaérobies et perdent 25–35 % de leur biogaz dans l'atmosphère. Ces émissions se produisent de toute façon, que la filière bioCH₄ existe ou non.

La question climatique pertinente n'est donc pas : « la filière bioCH₄ émet-elle du méthane ? » Elle est : « **combien d'émissions le système Résilience génère-t-il par rapport au scénario de référence réel de ces déchets sans valorisation ?** » Pour les effluents d'élevage et les biodéchets — les deux catégories à scénario anaérobie démontré — la filière contrôlée (fuites $\leq 1\%$) émet

structurellement moins de CH₄ et de CO₂ que le scénario de référence non contrôlé. Elle transforme une émission diffuse incontrôlée en flux capté, mesuré et valorisé.

Ce que cela change pour la comparaison climatique. Le CO₂ émis lors de la combustion du bioCH₄ avait été capté par les plantes lors de leur croissance. Le cycle est fermé : le bilan net de combustion est zéro, quel que soit le secteur d'usage. Et pour les catégories où le scénario de référence émet du CH₄ diffus, le bilan est négatif avant même de compter le biochar.

Règle d'allocation stricte : le biométhane est une ressource contrainte par le gisement. Il est alloué exclusivement aux usages sans alternative électrique performante. Il n'est pas affecté au chauffage résidentiel, aux voitures urbaines, ni à l'industrie basse température électrifiable.

Le CO₂ biogénique concentré : un flux supplémentaire trop souvent ignoré. L'épuration du biogaz produit en tête de procédé un flux de CO₂ pur, d'origine biogénique, non mélangé à l'atmosphère. Ce flux peut être valorisé en serre maraîchère (enrichissement CO₂), comme réactif dans la chimie du carbone (synthèse méthanol par P2G, carbonatation minérale, polymères) ou séquestré géologiquement (injection en aquifère salin ou formation basaltique). Pour certaines filières, ce CO₂ biogénique représente 30 à 40 % du carbone entrant dans le digesteur. Valorisé ou séquestré, il constitue un levier additionnel de bilan négatif indépendant du biochar — et non comptabilisé dans la colonne ② du tableau. C'est le flux C₂ de l'Indice de Conservation du Carbone Biogénique (ICB) défini dans le CDC Méthanisation V2.3.

Étape 3 — Fixer le carbone : le bilan devient négatif

La pyrogazéification à haute température (> 700°C) produit simultanément du biométhane et du biochar. Le biochar est une forme de carbone solide stable (H/C_{org} ≤ 0,4 — condition de stabilité millénaire). Appliqué en sol agricole, il ne se décompose pas en CO₂. Ce carbone prélevé sur l'atmosphère par les plantes y reste fixé. Le bilan climatique des secteurs cibles passe en négatif : ils absorbent plus de carbone qu'ils n'en émettent.

Cette troisième étape ne modifie rien pour les flottes de transport ni pour les usines industrielles. Elle s'ajoute en amont, dans la chaîne de production du biométhane.

Horizon	Étape	Ce qui change — et ce qui ne change pas	Réduction CO ₂ estimée	Condition clé
Maintenant → 2030	① CH ₄ fossile + maîtrise fuites	Substitution du carburant fossile par du CH ₄ fossile dans les secteurs cibles : fours industriels haute T°, camions GNL, navires dual-fuel, hubs aviation. Les équipements, les usines, les flottes ne changent pas. Seule condition : LDAR certifié indépendant upstream + MOC moteur, fuites < 2 % chaîne complète.	-2,5 à -3 Gt CO ₂ /an sur secteurs cibles	Fuites certifiées < 2 % chaîne.

2026 → 2035	② bioCH₄ progressif	On remplace le CH ₄ fossile par du biométhane — produit par pyrogazéification de biomasse résiduelle (digestat, résidus agricoles, bois post-incendie). Même réseau, mêmes moteurs, mêmes brûleurs. Le CO ₂ émis à la combustion avait été capté par les plantes : bilan net de combustion = zéro. Allocation stricte : uniquement aux usages sans alternative électrique performante.	+2,5 à +3 Gt supplémentaires à 100 % substitution secteurs cibles	Gisement biomasse + certification qualité injection réseau. Pas d'allocation aux bâtiments ni aux voitures.
2030 → 2045	③ Biochar — bilan négatif	La pyrogazéification > 700°C produit simultanément du biométhane et du biochar. Le biochar est une forme de carbone solide stable (H/Corg ≤ 0,4), qui ne se décompose pas en CO ₂ appliqué en sol agricole. Ce carbone prélevé sur l'atmosphère par les plantes est fixé durablement. Le bilan climatique des secteurs cibles passe en négatif : ils absorbent plus de carbone qu'ils n'en émettent. Configuration idéale : -1,5 kg CO ₂ /kg bioCH ₄ (ratio conservateur — certification EBC/Puro.earth : 2,5–3,1 t CO ₂ eq/t biochar).	Bilan sectoriel net NÉGATIF — absorption nette de CO₂ atmosphérique	Sites Phase 0 Résilience V11 (150 sites × 1 000 t/j). Validation agronomique 100 ans. EBC H/Corg ≤ 0,4.

Message central : la transition énergétique des usages difficiles à décarboner n'attend pas une percée technologique. Elle attend une décision d'approvisionnement. **Chaque année supplémentaire** de combustion de fioul lourd dans les fours à ciment, de diesel dans les camions longue distance, de kérosène dans les avions intercontinentaux **représente des émissions que les technologies disponibles aujourd'hui permettraient de réduire de 27 à 37 %**, sans changer un seul moteur, une seule usine, un seul avion — à condition de mesurer et maîtriser les fuites méthane sur l'ensemble de la chaîne.

7 — L'aviation long-courrier : le cas le plus difficile, la stratégie la plus urgente

L'aviation est le secteur où le verrouillage technologique et temporel est le plus extrême. Elle représente ~1 Gt CO₂/an de combustion directe, mais son impact climatique réel est significativement plus élevé quand on intègre les effets non-CO₂ — traînées de condensation, cirrus induits, oxydes d'azote à haute altitude. Ces effets non-CO₂ pourraient représenter 2 à 4 fois l'impact CO₂ seul selon les estimations actuelles (Lee et al., Nature Climate Change 2021). L'aviation est aussi le seul secteur de transport de masse pour lequel aucune technologie de substitution électrique ou hydrogène n'est déployable à grande échelle dans les délais utiles.

L'impasse des SAF drop-in

La stratégie dominante de l'industrie aéronautique repose sur les SAF (Sustainable Aviation Fuels) drop-in — carburants compatibles avec les avions et infrastructures actuels sans modification. Cette facilité opérationnelle se heurte à deux murs physiques irréductibles.

- **Gisement HEFA saturé** : les SAF HEFA (hydrotraitement d'huiles et graisses) dépendent d'huiles usagées et de graisses animales dont le gisement mondial est déjà sous tension. L'extension vers des cultures dédiées créerait des conflits d'usage des sols incompatibles avec la sécurité alimentaire et la séquestration naturelle de carbone. Le gisement mondial HEFA est estimé à ~6 Mt/an — largement insuffisant pour décarboner un trafic aérien qui consomme ~300 Mt de kérosène/an.
- **e-carburants (Power-to-Liquid) : rendement catastrophique** : produire du kérosène de synthèse par électrolyse → H₂ → Fischer-Tropsch affiche un rendement global de 30 à 40 %. Décarboner l'aviation par cette voie siphonnerait une part colossale des capacités ENR/nucléaires mondiales au détriment de l'électrification directe de l'industrie terrestre — un arbitrage énergétique qui n'est pas défendable dans un contexte de contrainte sur la production d'électricité décarbonée.

Conclusion sur les SAF : ils constituent une solution réelle de réduction des émissions du carburant pour la flotte existante, à condition de ne pas dépasser le gisement HEFA disponible. Mais ils ne peuvent constituer à eux seuls une stratégie mondiale de décarbonation de l'aviation : le gisement est structurellement insuffisant (~6 Mt/an vs ~300 Mt consommées), et les SAF ne traitent pas les effets non-CO₂ de l'aviation (traînées de condensation, NO_x, cirrus induits). Les présenter comme la solution principale de long terme est un biais de cadrage qui retarde les décisions structurelles nécessaires.

Les trois leviers réalistes, par horizon temporel

① Maintenant — Optimisation des trajectoires contre les traînées de condensation

C'est le levier le plus immédiat, le moins coûteux et le plus sous-exploité. Les traînées de condensation se forment dans les zones atmosphériques froides et saturées en glace. Leur impact climatique (forçage radiatif) représente potentiellement 50 % de l'effet climatique total de l'aviation — plus que le CO₂ lui-même sur le court terme. Or l'ajustement dynamique des altitudes et routes de vol pour éviter ces zones permet de supprimer une part majeure de cet impact pour un surcoût en carburant inférieur à 1–2 %. Les données météo et les outils de modélisation existent. Ce qui manque, c'est un cadre réglementaire qui rende cet ajustement obligatoire.

② Court terme (2026–2035) — Report modal et sobriété structurelle

L'arrêt du transport aérien mondial est une utopie politique et économique. En revanche, organiser une sobriété structurelle ciblée est à la fois inévitable pendant la phase de transition et défendable socialement si elle est cohérente.

- **Report modal ferroviaire** : interdiction ou taxation dissuasive des vols courts et moyens-courriers là où une alternative ferroviaire performante existe (seuil généralement fixé à < 3h30–4h de trajet). La France l'a partiellement engagé — mais l'application reste limitée et les dérogations nombreuses.
- **Cherté structurelle du carburant décarboné** : la rareté du bioCH₄ et des SAF doit se traduire mécaniquement par une hausse du coût du billet. L'aviation ne peut pas rester un mode de transport de masse à bas coût si elle utilise des molécules rares. Le prix du carbone doit être pleinement intégré — ce que les mécanismes actuels (CORSIA, EU ETS aviation) font trop partiellement.

③ Moyen terme (2035–2045) — Rupture technologique : avions à bioCH₄ cryogénique

C'est la seule trajectoire qui permette une décarbonation structurelle de l'aviation long-courrier tout en restant physiquement et industriellement déployable dans des délais utiles.

- **Densité volumique maîtrisée** : le méthane liquéfié (GNL, –162°C) exige des réservoirs ~36 % plus volumineux que le kérosène pour un vol Paris–New York — intégrable dans l'architecture d'une nouvelle génération de fuselages. L'H₂ liquide (–253°C) exigerait des réservoirs ~240 % plus volumineux — incompatible avec un fuselage conventionnel.
- **Combustion ultra-propre** : le méthane brûle sans soufre et produit très peu de particules fines — les deux facteurs déterminants dans la formation des traînées de condensation (les suies constituent les noyaux de condensation des cirrus induits). Le passage au bioCH₄ réduit donc simultanément les émissions CO₂ fossiles (cycle court biomasse) et l'impact non-CO₂ (–90 % PM vs kérosène, Comparatif V5). **Point d'attention (Gemini)** : la combustion de CH₄ produit davantage de vapeur d'eau que le kérosène (~2,25 kg H₂O/kg CH₄ vs ~1,26 kg H₂O/kg kérosène). La réduction des noyaux de condensation diminue la densité des cirrus induits, mais l'évitement dynamique des zones froides saturées (levier ①) reste indissociable du passage au bioCH₄ cryogénique pour minimiser l'effet non-CO₂ résiduel.
- **Preuve historique** : le Tupolev Tu-155 a réalisé plus de 100 vols commerciaux au GNL dès 1989. Aucune autre technologie de substitution n'a une telle démonstration à l'échelle réelle sur un aéronef de transport.
- **Bilan carbone net négatif possible** : couplé au biochar en amont de la production de bioCH₄, le bilan de combustion passe en négatif (–68 g CO₂/MJ avec biochar, Comparatif V5). L'aviation long-courrier pourrait devenir un secteur à bilan carbone net négatif — ce qu'aucune autre technologie de substitution n'offre.

Le verrou réglementaire et industriel : le point de vigilance central.

Gemini le signale avec raison : le temps de renouvellement d'une flotte aéronautique est de 20 à 30 ans. La certification EASA d'un nouvel appareil prend 10 à 15 ans. Pour que des avions à bioCH₄ cryogénique soient en service commercial significatif à l'horizon 2045, la décision de développement doit être prise **maintenant** — en 2026. Chaque année perdue sur cette décision

repousse l'horizon de déploiement d'autant. La résistance de l'industrie aéronautique vers les drop-in SAF (qui ne nécessitent aucune modification d'avion ni d'aéroport) est réelle et compréhensible économiquement — mais elle est incompatible avec les délais climatiques si elle reste la stratégie principale.

Levier	Horizon	Réduction impact	Coût / complexité	Condition clé
Optimisation trajectoires anti-traînées	Maintenant	Jusqu'à -50 % impact non-CO ₂	Faible — surcoût carburant < 2 %	Cadre réglementaire OACI/EASA rendant l'ajustement obligatoire.
Report modal ferroviaire + taxation carbone complète	2026–2030	Réduction demande vol < 4h	Moyen — volonté politique	Généralisation EU + accords bilatéraux. Fin des billets low-cost non taxés CO ₂ .
SAF HEFA drop-in (transition partielle)	2026–2035	-50 % CO ₂ atm à 50 % blend — gisement limité à ~6 Mt/an	Élevé — ×3 à ×5 prix kérosène	Usage limité aux vols sans alternative bioCH ₄ . Ne résout pas le problème à l'échelle.
Avions bioCH ₄ GNL cryogénique (nouvelle génération)	2035–2045	CO ₂ atm = 0 + -90 % PM + bilan négatif avec biochar	Très élevé — refonte fuselage, infra aéroport, certification EASA 10–15 ans	Décision de développement en 2026. Engagement constructeurs (Airbus, Boeing) et motoristes (CFM, Rolls-Royce). Investissement massif infra GNL aéroportuaire.

L'urgence de la décision — 2026 est l'année charnière : si la décision de développement d'une architecture d'avion à bioCH₄ cryogénique n'est pas prise dans les prochaines années, les délais de certification et de renouvellement de flotte rendent tout déploiement significatif impossible avant 2050–2055 — soit après la fenêtre critique climatique. Continuer à miser uniquement sur les SAF drop-in revient à accepter que l'aviation reste massivement carbonée jusqu'à la fin du siècle.

Sources : IEA Global Energy Review 2025 · IEA Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer 2024 · IEA Global Methane Tracker 2026 · IPCC AR6 (GWP100 = 27,9 ; GWP20 = 82,5) · Lee et al., Nature Climate Change 2021 (effets non-CO₂ aviation) · Sherwin et al., Nature 2024 (MethaneSAT, ≈

1M observations) · Columbia Climate School — Low-Carbon Heat for Heavy Industry · IMO GHG Study 2020 · IATA Long Range Fuel Study 2022 · Comparatif Multi-Secteur V5, Programme Résilience V11 (sept. 2026) · EBC/Puro.earth (biochar 2,5–3,1 t CO₂eq/t) · Global Carbon Budget 2024 · Note Aviation BioGNL V11 · Segment 4 Long-Courrier V6