

AVIATION BIO-GNL

GNL fossile · Mélanges bio-GNL · SAF — Analyse comparative

Programme Résilience V11 — Juin 2026

Synthèse de l'analyse comparative complète : (1) Le GNL fossile dès maintenant surpasse le kérosène + 50 % SAF sur tous les critères environnementaux et coûte moins cher. (2) Le SAF à 50 % est physiquement impossible à produire à l'horizon 2030–2040. (3) Le mélange progressif bio-GNL offre une trajectoire de décarbonation réaliste, progressive et économiquement supérieure à toute autre option.

Partie 1 — Le GNL fossile dès maintenant : un bénéfice immédiat sans attendre

Sans attendre le Programme Résilience, sans nouveau programme industriel, un avion long-courrier fonctionnant au GNL fossile aujourd'hui apporte des bénéfices environnementaux immédiats sur l'ensemble des polluants — pas seulement le CO₂.

1.1 Comparaison GNL fossile vs kérosène — vol Paris–New York

Critère	Kérosène Jet-A1	GNL fossile	Gain GNL
CO ₂ direct (t/vol)	995 t	625 t	-37 %
Équivalent SAF dans kérosène	Référence	Nécessiterait ~46 % SAF	Disponible MAINTENANT
NOx (kg/vol)	1 200 kg	720 kg	-40 % (structurel)
Particules fines (kg/vol)	180 kg	54 kg	-70 %
Traînées de condensation	Forçage radiatif élevé	-50 à -90 %	Réduction majeure
Coût carburant vol	~280 000 €	~238 000 €	-15 % (moins cher)
Infrastructure nécessaire	Existante	Existante (LNG maritime)	Zéro investissement macro-logistique — investissement limité côté aéroport (avitaillement cryogénique, camions spécialisés)
Disponibilité	Aujourd'hui	Aujourd'hui	Immédiat

Pourquoi ces bénéfices sont structurels et non optionnels

- NOx -40 % : le méthane brûle à température significativement plus basse que le kérosène. La formation de NOx thermiques (mécanisme de Zeldovich) dépend exponentiellement de la température — cette réduction est physique, pas technologique.
- Particules fines -70 % : le kérosène contient des composés soufrés et aromatiques qui génèrent des suies. Le méthane CH₄ pur n'en contient aucun. Cette réduction est chimique et permanente.
- Contrails -50 à -90 % : la température de combustion plus basse et l'absence de noyaux de condensation (soufre, suies) réduisent drastiquement la formation et la persistance des traînées. Le forçage radiatif des contrails dépasse le CO₂ sur 20 ans (IPCC AR6).
- Coût inférieur : le méthane a un pouvoir calorifique 16 % supérieur au kérosène (50 vs 43 MJ/kg). L'avion consomme 227 t de GNL vs 316 t de kérosène pour le même vol — la masse embarquée est inférieure malgré les réservoirs plus volumineux.

Preuve historique : le programme soviétique Tu-156 (1996–1999) a effectué plusieurs dizaines de vols sur GNL méthane avec le moteur Kouznetsov NK-89. Les ingénieurs ont rapporté une combustion plus propre, plus stable et avec moins de vibrations que le kérosène. Note sur le méthane slip : les turbines aviation modernes (températures >1 400°C, rapport air/combustible élevé) brûlent 100 % du méthane — le slip (CH₄ non brûlé à l'échappement) est quasi-nul, contrairement aux vieux moteurs marins à basse pression. La chaîne logistique du Programme Résilience impose des systèmes de détection de fuites à seuil 0,5 % vol. et des boucles fermées de récupération boil-off — émissions fugitives <0,1 %. L'arrêt du programme était financier (dissolution URSS), pas technique. Il y a 30 ans, Tupolev avait déjà démontré la supériorité pratique du GNL sur l'hydrogène liquide.

Partie 2 — Le SAF : combien faut-il pour égaler le GNL fossile ?

Le SAF (Sustainable Aviation Fuel) est présenté comme la voie de décarbonation prioritaire de l'aviation. Cette analyse calcule le niveau de mélange SAF nécessaire pour égaler les seules émissions CO₂ du GNL fossile — en ignorant délibérément les autres polluants où le GNL est structurellement supérieur.

2.1 Calcul du SAF nécessaire pour égaler le CO₂ du GNL fossile

Formule : $CO_2_blend = 995 \times (1 - X \times 0,80) = 625 \text{ t} \rightarrow X = 0,372/0,80 = 46,5 \%$ de SAF HEFA nécessaire

Filière SAF	Réduction CO ₂	% SAF nécessaire	CO ₂ résultant	Faisabilité 2030
HEFA (huiles usagées)	80 %	46,5 %	625 t	Impossible — feedstock limité
Fischer-Tropsch biomasse	70 %	53,1 %	625 t	Impossible — biomasse insuffisante
Power-to-liquid (H ₂ vert)	90 %	41,3 %	625 t	Impossible — élec. renouvelable insuffisante
SAF moyen réglementaire	65 %	57,2 %	625 t	Très difficile

Conclusion partielle : il faut 41 à 57 % de SAF dans le kérosène pour égaler uniquement le CO₂ du GNL fossile — et cela ne prend en compte ni les NOx, ni les particules, ni les contrails, sur lesquels le GNL fossile reste structurellement supérieur à n'importe quel niveau de SAF.

2.2 Pourquoi 50 % de SAF est physiquement impossible à l'horizon 2030–2040

- Production actuelle SAF (2025) : 1,9 Mt/an — soit 0,6 % de la consommation mondiale de kérosène (300 Mt/an). Source : EASA/IATA 2025.
- 50 % SAF mondial nécessiterait : 150 Mt/an — soit multiplier par 80 la production actuelle.
- Contrainte HEFA (huiles usagées) : la totalité des huiles de cuisson usagées mondiales (~6 Mt/an) transformées à 100 % en SAF représente seulement 3–4 % des besoins.
- Contrainte Power-to-Liquid : produire 150 Mt de PtL nécessite ~1 500–2 000 TWh d'électricité renouvelable supplémentaire — soit 18–25 % de toute la production renouvelable mondiale actuelle, rien que pour l'aviation.
- Contrainte économique : SAF = 3 à 5× le prix du kérosène. À 50 % de SAF, le coût carburant d'un Paris–New York passe de 280 000 € à 500 000–600 000 €.
- Signal industriel : le directeur général de l'IATA Willie Walsh a qualifié "hors d'atteinte" les objectifs EU SAF 2035. "Nous ne voyons pas de progrès dans la production de SAF." (Janvier 2026)

Le SAF à 50 % est une impossibilité physique, agricole et énergétique à l'horizon 2040 : pas assez de biomasse, pas assez d'électricité renouvelable, pas assez de capacité de production, et un coût prohibitif. Pendant ce temps, le GNL fossile fait mieux sur CO₂ qu'un kérosène à 50 % SAF — tout en réduisant NOx, particules et contrails — et coûte moins cher.

Partie 3 — Mélanges progressifs bio-GNL : la trajectoire optimale

Le bio-GNL est issu de la même filière que le bio-CH₄ du Programme Résilience (pyrogazification, méthanisation). Il est chimiquement identique au GNL fossile — les mêmes moteurs, les mêmes réservoirs, le même réseau de distribution. Seule l'origine change : biogénique vs fossile.

L'avantage décisif : les bénéfices environnementaux NOx/particules/contrails (liés à la chimie du méthane) sont constants quel que soit le pourcentage de bio-GNL. Seul le CO₂ évolue avec le mélange.

3.1 Tableau complet des mélanges bio-GNL — vol Paris–New York

% bio-GNL	CO ₂ (t)	vs kérosène	Équiv. SAF HEFA	NOx	Particules	Coût vs kérosène
0 % bio-GNL	625 t	-37 %	≈ 46 % SAF	-40 %	-70 %	-15 %
10 % bio-GNL	563 t	-43 %	≈ 54 % SAF	-40 %	-70 %	-13 %
20 % bio-GNL	500 t	-50 %	≈ 62 % SAF	-40 %	-70 %	-59 %
30 % bio-GNL	438 t	-56 %	≈ 70 % SAF	-40 %	-70 %	-58 %
40 % bio-GNL	375 t	-62 %	≈ 78 % SAF	-40 %	-70 %	-57 %
50 % bio-GNL	313 t	-69 %	≈ 86 % SAF	-40 %	-70 %	-56 %
70 % bio-GNL	188 t	-81 %	>100 % SAF	-40 %	-70 %	-53 %
100 % bio-GNL	0 t	-100 %	>100 % SAF	-40 %	-70 %	-49 %

NOx -40 % et Particules -70 % sont constants à tous les niveaux de mélange — ils dépendent de la chimie du méthane, pas de son origine biogénique ou fossile. Le biochar co-produit par pyrogazification n'est pas inclus dans ce tableau (bonus de séquestration supplémentaire).

3.2 L'argument du biochar — le bonus non comptabilisé

Si le bio-GNL est produit par pyrogazification (filière Programme Résilience), le biochar co-produit séquestre environ 1 à 2,5 tonnes de CO₂eq par tonne de bio-GNL. Sur un vol Paris–New York avec 50 % de bio-GNL :

- Bio-GNL utilisé : 227 t × 50 % = 113,5 t de bio-GNL
- Séquestration biochar (hypothèse conservatrice 1 t CO₂eq/t bio-GNL) : 113,5 t CO₂eq séquestrées
- CO₂ résiduel fossile : 312 t — CO₂ biochar séquestré : 113,5 t → Bilan net : ~200 t CO₂
- Soit -80 % vs kérosène — avec seulement 50 % de bio-GNL et le bonus biochar inclus

À 50 % de bio-GNL avec biochar, le vol Paris–New York approche la neutralité carbone (~200 t CO₂ net vs 995 t pour le kérosène, soit -80 %). C'est comparable à 100 % de SAF dans le kérosène — sans les contraintes de disponibilité, sans le coût prohibitif, et avec en plus les bénéfices NOx, particules et contrails que le SAF ne peut pas apporter.

Partie 4 — Trajectoire de déploiement et comparaison des trois voies

4.1 Comparaison stratégique des trois options de décarbonation aviation

Critère	Kérosène + SAF	GNL fossile → bio-GNL	H ₂ liquide -253°C
CO ₂ à horizon 2035	-10 à -15 % (6 % SAF EU)	-50 à -70 % (20-30 % bio-GNL)	Nécessite refonte avion totale
NOx	-1 à -5 % (marginal)	-40 % (structurel, dès jour 1)	-40 % (structurel)
Particules fines	-15 à -25 %	-70 % (structurel, dès jour 1)	-70 % (structurel)
Contrails	-5 à -15 %	-50 à -90 % (dès jour 1)	-50 à -90 %
Infrastructure	Réseau kéro existant	Réseau LNG maritime existant	Quasi inexistante
Progressivité	Contrainte biomasse ⚠	10 → 100 % sans changer l'avion ✓	Non progressive (refonte avion)
Coût carburant 2035	+30 à +100 % (SAF 20 %)	-15 % à +5 % (20 % bio-GNL)	Non défini (H ₂ vert coûteux)
Avion actuel compatible	Oui (drop-in)	Non (nouveau moteur + réservoirs fuselage) — le "dès maintenant" de la Partie 1 s'applique à la disponibilité du carburant et à la chimie de combustion, pas à la cellule avion	Non (refonte complète)
Faisabilité 2030	Très partielle (0,6 % production)	Oui (GNL fossile immédiat)	Non (2040+ minimum)
Verdict 2035	Insuffisant	Solution optimale	Prématuré

4.2 Trajectoire de déploiement GNL → bio-GNL (Programme Résilience)

Période	Mix carburant	CO ₂ vs kérosène	Coût vs kérosène	Conditions
Dès maintenant (carburant et chimie combustion)	100 % GNL fossile	-37 %	-15 %	Infrastructure LNG maritime existante — décision industrielle et réglementaire EASA
2028-2032	GNL + 10-20 % bio-GNL	-44 à -50 %	-12 à -10 %	Déploiement Phase 1 Résilience — premiers sites pyrogazification
2032-2038	GNL + 20-50 % bio-GNL	-50 à -69 %	-10 à 0 %	Montée en puissance Résilience — 50+ sites actifs
2038-2045	GNL + 50-100 % bio-GNL	-69 à -99 %	0 à +5 %	Résilience à maturité — 150 sites — bilan quasi-nul à négatif avec biochar
2045+	100 % bio-GNL + biochar	Négatif (-120 %)	< +10 %	Bilan cycle de vie négatif certifié — aviation la plus propre au monde

4.3 Synthèse — le message aux décideurs

- Le GNL fossile dès aujourd'hui fait mieux sur tous les polluants (CO₂ -37 %, NOx -40 %, particules -70 %, contrails -50/90 %) qu'un kérosène avec 50 % de SAF — qui est lui-même physiquement impossible à produire à cette échelle.
- Le SAF ne peut résoudre que le CO₂ — et seulement partiellement. Il ne touche pas structurellement aux NOx, particules fines et contrails qui représentent ensemble plus de 50 % du forçage radiatif de l'aviation sur 20 ans.
- Le mélange progressif bio-GNL permet de passer de -37 % à -99 % de CO₂ en augmentant simplement le pourcentage biogénique dans le carburant — sans changer l'avion, sans changer le réseau, sans modifier les procédures.
- À 50 % de bio-GNL avec biochar (filière pyrogazification Résilience), le vol Paris-New York approche la neutralité carbone nette — un résultat qu'aucune autre solution n'atteint à horizon 2040.
- La fenêtre de décision est 2026-2028 : si le consortium industriel (Airbus + Rolls-Royce + compagnies) est lancé maintenant, le premier vol commercial GNL est possible en 2032-2035. Attendre consolide la position de l'hydrogène liquide — dont les contraintes physiques sont pourtant réhibitoires pour l'aviation longue distance avant 2040.

Message final : la question n'est pas de savoir si le bio-GNL peut décarboner l'aviation — il peut, plus efficacement et moins cher que toute autre solution disponible. La question est de décider si l'Europe veut construire cette filière (Airbus +

Résilience) ou continuer à financer des solutions incomplètes (SAF) et physiquement bloquées (H₂ liquide). La France a les ressources biologiques, le réseau gazier et les industriels aéronautiques pour être pionnière de cette transition. Le Programme Résilience V11 en fournit le carburant.

Sources : Note technique Aviation Programme Résilience V11 · NIST Methane Properties · IATA SAF Report 2025 · EASA Production SAF 2024 · Rolls-Royce R&D GNL 2023 · IPCC AR6 contrails forçage radiatif · Transport & Environment SAF Europe 2024 · Archives Tupolev Tu-156 GNL programme 1996–1999 · SpaceX Raptor (méthane liquide) · ArianeGroup Prométhée (méthane) · Blue Origin BE-4 (méthane) — la cryogénie méthane est devenue standard dans les systèmes à haute performance