PROGRAMME RÉSILIENCE V11

Aviation Méthane — Synthèse comparative

Kérosène + SAF vs GNL fossile → Bio-GNL

Long-courrier · Moyen-courrier · Retrofit · Avion neuf

Version 3.2 — Novembre 2026 — Programme Résilience V11

Convention ⚠️ systématique · configuration de référence pour étude de faisabilité · contrails formulés avec prudence · hypothèses TCO explicitées · rendement global mis en avant · comparaison au kérosène + SAF de la trajectoire ReFuelEU · tableau des mélanges progressifs bio-GNL

---

0. Convention de lecture — statut des données

Principe fondamental de ce document : distinguer ce qui est établi, ce qui est un objectif de conception, et ce qui est une estimation à confirmer. Cette distinction est la garantie de crédibilité face à des interlocuteurs industriels.

Statut	Signification
Sans ⚠️	Propriété physique établie (NIST, données constructeurs vérifiables, lois thermodynamiques) ou précédent industriel documenté
⚠️ Objectif	Objectif de conception basé sur calcul thermodynamique ou estimation d'ingénierie. Confirmation requise sur démonstrateur moteur ou calcul structurel complet.
⚠️ Estimation	Estimation de dimensionnement. Confirmation requise par calcul structurel complet intégrant toutes les contraintes (flexion, torsion, crashworthiness, certification feu, volets, systèmes).

Message central : "Voici une architecture techniquement cohérente, dimensionnée avec des technologies existantes ou extrapolables, qui mérite immédiatement une étude de faisabilité industrielle et un démonstrateur." C'est plus fort que de prétendre que tout est déjà prouvé.

Doctrine ⚠️ — À lire avant tout autre paragraphe

Les valeurs marquées ⚠️ ne signifient pas que le concept correspondant est spéculatif. Elles identifient les performances ou dimensions qui doivent être déterminées et optimisées par les études d'ingénierie. Les architectures proposées s'appuient sur des phénomènes physiques établis, des technologies existantes ou des réalisations comparables. L'objectif des études est de dimensionner, optimiser et qualifier leur intégration dans la configuration Résilience — et non de vérifier a priori si les principes physiques qui les sous-tendent sont réalisables.

En pratique, ⚠️ peut signifier selon le cas : dimensionnement à préciser · optimisation à conduire · qualification à réaliser · certification à obtenir · industrialisation à planifier. Il ne signifie jamais « le principe physique est en doute ».

1. Positionnement — le défi climatique de l'aviation

L'aviation représente ~2,5 % des émissions mondiales de CO_2, mais ~3,5–4,7 % du forçage radiatif total en intégrant contrails + NOx + PM haute altitude (Lee et al. 2021, IPCC AR6). Les contrails représentent plus de la moitié du forçage de l'aviation (~55 %) — plus que le CO_2 seul (~35 %).

Le paradoxe du verrouillage : les avions commandés aujourd'hui seront en service jusqu'en 2050–2055. Une grande partie de la flotte actuelle (~25 000 appareils) volera encore en 2040. La question centrale n'est donc pas seulement "quel avion neuf construire" — c'est aussi "que faire de la flotte existante" : revamper les cellules jeunes, et décarboner le reste par le SAF jusqu'à leur retrait.

La réponse Résilience : les avions neufs conçus pour le GNL constituent la voie de référence. Pour les cellules jeunes (moins de ~10–12 ans), un revamping lourd — nouvelles ailes composites ovoïdes à réservoirs intégrés et moteurs méthane, fuselage conservé — est la configuration de référence retenue pour l'étude de faisabilité ⚠️ ; les cellules plus anciennes volent au kérosène + SAF jusqu'à leur retrait. La transition GNL fossile → bio-GNL est progressive sur le même avion, le même réseau. La flotte récente n'est pas condamnée.

2. Bilan environnemental comparé — vol Paris–New York

Critère / vol Paris–NY	Kérosène pur	Kéro + 40–45 % SAF	GNL fossile	Bio-GNL 50% +biochar
CO_2 (t/vol)	**~215 t (échappement) · ~262 t (ACV)**	~175 t ACV −34 %	**~135 t −37 % (échappement) · ~170–185 t ACV**	**~50–70 t ACV −75/80 %**
NOx (kg/vol)	1 200 kg	1 200 kg (inchangé)	**720 kg −40 %**	**720 kg −40 %**
Particules fines (kg/vol)	Référence	−15/25 %	**−70 % (estimé)**	**−70 % (estimé)**
Traînées de condensation (contrails)	Forçage élevé	Très légèrement réduit	**Susceptible −50–90 % ⚠️**	**Susceptible −50–90 % ⚠️**
Coût carburant vol	~44–65 k€	**~70–145 k€ (+60 à +120 %)**	~27–41 k€ (~−38 %)	**~50–70 k€ (~+10 %)**
Forçage radiatif total (Lee et al. 2021)	**100 % référence**	~85–90 % (CO_2 surtout réduit)	**~30–55 % ⚠️**	**~20–45 % ⚠️**

> *Contrails — formulation retenue : le méthane est susceptible de réduire fortement les émissions de particules et les propriétés favorisant la formation des traînées de condensation, sous réserve des conditions de combustion, de vol, d'altitude et de composition du carburant. La réduction est structurelle (méthane sans soufre ni aromatiques → moins de noyaux de condensation) mais dépend des conditions atmosphériques. Les −50–90 % sont un ordre de grandeur issu des études sur la réduction des suies — non une garantie par vol.*

> *Le SAF ne réduit pas les contrails de façon comparable car la chimie du carburant reste celle d'une longue chaîne carbonée produisant des suies — noyaux de condensation persistants. C'est le différenciateur climatique fondamental entre SAF et méthane.*

3. Disponibilité et contraintes — SAF vs GNL/bio-GNL

Paramètre	SAF ~40–45 % dans kérosène	GNL fossile → bio-GNL
Production mondiale 2025	1,9 Mt/an = 0,6 % du kérosène mondial	GNL maritime : 400 Mt/an — infrastructure existante
Production nécessaire pour ~45 % de la flotte mondiale	**~135 Mt/an = ~×70 la production actuelle — hors de portée avant 2040**	Adaptation progressive — filière Résilience déployable 2028–2032
Coût vs kérosène	+60 à +120 % (SAF à 2,5–4 × le kérosène)	GNL fossile : ~−35 à −40 % / Bio-GNL : ~2 × moins cher que le SAF à part renouvelable égale
Traite NOx + PM + contrails	**NON — chimie kérosène inchangée**	**OUI — structurel, lié à la chimie CH_4 (méthane sans soufre ni aromatiques)**
Trajectoire réglementaire et position de l'IATA	*ReFuelEU : 20 % de SAF en 2035, 42 % en 2045 — objectifs jugés difficilement atteignables par l'IATA*	GNL fossile existant — bio-GNL filière industrialisable 2028+

Chiffres clés IATA 2025 : *production mondiale SAF = 0,6 % du kérosène consommé. Pour ~45 % de SAF sur la flotte mondiale : ~×70 la production actuelle — hors de portée à horizon 2040. La trajectoire ReFuelEU n'atteint 42 % qu'en 2045.*

4. Hypothèses économiques du TCO — Page dédiée

Principe : le TCO est l'argument le plus puissant et le plus attaquable. La page d'hypothèses ci-dessous permet à tout lecteur de refaire le calcul et d'en tester la sensibilité. La comparaison se fait filière contre filière, à part renouvelable égale (40 %). Le résultat est robuste dans la plupart des scénarios — mais certaines hypothèses (investissement de revamping ⚠️, tarification carbone des vols long-courriers ⚠️) doivent être confirmées avant diffusion à des industriels.

Hypothèse économique	Valeur retenue	Base / Source / Sensibilité
Prix kérosène Jet-A1	0,80 €/kg (700 €/t)	Moyenne marché 2023–2025. Sensibilité ±20 % : impact ±83 M€/20 ans/avion
Prix SAF (blend 40 %)	SAF 2,0–3,2 €/kg → mélange 1,28–1,76 €/kg	60 % kérosène 0,80 + 40 % SAF à 2,5–4 × le kérosène (valeur centrale 2,6 €/kg). Sensibilité SAF ±1 €/kg : impact ±208 M€
Prix GNL fossile	0,68 €/kg (0,56–0,83)	Prix GNL Europe (0,04–0,06 €/kWh). Sensibilité ±15 % : impact ±25 M€
Prix bio-GNL (filière Résilience)	1,5–2,0 €/kg (0,11–0,14 €/kWh)	Coût de production filière (référentiel Matrice V10). Sensibilité ±0,20 €/kg : impact ±30 M€ à 40 % de bio-GNL
Heures de vol annuelles	4 000 h/an	Utilisation long-courrier standard (ratio IATA 2023)
Consommation annuelle kérosène	26 000 t/an	A330-200 à 6,5 t/h × 4 000 h
Consommation GNL estimée ⚠️	~18 700 t/an	−28 % en masse : PCI +16 % (établi) + rendement du cycle méthane ⚠️ (objectif, moteurs neufs du revamping)
Tarification carbone (EU ETS ; vols long-courriers aujourd'hui sous CORSIA) ⚠️	Trajectoire 65 € (2026) → 150 € (2032) → 220 € (2040)	Projection Commission Européenne, supposée étendue aux vols long-courriers. Très haute sensibilité : ±50 €/t CO_2 = ±82 M€/20 ans/avion (kérosène)
Durée d'exploitation retenue	20 ans	Durée de vie résiduelle flotte actuelle A330. Taux d'actualisation : 0 % (valeurs nominales non actualisées)
Coût maintenance (moteurs + cellule)	~4–6 M€/an	Ordre de grandeur long-courrier (~1 000–1 500 € par heure de vol). Pris identique dans les trois scénarios (hypothèse prudente)
Gain maintenance GNL ⚠️	Non comptabilisé	Moins de suies, combustion plus propre : gain possible, à établir en service.
Investissement revamping (moteurs méthane + aile à réservoirs)	~50–100 M€/avion ⚠️	Ordre de grandeur à établir par l'étude de faisabilité. Réservé aux cellules de moins de ~10–12 ans (Segment ④ V8.2 §3ter).
Développement du programme ailes ⚠️	À établir	Programme mené avec le constructeur, mutualisé sur la flotte revampée (200+ avions). Étude de faisabilité Phase 0.
Valeur résiduelle à 20 ans	Non comptabilisée	Avion GNL potentiellement plus valorisable en 2046 (réglementation carbone) — non intégré dans TCO pour rester conservateur
RÉSULTAT TCO — kérosène pur	**~760 M€ / 20 ans**	Basé sur hypothèses ci-dessus — reproductible
RÉSULTAT TCO — kéro + 40 % SAF	**~1 040 M€ / 20 ans**	Idem + surcoût SAF (fourchette ~910–1 160 M€)
RÉSULTAT TCO — GNL + 40 % bio-GNL (revamping) ⚠️	**~575–800 M€ / 20 ans**	Intègre prix bio-GNL et investissement de revamping ⚠️ — valeur centrale ~680 M€

> **⚠️ Deux hypothèses conditionnent fortement le résultat TCO : (1) l'investissement de revamping (~50–100 M€ par avion) — ordre de grandeur à établir ; (2) la tarification carbone des vols long-courriers. Dans un scénario défavorable (investissement 100 M€, prix haut du GNL et du bio-GNL), le TCO GNL + 40 % bio reste nettement inférieur au kérosène + 40 % SAF et équivaut à peu près au kérosène pur. Un gain de maintenance, non compté ici, améliorerait le résultat.**

5. TCO synthèse — A330-200 sur 20 ans

Poste TCO 20 ans — A330-200	Kérosène pur	Kéro + 40 % SAF	GNL + 40 % bio-GNL (revamping) ⚠️
Carburant 20 ans	~416 M€	**~790 M€ +90 %**	**~350–485 M€** ⚠️
Maintenance moteurs 20 ans	~100 M€	~100 M€	~100 M€ (gain possible non compté ⚠️)
Tarification carbone (trajectoire croissante) ⚠️	~245 M€	~150 M€	**~95 M€ (60 % fossile)**
ETS étendu contrails (si intégré)	Non chiffré	Non chiffré	Réduit ⚠️ (contrails réduits)
Investissement retrofit + ailes ⚠️	0 €	0 €	~50–100 M€ ⚠️ (ordre de grandeur)
TOTAL (hors contrails) ⚠️	**~760 M€**	**~1 040 M€ +37 %**	**~575–800 M€ (−25 à −45 % vs kéro + SAF)** ⚠️
TOTAL avec ETS étendu ⚠️	**À établir**	**À établir**	**À établir**
ROI investissement retrofit ⚠️	—	—	~3–5 ans vs kérosène + 40 % SAF ⚠️

Résultat qui résiste aux hypothèses : le kérosène + 40 % SAF est le scénario le plus cher dans tous les cas de figure, même avec un investissement de revamping élevé et un bio-GNL au haut de sa fourchette de prix. C'est l'argument TCO le plus solide du document.

6. Configuration de référence — Ailes composites ovoïdes GNL

Formulation retenue : "configuration de référence retenue pour l'étude de faisabilité" ⚠️. Le concept est techniquement cohérent et mérite une étude de faisabilité immédiate — mais plusieurs contraintes restent à confirmer par calcul structurel complet.

Logique de la séquence : (1) les caissons de voilure actuels ne peuvent pas recevoir de GNL — remplacement des ailes (et des moteurs) · (2) puisqu'on change les ailes, adopter la géométrie ovoïde composite · (3) le composite carbone est un bien meilleur isolant que l'aluminium (conductivité environ cent fois plus faible) — propriété physique établie · (4) les ailes ovoïdes couvrent ~85–95 % du besoin ⚠️ · (5) le résidu va en mini-soute arrière — modification fuselage minimale · (6) bilan ailes + carburant estimé −11 à −23 t ⚠️ — à confirmer par calcul structurel complet intégrant flexion, torsion, crashworthiness, volets, certification feu.

Configuration stockage GNL	Volume ⚠️	% besoin Paris-NY ⚠️	Modif. fuselage	Bilan masse ⚠️
Fuselage seul (concept initial)	Partiel	~60–70 %	MAJEURE	Neutre
Ailes ovoïdes 19 % seules	~110–120 m³	**~85–95 %**	**NULLE (ailes remplacées)**	−11 à −23 t ⚠️ estim. (ailes + carburant)
Ailes ovoïdes 19 % + mini-soute ★★ RÉFÉRENCE	**~125–135 m³**	**~100 % + marge**	**Minimale**	−11 à −23 t ⚠️ estim. (ailes + carburant)

> ⚠️ **Le bilan ailes + carburant (−11 à −23 t, dont ~−19 t de carburant) est une estimation de dimensionnement. Contraintes à intégrer dans l'étude de faisabilité Phase 0 : reprise des efforts de flexion/torsion en vol, crashworthiness, cycles thermiques cryogéniques sur 20 000 vols, intégration systèmes hydrauliques/électriques, volets et hypersustentateurs, protection foudre, certification feu, réparabilité, vieillissement composite, masse réelle des réservoirs et de l'isolation. Un calcul structurel complet est indispensable avant de valider ce chiffre.**

7. Rendement global — argument central pour les décideurs

Deux métriques à distinguer : le rendement thermique cycle (47–51 % ⚠️) est le chiffre des ingénieurs moteur. Le rendement global turbofan (34–37 % ⚠️ vs 29–31 % kérosène) est le chiffre des décideurs. C'est ce dernier qui détermine la consommation et les coûts.

Métrique	Kérosène actuel	Turbofan méthane ⚠️
PCI massique (propriété physique — ÉTABLI)	43 MJ/kg	**50 MJ/kg (+16 %)**
Rendement thermique cycle ⚠️ (objectif)	42–44 %	47–51 % ⚠️ (+5–7 pts)
Rendement global (thermique × propulsif) ⚠️	~29–31 %	**~34–37 % ⚠️ (+5–8 pts, +17–27 %)**
Consommation massique / vol Paris-NY	~68 t kérosène	**~49 t GNL ⚠️ (−28 % total)**
Dont gain PCI (ÉTABLI)	—	−9,5 t (−14 %)
Dont gain rendement ⚠️ (objectif)	—	~−9,5 t (−14 % supplémentaires) ⚠️
CO_2/vol (GNL fossile)	**~215 t**	**~135 t (−37 %)**

> *Le rendement global 34–37 % ⚠️ est un objectif de conception basé sur calcul thermodynamique. Confirmation requise sur démonstrateur moteur — programme Phase 1 Safran/Rolls-Royce prévu 2026–2028. En attendant : seul le gain PCI (−14 % de masse de carburant à rendement égal) est une propriété physique établie et défendable immédiatement.*

8. Le GNL ne condamne pas la flotte actuelle

Argument central : le passage au GNL n'implique ni mise à la retraite anticipée de la flotte récente, ni construction d'une infrastructure entièrement nouvelle. La transition est progressive et sans rupture : même avion (après revamping ailes + moteurs ⚠️, cellules jeunes), même réseau de distribution cryogénique (GNL maritime existant), carburant qui change progressivement de GNL fossile vers bio-GNL.

Scénario	Flotte 2026	Horizon réaliste	Réduction forçage radiatif ⚠️
Statu quo kérosène + SAF (ReFuelEU)	~94 % kérosène en 2030	SAF 20 % en 2035 (ReFuelEU)	**~−5 à −10 % (CO_2 −15 %, contrails peu touchés)**
GNL fossile revamping des cellules jeunes	Cellules de moins de ~10–12 ans ⚠️	~2032–2035 premiers certifiés ⚠️	**−35 à −40 % sur appareils convertis** ⚠️
GNL fossile → Bio-GNL progressif	Même avion, même réseau	Bio-GNL 20 % en 2035, 50 % en 2040 ⚠️	**−50 à −95 % en 2045 ⚠️ (bilan net négatif avec biochar et CO_2 biogénique stocké)**
H_2 liquide (concurrent)	0 avion CS-25 certifié avant 2038–2040	Volume réservoirs ×4 vs GNL	**Nul sur flotte existante 2026–2040**

La réponse à l'objection "pas assez de bio-GNL demain" : "Ce n'est pas nécessaire. Le revamping est une architecture durable — le contenu fossile décroît progressivement. GNL fossile dès la mise en service (infrastructure existante) → montée bio-GNL via filière Résilience → bilan carbone négatif avec biochar et CO_2 biogénique concentré stocké à horizon 2045. Aucun autre vecteur ne combine ce triptyque."

> *GNL fossile dès la mise en service = −37 % de CO_2 à l'échappement + NOx −40 % + PM −70 % + contrails susceptibles −50–90 % ⚠️ : sur le CO_2, c'est l'équivalent d'un kérosène à ~40–45 % de SAF, et c'est nettement mieux sur le bilan climatique complet (forçage radiatif total), pour un coût inférieur. La transition vers le bio-GNL améliore progressivement le bilan carbone sans changer l'avion ni le réseau.*

9. Trajectoire de décarbonation 2026–2050

Voie	2030	2035	2040	2050
Kérosène pur	−0 %	−3 %	−8 %	−15 %
Kéro + SAF (trajectoire ReFuelEU)	−5 %	−15 %	−25 %	−55 %
GNL fossile revamping ailes ovoïdes ★	— (développement)	−37 % (premiers appareils)	−37 %	−37 % (avant bio)
GNL → Bio-GNL progressif ★★	— (développement)	−33 à −45 % (ACV)	−45 à −64 % (ACV)	**Bilan net négatif ⚠️ (100% bio + biochar et CO_2 biogénique stocké)**
Avion neuf méthane CS-25	—	Premiers vols ⚠️	Déploiement partiel	~20 % flotte mondiale ⚠️
H_2 liquide CS-25	—	—	Prématuré	Contraintes physiques permanentes longue distance

Le verrouillage technologique : sans programme lancé en 2026–2028, ni avion neuf ni revamping ne seront disponibles avant 2040, et la flotte volera au kérosène + SAF. Le SAF à 20 % en 2035 (ReFuelEU) ne réduit le forçage radiatif total que de ~5–10 % — parce que les contrails et NOx (environ les deux tiers du forçage) ne sont pas touchés. L'aviation reste alors la principale source d'émissions non résolues en 2050.

9 bis. Mélanges progressifs GNL fossile → bio-GNL — vol Paris–New York

Le levier de la montée en bio : le bio-GNL est chimiquement identique au GNL fossile — mêmes moteurs, mêmes réservoirs, même réseau. Seule l'origine change. Les bénéfices NOx et particules, liés à la chimie du méthane, sont constants quel que soit le mélange ; seul le CO_2 évolue avec la part bio.

% bio-GNL	CO_2 ACV (t) ⚠️	vs kérosène (262 t)	Équiv. SAF (80 %)	NOx	Particules	Coût vs kéro + SAF de même CO_2
0 % (GNL fossile)	~176 t	−33 %	≈ 41 % SAF	−40 %	−70 %	~−65 %
10 %	~160 t	−39 %	≈ 49 % SAF	−40 %	−70 %	~−65 %
20 %	~143 t	−45 %	≈ 57 % SAF	−40 %	−70 %	~−65 %
30 %	~127 t	−52 %	≈ 64 % SAF	−40 %	−70 %	~−60 %
40 %	~110 t	−58 %	≈ 72 % SAF	−40 %	−70 %	~−60 %
50 %	~94 t	−64 %	≈ 80 % SAF	−40 %	−70 %	~−60 %
70 %	~61 t	−77 %	≈ 96 % SAF	−40 %	−70 %	~−60 %
100 %	~12 t	−95 %	Au-delà de 100 % SAF	−40 %	−70 %	~−50 % (vs 100 % SAF)

CO_2 en cycle de vie : GNL fossile compté à ~3,5–3,75 kg CO_2 éq./kg (amont compris, fuites ≤ 1 %), bio-GNL à ~0,25 kg/kg (amont seul), kérosène ~3,85 kg/kg. ⚠️ La masse de GNL (~49 t) intègre le gain de rendement du turbofan méthane, objectif à confirmer (§ 7) ; à rendement égal, la ligne GNL fossile équivaut à ~30–35 % de SAF. Coût : SAF à ~3 fois le prix du kérosène ; par rapport au kérosène fossile seul, le coût va de ~−38 % (GNL fossile) à ~+60 % (100 % bio-GNL). Biochar et CO_2 biogénique concentré stocké non inclus : à 50 % de bio-GNL, le biochar seul porte le bilan à ~50–70 t, soit −73 à −82 % (§ 2).

Lecture : dès 20 % de bio-GNL, le vol fait mieux qu'un kérosène à plus de 50 % de SAF, niveau que ReFuelEU n'atteint pas avant 2050. Le SAF reste utile en relais pour la flotte existante ; la montée en bio-GNL dans les mêmes avions porte la décarbonation de long terme, sans plafond de ressource comparable.

10. Long-courrier vs moyen-courrier — architectures distinctes

Règle GNL vs GNV : GNL −162°C au-delà de ~500 km (moyen- et long-courrier, A321/A330/A350) · GNV 250 bar pour les missions courtes (≤ 400–500 km, régional ATR-72). Cette règle détermine les coûts d'infrastructure aéroport.

Long-courrier : turbofan méthane ⚠️ · rendement global 34–37 % ⚠️ · bénéfice contrails maximal à FL350+ · ailes ovoïdes composites + mini-soute · avion neuf ou revamping des cellules jeunes 2032–2035 ⚠️

Régional (segment ③ ÉREV ATR-72) : GNV 250 bar jusqu'à ~500 km · hélices électriques, groupes Atkinson · rendement chaîne ~38–39 % ⚠️ · bénéfice contrails moindre (basse altitude) · NOx −40 % et PM −70 % entiers

Avion d'affaires (Beyond Aero H2 vs segment ② 15 places méthane) : même catégorie de vitesse (hélices électriques ~450–500 km/h) · marchés distincts · coût carburant H_2 vert liquéfié ~0,20–0,45 €/kWh (6–15 €/kg) vs bio-GNL 0,11–0,14 €/kWh ⚠️ — facteur ~2–3× en faveur du méthane

11. Intégration biomasse Résilience

Prélèvement aviation limité : 12–20 TWh sur 164–225 TWh de production Résilience = 7–12 % du total. La filière terrestre ÉREV reçoit 88–93 % restants. L'aviation est un utilisateur spécialisé du bio-GNL — pas un concurrent de la mobilité terrestre.

Synergie filière : la même infrastructure cryogénique dessert camions ET aéroports. Le CO_2 biogénique concentré en sortie de méthaniseur est la matière première du SAF PtL (si nécessaire pour des routes spécifiques) ; non utilisé, il peut être stocké. Avec le biochar co-produit, ce sont deux voies d'émissions négatives qui compensent le carbone issu de l'aviation.

Synthèse décideurs — Tableau final

Critère décideur	Kérosène pur	Kéro + SAF	GNL fossile revamping	Bio-GNL Résilience ailes ovoïdes
Réduction CO_2 usage	0 %	−15 % (2035) à −25 % (2040)	−37 % (échappement)	**Bilan net négatif ⚠️ (100% bio + biochar et CO_2 biogénique stocké)**
NOx + PM + contrails	0 %	Marginal	**−40/−70/susceptible −50→90 % ⚠️**	**idem**
Coût carburant / vol	Référence	**+60 à +120 % (40–45 % SAF)**	~−35 à −40 %	**~2 × moins cher que kérosène + SAF à part renouvelable égale**
Taxe ETS 2030+	Lourde et croissante	Allégée mais croissante	Très allégée	**Nulle (0 t CO_2 fossile)**
Flotte actuelle condamnée ?	Non (polluante)	Non (coûteuse)	**NON pour les cellules jeunes — revamping ailes + moteurs ⚠️**	**NON — même avion, carburant change progressivement**
TCO 20 ans / A330 ⚠️	~760 M€	**~1 040 M€ +37 %**	~510–660 M€ ⚠️	**~575–800 M€ ⚠️ (40 % bio)**
Statut des chiffres	Établi	Établi	Partiellement ⚠️	Objectifs de conception ⚠️ — étude de faisabilité requise
VERDICT	**Statu quo insoutenable**	**Le + cher · insuffisant climatiquement**	**Transition immédiate crédible**	**Architecture cohérente méritant étude de faisabilité industrielle et démonstrateur**

La France dispose de tout ce qu'il faut pour décarboner son aviation longue distance à partir de 2032–2035 , sans condamner la flotte récente.

La prochaine étape est une étude de faisabilité industrielle — pas un démonstrateur complet.

> *“Résilience ne vous demande pas de croire à une technologie hypothétique. Nous vous proposons une architecture construite à partir de briques connues, dont certaines sont déjà utilisées dans d’autres applications. Les études proposées ont pour objet de calculer précisément, optimiser et qualifier leur intégration afin de transformer cette architecture cohérente en solution industrielle.”*

Sources et références

Programme Résilience V11 (septembre 2026) · Aviation Bio-GNL Synthèse V11.1 · Note Aviation V11.1 · Segment ④Long-courrier V8.2 · Matrice gamme V10 · Apport Titane V5 · NIST Methane Properties · IATA SAF Report 2025 · EASA Production SAF 2024 · Règlement ReFuelEU Aviation (UE 2023/2405) · IPCC AR6 WG1 — Lee et al. 2021 (contrails) · Tupolev Tu-155 (vols GNL 1989–1991) · Rolls-Royce R&D GNL 2023 · Airbus Sharklets STC A320 (précédent) · EBC / Puro.earth (biochar) · Transport & Environment SAF Europe 2024 · GIIGNL 2023