

AVIATION MÉTHANE — SEGMENT ④

Avion long-courrier turbofan méthane Bio-GNL

Document technique — Programme Résilience V11

Juillet 2026 — Document de travail interne

Ce document couvre exclusivement le segment ④ long-courrier. Pour le dénominateur commun de la gamme (bilan climatique, filière Résilience, comparaison SAF/H₂), se référer à la Matrice de famille ÉREV Atkinson Méthane V8.

→ Matrice de famille Aviation Méthane ÉREV Atkinson — Gamme VTOL → Long-courrier V8

1. Positionnement dans la gamme

Le segment ④ est le seul de la gamme qui ne repose pas sur la traction électrique comme propulsion principale. Le turbofan méthane assure 100 % de la poussée propulsive. Le prolongateur ÉREV Atkinson pistons est un complément fonctionnel embarqué — APU intelligent, alimentation systèmes, RAT de nouvelle génération.

Critère	Segment ④ Long-courrier	Segments ①②③ (référence)
Propulsion principale	Turbofan méthane à sur-détente optimisée (poussée directe, cycle Brayton méthane)	Traction 100 % électrique (hélices ou rotors électriques)
Rôle ÉREV Atkinson pistons	Complément fonctionnel : • APU intelligent (électricité vol/sol) • RAT de nouvelle génération • Reliquéfaction boil-off (Stirling) • Inertage réservoirs (CO ₂ échappement)	Propulsion principale (générateur → moteurs électriques)
Portée	> 8 000 km (ex. Paris–New York) Sydney–Londres direct débloqué	< 1 500 km (segments ①②③)
Carburant	GNL –162°C (réservoirs fuselage cryogéniques) → Bio-GNL progressif filière Résilience	GNL –162°C ou GNV 250 bar selon portée (règle 800 km)
Rendement propulsion	44–48 % (turbofan méthane à sur-détente) ≠ 52–55 % pistons Atkinson ①②③ (turbomachine ≠ moteur à pistons)	47–50 % chaîne complète (Atkinson pistons 52–55 % × génératrice 96 % × moteur élec. 94 %)
Avantage décisif vs kérosène	• CO ₂ –37 % (GNL fossile) → –81 % (50% bio+biochar) • NO _x –40 % / PM –70 % / contrails –50 à –90 % • Valorisation froid cryogénique 320–460 kW gratuits • Bilan carbone négatif possible (bio-GNL + biochar)	Voir Matrice famille V8 §3 pour bilan climatique commun

2. Turbofan méthane à sur-détente optimisée — Origine du gain de rendement

Le gain de rendement 44–48 % vs 42–44 % pour un turbofan kérosène classique repose sur trois mécanismes thermodynamiques combinés, tous liés aux propriétés physiques du méthane liquide (–162°C, PCI 50 MJ/kg).

Mécanisme	Description thermodynamique	Contribution au gain rendement	Source
1. PCI massique supérieur	CH ₄ : 50 MJ/kg vs kérosène : 43 MJ/kg (+16 %). À énergie utile égale, 16 % de masse carburant économisée. Ratio H/C = 4:1 vs 2:1 pour kérosène → moins de CO ₂ par MJ.	+16 % masse carburant économisée	NIST CH ₄ Note Résilience V11
2. Puits froid cryogénique (intercooling)	GNL stocké à –162°C utilisé comme dissipateur thermique. Refroidit l'air en sortie compresseur HP (de 650°C à ~150°C) via échangeur CCA. Réduit le travail de compression (W _c). Permet d'augmenter TIT sans dégrader la métallurgie des aubes.	+14 à +16 % rendement cycle	Brayton cycle optimisé méthane
3. Sur-détente et récupération enthalpique	GNL pompé à 40–50 bar (liquide → compression quasi-gratuite) puis surchauffé à +450°C via échangeur tuyère (gaz d'échappement BP à 550–650°C). Turbine BP étendue : étages supplémentaires convertissent l'enthalpie résiduelle en travail mécanique jusqu'à pression ambiante.	+14 à +16 % rendement cycle	Cycle Humphrey\nrégénératif
TOTAL rendement\nturbofan méthane	Cycle Brayton kérosène : 40–42 % (rendement thermique). GNL + précooling passif : rendement propulsif global 28–31 % (vs 24–26 % kérosène). Gain estimé +19 % — calcul thermodynamique, non encore confirmé sur banc moteur. Distinct des 52–55 % pistons Atkinson ①②③ (turbomachine ≠ pistons). Source : Note Aviation Résilience V11 + Rolls-Royce R&D 2023.	Rdt propulsif global (Note V11 §2): GNL seul : 26–28 % GNL + précooling passif : 28–31 % vs kérosène : 24–26 % +19 % estimé (à valider)	Note Aviation\nRésilience V11\nRolls-Royce 2023

Masse carburant Paris–NY : GNL 227 t vs kérosène 316 t (–28 % masse carburant). Volume réservoirs GNL : ~538 m³ (+36 % vs kérosène ~395 m³) — contrainte architecturale réelle mais gérable. La pénalité masse réservoirs cryogéniques (+9 t vides vs kérosène) est largement compensée par la réduction carburant (–89 t) : masse totale embarquée inférieure de ~80 t. Source : Note technique Aviation Résilience V11, mai 2026.

3. Réservoirs cryogéniques — Spécifications et innovations

La configuration retenue (70 % fuselage arrière + 30 % ailes intégrées) résout simultanément le problème de centrage, l'éloignement du carburant du cockpit et le renforcement structural du fuselage.

Paramètre	Valeur / Spécification	Justification technique
Configuration	70 % fuselage arrière 30 % ailes intégrées	Stabilité CG + distribution masse. Fuselage arrière éloigne le carburant du cockpit et de la zone passagers. Configuration 70/30 maintient CG dans enveloppe autorisée.
Température stockage	–162°C (légèrement surpressé 1–3 bar)	Point d'ébullition méthane à pression atmosphérique. Légère surpression limite le boil-off.

Paramètre	Valeur / Spécification	Justification technique
Isolation thermique	Multicouche sous vide (MLI) + mousse polyuréthane Épaisseur : 150–200 mm Conduc. < 0,02 W/m·K	Masse réservoirs vides : ~15 % masse GNL (vs 5 % pour réservoirs kérosène). Surcoût masse compensé par légèreté du GNL vs kérosène.
Matériaux	Aluminium 5083 ou composite carbone/époxy	Tenue cryogénique. Plus rigides que réservoirs d'aile kérosène → renforcent structure fuselage (effet colonne vertébrale). En cas de crash, restent dans structure renforcée vs réservoirs d'aile kérosène qui se brisent.
Boil-off en vol (10h)	0,125 % (125 kg sur 100 t)	Négligeable — 100 % valorisé par le prolongateur E-REV Atkinson (boil-off = carburant APU).
Boil-off au sol (24h)	0,5 % / jour (~47,5 kg/h)	100 % valorisé : prolongateur Atkinson (1,2 kg/h) + groupe froid Stirling (reliquéfaction). Zéro torchage, zéro perte.
Espace annulaire	Inertage CO ₂ /N ₂ (innovation Résilience)	Échappement moteur Atkinson purifié (catalyseur 3 voies) → riche CO ₂ , pauvre O ₂ → atmosphère inerte anti-incendie GRATUITE. Zéro coût additionnel vs inertage azote classique. Voir §6.

3.1 Gestion du centrage (CG) lors de la vidange des réservoirs

La vidange progressive du réservoir arrière déplace naturellement le CG vers l'avant. Quatre leviers techniques maintiennent l'appareil dans son enveloppe de centrage autorisée :

Levier	Mécanisme	Résultat
1. Séquencement de vidange (Fuel Scheduling)	FMS (Fuel Management System) gère la vidange selon un profil calculé. Soutirage alterné entre réservoirs arrière et tampons centraux/ventraux. GNL liquide transféré vers réservoirs tampons près du centre de poussée avant vaporisation.	CG maintenu dans plage optimale à chaque phase (croisière, descente, approche).
2. Transfert actif de ballast	Sur appareils à large enveloppe CG : transfert actif de fluide entre réservoirs avant et arrière. Gestion du boil-off (BOG) : phase gazeuse consommée prioritairement → évolution maîtrisée de la masse volumique.	Ajustement CG en temps réel. Réduction pression interne réservoirs.
3. Compensation aérodynamique FBW	FBW réajuste en continu l'angle THS (Trimable Horizontal Stabilizer) pour annuler le moment piqueur généré par l'avancée du CG. Stratégie de calcul intègre la réduction progressive de la traînée de trim.	Pas de trim drag excessif en fin de croisière. Consommation spécifique préservée.
4. Jaugeage cryogénique temps réel	Jauges capacitives cryogéniques + capteurs de pression multipoints. Calculateur de bord réévalue en temps réel masse exacte et vecteur d'inertie du réservoir arrière (variations densité GNL selon phases liquide/gaz).	Adaptation immédiate des lois de trim et de transfert. Précision masse GNL embarquée garantie.

4. Valorisation du froid cryogénique — 320–460 kW gratuits

Le GNL à -162°C représente un réservoir de froid permanent — avantage UNIQUE du méthane liquide que le kérosène ne peut pas avoir. Sa vaporisation contrôlée récupère cette énergie thermique pour alimenter la climatisation, l'avionique et le compresseur moteur sans consommer aucune énergie propulsive.

Application	Puissance récupérable	Gain système	Mécanisme
Climatisation cabine passagers	150–200 kW continu	–2 % conso carburant	Échangeur GNL/air cabine. Remplace le cycle frigorifique classique (compresseur + détente). Économie 80 % énergie climatisation.
Refroidissement avionique	50–80 kW	Fiabilité +15–20 %	Électronique refroidie à 20°C vs 40°C ambiant → MTBF $\times 1,5$. Pas de pannes thermiques.
Pré-refroidissement air compresseur moteur (intercooling)	100–150 kW	+2–3 % rendement turbine	Air comprimé plus dense → travail compresseur réduit → cycle Brayton plus efficace. Contribution au gain de rendement §2.
Conditionnement batterie ÉREV tampon	20–30 kW	Durée vie batterie +30 %	LFP maintenue à 15°C vs 35°C → cycles utiles $\times 1,5$. Réduit remplacement batterie de 30 %.
Inertage réservoirs (CO_2 échappement Atkinson)	Gratuit (flux fatal)	Sécurité incendie +++	Chaleur fatale moteur Atkinson → catalyseur 3 voies → CO_2 pur → atmosphère inerte espace annulaire réservoirs. Voir §6.
TOTAL valorisable	320–460 kW	+5–8 % autonomie vol	Sur 10 000 km : économie 4–5 t GNL = 4–5 % masse carburant. Cette énergie est GRATUITE — le kérosène ne peut pas bénéficier de ce mécanisme.

5. Système prolongateur E-REV Atkinson + Groupe froid Stirling

Architecture boucle fermée : le prolongateur Atkinson consomme le boil-off naturel (autrement perdu), produit l'électricité nécessaire au groupe froid Stirling qui reliquéfie ce même boil-off. Un seul système résout quatre problèmes simultanément : boil-off, électricité sol/vol, inertage sécurité, reliquéfaction.

Composant	Spécification	Valeur	Justification
— PROLONGATEUR E-REV ATKINSON GNV —			
Cylindrée / configuration	1,2 L — 3 cylindres Régime fixe 2 800 tr/min	85 kg / 0,12 m ³	Compacité optimale. Régime fixe = rendement maximal Atkinson permanent.
Rendement thermique	48 % (régime fixe optimal) Indice octane $\text{CH}_4 = 130 \rightarrow$ taux compression 18:1	Point optimal permanent	Cycle Atkinson sur-détente. Méthane permet taux compression élevé sans cliquetis. Régime fixe = toujours au pic de rendement.
Consommation GNV	1,2 kg/h boil-off (disponible : 47,5 kg/h)	17 kW thermique	Alimenté par boil-off naturel → largement suffisant. Excédent reliquéfié par Stirling.
Production électrique	8 kW continus (génératrice aimants permanents)	Couvre auxiliaires + groupe froid + marge	Remplace APU classique + RAT classique. Voir §5.2 mode RAT.
Chaleur fatale	9 kW @ 90°C (récupérable)	Inertage réservoirs	Via catalyseur 3 voies → CO_2 pur → atmosphère inerte réservoirs. Voir §6.
MTBF	50 000 heures	Maintenance ~200 €/an (huile)	Moteur automobile adapté. Régime fixe = durée de vie $\times 10$ vs moteur conventionnel.

Composant	Spécification	Valeur	Justification
— GROUPE FROID STIRLING CRYOGÉNIQUE —			
Technologie	Cycle Stirling inversé Fluide hélium inerte	120 kg / 0,3 m ³	Meilleur COP pour cryogénie. MTBF 50 000h (éprouvé GNL industriel et spatial). Fournisseurs : Stirling Cryogenics (NL), Sumitomo (JP).
COP (coeff. performance)	COP réel : 0,46–0,49 (Carnot = $T_{\text{froide}}/(T_{\text{chaude}}-T_{\text{froide}})$ = 111/182 = 0,61 × 75–80 % eff. Stirling réel) 6 kW élec → 2,7 kW froid Reliquéfaction ~40 % boil-off APU ~57 % boil-off	Source : Note Aviation Résilience V11, mai 2026	Reliquéfaction PARTIELLE (~40 % boil-off, ~19 kg/h). Puits passif ~7 kW valorisable avionique/cabine sans coût élec.
— BILAN ÉNERGÉTIQUE BOUCLE FERMÉE (stationnement) —			
Entrée : boil-off naturel	15,8 kW thermique 47,5 kg/h méthane vapeur	Source gratuite	Auparavant perdu ou torché. Désormais carburant Atkinson.
Prolongateur (rdt 48 %)	7,6 kW élec produits 8,2 kW chaleur fatale	Chaleur → CO ₂ → inertage	Double valorisation : électricité + sécurité réservoirs.
Groupe froid Stirling	–6 kW élec consommés → ~2,7 kW froid –162°C (COP réel 0,46–0,49)	COP 0,46–0,49 (Carnot = 111/182 = 0,61 × 75–80 % eff. réelle) Reliquéfaction ~40 % APU boil-off ~57 %	Reliquéfaction partielle (~40 % boil-off). Excédent élec : 1,6 kW (7,6 – 6 kW Stirling). Système auto-suffisant, zéro perte.
ROI investissement	CAPEX ~180 500 € Économie 393 000 €/an/avion	ROI : 6,2 mois	Pour flotte 100 avions : 39,3 M€/an économisés. Boil-off 348 k€ + électricité sol 35 k€ + APU 10 k€.

5.2 Mode RAT — Le prolongateur E-REV comme RAM Air Turbine de nouvelle génération

La RAM Air Turbine (RAT) classique est le système de secours ultime : en cas de panne totale des générateurs, une hélice éolienne déployée alimente les systèmes vitaux. Le prolongateur E-REV Atkinson est structurellement supérieur à la RAT classique sur tous les critères pertinents — et déjà embarqué à coût zéro additionnel.

Critère	RAT classique (hélice éolienne)	Prolongateur E-REV Atkinson (mode secours)
Source d'énergie	Hélice déployée dans flux d'air — énergie cinétique vol	Boil-off GNL disponible en permanence dans les réservoirs
Puissance fournie	5–8 kW (A320) à 15 kW (A350) Variable selon vitesse avion (V ²)	8 kW continus — CONSTANTS (régime fixe, indépendant de la vitesse)
Trainée aérodynamique	+15–20 % trainée (hélice déployée dans flux)	ZÉRO trainée additionnelle (moteur interne)
Systèmes couverts	Commandes de vol + avionique essentielle	Commandes de vol + avionique + pressurisation + éclairage
Autonomie	Illimitée (tant que vol)	Illimitée (tant que GNL > 10 % réservoirs)
Coût équipement dédié	~80 000 € (RAT dédié supplémentaire)	0 € (le prolongateur E-REV est déjà embarqué)
Conclusion	Maintenu en redondance passive (exigence réglementaire EASA actuelle)	Le prolongateur E-REV EST le RAT de nouvelle génération. Recommandation : certifier comme RAT PRIMAIRE — RAT éolien = redondance secondaire.

6. Inertage des réservoirs — Innovation boucle fermée L'inertage de l'espace annulaire des réservoirs cryogéniques est une exigence EASA pour la certification d'un avion GNL. La solution classique (azote, coûteux et stockage additionnel) est remplacée par une innovation Résilience : l'échappement purifié du moteur Atkinson, riche en CO₂ et pauvre en O₂, inertes les réservoirs en permanence à coût zéro.

Étape	Composition gaz	Description technique
①	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (+ N ₂ inchangé)	Combustion stœchiométrique dans Atkinson. Échappement brut : CO ₂ ~12 %, H ₂ O ~15 %, N ₂ ~73 %, O ₂ résiduel < 1 %. Méthane déjà très pauvre en O ₂ résiduel vs kérosène.
②	$\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ NO _x → N ₂ HC → CO ₂ + H ₂ O	Catalyseur 3 voies (rhodium/palladium/platine — technologie automobile EURO 6). Élimine CO, HC résiduels et NO _x . Sortie : CO ₂ pur ~13 % + H ₂ O ~15 % + N ₂ ~72 %.
③	H ₂ O condensée\nséparée\n(étape 1/2)	Condenseur 15°C → eau liquide évacuée. Gaz partiellement sec obtenu : CO ₂ ~15 % + N ₂ ~85 % + H ₂ O résiduelle saturée à +15°C (point de rosée = +15°C). INSUFFISANT SEUL : traces vapeur d'eau suffisantes pour geler à -162°C contact paroi réservoir → risque blocage soupapes et délaminage MLI.
③ bis	Dessication poussée (CRITIQUE — sécurité)	Dessiccateur à tamis moléculaires 3Å (2 lits alternés à régénération cyclique). Point de rosée sortie : < -60°C. Masse : ~8–15 kg. Volume : ~3–5 L. Consommation élec : 0,3–0,5 kW (couvert par E-REV). Durée de vie tamis : ~5 000 cycles. Justification : toute trace H ₂ O résiduelle gèle instantanément au contact de la paroi -162°C (ΔT = 177°C). La glace peut : (1) bloquer les soupapes de décharge → risque BLEVE ; (2) délaminer l'isolation MLI → augmentation boil-off exponentielle ; (3) coincer les vannes d'isolation des 4 segments → perte redondance sécurité carburant. Vérification point de rosée en continu : capteur hygromètre capacitif sur ligne inertage.
④	CO ₂ + N ₂ inerte (O ₂ < 0,5 %) Point rosée < -60°C	Injection espace annulaire réservoirs. Gaz TOTALEMENT SEC (point de rosée < -60°C). Limite inflammabilité méthane : 5–15 % dans air → > 25 % dans CO ₂ /N ₂ . Zone annulaire maintenue en légère surpression (+0,1 bar) d'inert permanent. Zéro risque formation glace en paroi réservoir -162°C.
⑤	Monitoring O ₂ + CH ₄ temps réel	Capteurs O ₂ < 2 % (sécurité) + CH ₄ < 1 % (détection micro-fuite). Alarme et déclenchement soupapes d'urgence si seuil atteint. Double fonction : inertage + détection fuite intégrée.

Avantages sécurité : (1) Prévention BLEVE — O₂ absent, inflammation impossible même si réservoir percé. (2) Détection fuite — capteurs CH₄ ultra-sensibles sur circuit inertage. (3) Certification EASA facilitée — exigence inertage permanent satisfaite sans équipement dédié. (4) Boucle fermée élégante — le moteur qui consomme le boil-off protège simultanément les réservoirs

7. Fuites méthane et contrôle des émissions — Verrou non-négociable

GWP100 CH₄ = 27,9 (IPCC AR6). Au-delà de 3,5 % de fuite sur la chaîne complète, le bénéfice CO₂ du méthane est effacé. Le seuil Résilience ≤ 1 % est contractuel et non-négociable. Trois sources de fuites potentielles sont identifiées sur le segment long-courrier.

Source de fuite	Niveau de risque	Mécanisme de contrôle	Niveau résiduel cible
Boil-off réservoirs (évaporation naturelle)	Faible (géré en boucle fermée)	Reliquéfaction PARTIELLE boil-off (Stirling ~40 %). APU boil-off valorisé (~57 %). Prolongateur Atkinson : consomme 1,2 kg/h. Inertage CO ₂ : surveillance permanente CH ₄ espace annulaire.	< 0,1 % du carburant embarqué en vol (valorisé à 100 %)

Source de fuite	Niveau de risque	Mécanisme de contrôle	Niveau résiduel cible
Slip méthane moteur Atkinson pistons (imbrûlés échappement)	Modéré (à documenter sur banc)	Catalyseur d'oxydation méthane (MOC) sur ligne d'échappement. Technologie existante (industrie stationnaire et maritime). Adaptation aviation à qualifier EASA 2026–2028. Note : turbofan ④ — slip quasi nul (T° combustion > 1 400°C, vérifiée Tu-156 1996).	Pistons Atkinson : < 0,1 % avec MOC Turbofan ④ : < 0,01 % (quasi nul)
Fuites fugitives connectiques cryogéniques	Faible (technologie existante)	Connectiques double vanne cryogénique (technologie spatiale LH2 adaptée). Détecteurs CH ₄ catalytiques + infrarouge, seuil 0,5 % vol., sur toute la chaîne d'avitaillement. Boucles fermées de récupération boil-off avitaillement.	< 0,5 % vol. (seuil détection) → < 0,1 % fuite chaîne complète
BILAN FUITE TOTAL chaîne complète	Seuil critique : 3,5 % efface le bénéfice CO₂	Combinaison des trois contrôles : boucle fermée Stirling + MOC + connectiques cryogéniques. Seuil Résilience ≤ 1 % contractuel sur toute la chaîne.	< 1 % total (seuil contractuel Résilience) Conservateur ×3,5 vs seuil critique

8. Bilan carbone net — Analyse du Cycle de Vie (ACV) — Mission Paris–New York

Unité fonctionnelle : 1 kg de carburant consommé dans le turbofan, rapporté au passager-kilomètre. Mélange de référence : 50 % Bio-GNL + 50 % GNL fossile, avec séquestration biochar co-produit pyrogazification.

Carburant	Émissions brutes ACV	Séquestre biochar	Bilan carbone net	Réduction vs kérosène
Jet-A1 kérosène classique	3,85 kg CO ₂ eq/kg (combustion + amont)	0,00 kg	3,85 kg CO₂eq/kg	Référence (0 %)
GNL fossile pur	~2,90 kg CO ₂ eq/kg (2,75 combustion + 0,30 amont)	0,00 kg	~2,90 kg CO ₂ eq/kg	–37 % (GNL fossile)
50 % Bio-GNL + 50 % GNL fossile	1,650 kg CO ₂ eq/kg (fossile 1,525 + bio amont 0,125)	–0,935 kg CO₂eq (0,30 kg biochar × 0,85 C × 44/12)	0,715 kg CO₂eq/kg	–81,4 % vs kérosène
100 % Bio-GNL (horizon 2045)	0,250 kg CO ₂ eq/kg (amont seul)	–1,870 kg CO₂eq	–1,620 kg CO₂eq/kg (BILAN NÉGATIF)	–142 % (bilan carbone négatif certifié)

Note — décomposition du –37 % en deux avantages distincts

- ① **Avantage chimique** — le CH₄ émet 141 g CO₂/MJ utile vs 197 g/MJ pour le kérosène pur (–28 %). Seul, cet avantage équivaut à ~35 % de SAF HEFA — bonne base pour comparer les carburants entre eux.
- ② **Avantage masse** — le PCI supérieur (+16 %) réduit la masse embarquée de 89 t. Combiné à l'avantage chimique, il produit le –37 % mesuré en tonnes par vol, et l'équivalence à ~46,5 % de SAF HEFA — métrique opérationnelle correcte pour comparer l'impact réel d'un vol.

Ces deux avantages sont physiquement distincts et s'additionnent. Un SAF améliore la chimie mais n'allège pas l'avion. Le GNL fait les deux simultanément — c'est son avantage systémique. Les deux métriques (35 % et 46,5 %) sont défendables face à tout interlocuteur technique.

8.1 Impact au passager-kilomètre

Paramètre	Kérosène actuel	50 % Bio-GNL + biochar	100 % Bio-GNL + biochar
Intensité carbone de référence (g CO ₂ eq/p.km)	~75 g CO ₂ eq/p.km	—	—
Réduction masse carburant (PCI +16 % + sur-détente)	Référence	× 0,55 (–45 % masse consommée)	× 0,55 (–45 % masse consommée)
Facteur émission net carburant (bilan net / kérosène)	1,000	0,715 / 3,85 = 0,1857 (–81,4 %)	–1,62 / 3,85 = négatif
Empreinte nette finale (g CO ₂ eq/p.km)	~75 g CO₂eq/p.km	75 × 0,55 × 0,1857 = 7,66 g CO₂eq/p.km	Négatif (séquestration nette)
Réduction vs flotte actuelle	0 %	–89,8 % (÷ 10)	> –100 % (bilan négatif)

Source : ACV détaillée Programme Résilience V11. Ratio biochar : 2,5–3,1 t CO₂eq/t biochar (EBC/Puro.earth). CH₄ combustion : 2,75 kg CO₂/kg CH₄ (stœchiométrie). Facteur kérosène : 3,85 kg CO₂eq/kg (combustion + amont raffinage).

9. Intégration dans le bilan biomasse Résilience

L'aviation Bio-GNL ne perturbe pas la filière terrestre Résilience. Option recommandée (A) : prélèvement de 12–20 TWh sur les 164–225 TWh de biométhane produits = 7–12 % du total. La filière terrestre ÉREV reçoit les 88–93 % restants.

Couverture aviation française	TWh nécessaires	% production Résilience	Biomasse supplémentaire
Vols domestiques (60–100 %)	15–20 TWh	7–9 %	0 Mt (option A — prélèvement réseau)
Moyen-courrier (20–35 %)	+5–10 TWh	3–5 % supplémentaires	+1–2 Mt MS (option B)
Long-courrier (10–15 %)	+5–8 TWh	3–4 % supplémentaires	+1–3 Mt MS (option B)
Séquestration biochar (inchangée dans tous les scénarios)	6,6–9,9 Mt CO ₂ /an	Inchangé	La séquestration permanente n'est pas réduite par l'aviation

→ *Bilan biomasse complet : Programme Résilience V11 — Gisement national net V3*

10. Verrous spécifiques et feuille de route

Les verrous communs à toute la gamme (certification EASA Atkinson pistons, détection fuites CH₄, infrastructure bio-GNL) sont traités dans la Matrice famille V8 §5. Seuls les verrous spécifiques au segment ④ sont listés ici.

→ *Matrice famille V8 §5 — Verrous communs et feuille de route*

Verrou spécifique ④	Nature	Action requise
Certification turbofan méthane à sur-détente optimisée (moteur entièrement nouveau)	Réglementaire (nouveau type EASA CS-25)	Consortium Airbus + Rolls-Royce + Safran. CAPEX développement moteur : 125–200 M€ par famille. Dialogue EASA dès 2026. Décision urgente : fenêtre 2026–2028.
Validation rendement turbofan 44–48 % en conditions réelles (note technique dédiée)	Technique (essais moteur)	Note technique Rolls-Royce/Safran nécessaire. Les trois mécanismes (PCI, intercooling, sur-détente) sont physiquement solides mais le rendement combiné 44–48 % doit être validé sur banc d'essai avant publication.
Certification réservoirs cryogéniques GNL en fuselage (EASA CS-25)	Réglementaire (nouveau pour CS-25)	Configuration 70 %/30 % à certifier. Qualification fatigue parois composites (LCLD + SHM). Qualification inertage CO ₂ par échappement Atkinson. Programme d'essais EASA spécifique GNL aviation.
Certification prolongateur E-REV comme RAT principal (CS-25 AMC)	Réglementaire (nouveau précédent EASA)	RAT classique maintenu en redondance passive (exigence réglementaire actuelle). Certifier le prolongateur E-REV comme RAT primaire = nouveau précédent EASA. Dialogue réglementaire dès Phase 1.
Infrastructure GNL aéroports hubs (avitaillement cryogénique)	Logistique (investissement aéroports)	Coût hub : 100–180 M€ (GNL fossile) / 50–100 M€ (Bio-GNL production locale). Infrastructure GNL maritime existante → adaptation côté aéroport. 10 hubs pilotes : CDG, Lyon, Nice, Toulouse + 6 européens.
Dessiccation gaz inertage avant espace annulaire –162°C (verrou sécurité critique)	Sécurité (CRITIQUE)	Verrou sécurité critique identifié par analyse Gemini (juillet 2026). Condenseur 15°C insuffisant seul : traces H ₂ O résiduelles gèlent instantanément à –162°C → blocage soupapes BLEVE / délaminage MLI / coincement vannes segments. Solution : dessiccateur tamis 3Å (2 lits, régénération cyclique) entre condenseur et espace annulaire. Point de rosée garanti < –60°C. Masse ~8–15 kg. Consommation 0,3–0,5 kW E-REV. Surveillance continue hygromètre capacitif sur ligne inertage. Qualification EASA en environnement vibratoire aéronautique requise.
Renforcement structure fuselage arrière (réservoirs –162°C) Impact masse OEW non chiffré	Structural (à quantifier)	Les réservoirs cryogéniques à –162°C nécessitent un renforcement de la structure fuselage arrière : (1) acier austénitique 316L obligatoire sur toutes les zones de contact (fragmentation par froid des alliages classiques Al 2024/7075) ; (2) joints d'étanchéité cryogéniques sur toute la zone ; (3) pare-froid structurel entre réservoir et cadres fuselage. Masse supplémentaire estimée : +200–400 kg non inclus dans le bilan masse §3. À documenter lors du design détaillé.
Faisabilité aérodynamique du fuselage cryogénique (+36 % volume réservoirs)	Aérodynamique (CFD requise)	Le volume GNL +36 % vs kérosène implique soit un fuselage allongé (+4–6 m sur A350, traînée frottement +4–6 %, bilan net –25 à –26 % masse carburant → toujours favorable), soit des nacelles dorsales (+3–5 % traînée, fuselage inchangé). Risque identifié par analyse Gemini : la traînée additionnelle pourrait grever partiellement le gain propulsif +19 %. La note V11 mentionne qu'une simulation aérodynamique complète donnerait un résultat "légèrement meilleur" — sans la fournir. ACTION : CFD fuselage complet (RANS/LES) intégrant les réservoirs cylindriques, à conduire en Phase 1 (2026–2028) avant engagement de design final. Résultat attendu : confirmation bilan net > –20 % masse carburant embarquée.
Fatigue thermique échangeur intercooler CCA (ΔT > 800°C — verrou métallurgie)	Technique (CRITIQUE) Safran / Rolls-Royce	L'intercooler CCA (air HP +650°C / GNL –162°C) génère un gradient thermique ΔT > 800°C. Trois risques distincts : (1) CHOC THERMIQUE : cycles démarrage/extinction entre –162°C et +650°C → fatigue thermomécanique des soudures et joints (Inconel 718, Hastelloy X) ; (2) GRIVRAGE AIR HP : humidité résiduelle air HP (~0,1–0,3 g/kg) gèle côté paroi froide → couche givre → dégradation progressive échange thermique → pré-dessiccateur air HP ou purge périodique nécessaire ; (3) CONTRAINTES MÉCANIQUES : dilatation différentielle Inconel (α ≈ 13 μm/m·K) vs acier 316L (α ≈ 16 μm/m·K) sur ΔT = 812°C → déformation ~1 cm/m → joints et plaques à concevoir spécifiquement. Ces risques ne disqualifient pas l'intercooler (équivalents existent : échangeurs LH2/H2 chaud moteurs Vulcain/RS-25)

Verrou spécifique ④	Nature	Action requise
		mais exigent un programme d'essais dédié chez Safran/Rolls-Royce. ACTION : inscrire programme essais intercooler CCA dans accord consortium Phase 1.

10.2 Feuille de route spécifique ④

Phase	Période	Investissement	Actions clés
① LANCEMENT	2025–2028	3–5 Md€ (UE + industrie)	Lancer certification EASA avion GNL (URGENT). Consortium Airbus + Safran + Rolls-Royce + Air France. Développer turbofan méthane sur-détente (125–200 M€/famille). Intégrer prolongateur E-REV + Stirling dans design A350neo-GNL. Certifier prolongateur comme RAT principal.
② PROTOTYPE	2028–2030	~3 M€ (intégration avion test)	Premier A350-GNL en vol. Valider inertage réservoirs par échappement Atkinson (EASA). Infrastructure 10 hubs pilotes. Liquéfaction Bio-GNL : 3 unités pilotes sur terminaux GRDF (50 000 t/an). Collecte retours E-REV en conditions réelles.
③ DÉPLOIEMENT	2030–2035	18 M€ + 1,5–2 Md€ hubs	100 avions Bio-GNL en service commercial. 50 aéroports français équipés réservoirs cryogéniques. Bio-GNL produit : 500 000 t/an (≈ 8 TWh). Vols domestiques français : 40–60 % Bio-GNL.
④ STANDARD	2035–2045	Amorti	1 000 avions Bio-GNL dans 20 % flotte mondiale. Vols domestiques France : 60–100 % Bio-GNL. Bilan carbone aviation France : –45 à –60 % vs 2024. Économie 393 000 €/avion/an (boil-off + APU + électricité sol).