

AVIATION MÉTHANE ÉREV ATKINSON

Gamme complète : VTOL • Régional • Long-courrier

Matrice de famille — Programme Résilience V11

Juillet 2026 — Document de travail interne

1. Dénominateur commun de la gamme

Quatre segments, une architecture : cycle Atkinson à pistons à régime fixe comme générateur électrique, carburant méthane (GNL/GNV → bio-GNL/bio-GNV filière Résilience), bus DC 800 V, batterie tampon modeste. Exception : le long-courrier utilise un turboréacteur méthane comme propulsion principale — l'ÉREV Atkinson y est un complément fonctionnel (voir §2).

Invariant	Justification physique	Segments
Cycle Atkinson pistons à régime fixe (~2 500 tr/min)	Rendement thermique pistons ①②③ : 52–55 % à régime fixe — démontré sur moteurs automobiles optimisés méthane, transposable à un générateur mono-point (estimation — à valider par banc d'essai 2026–2027). La puissance variable est gérée électriquement. Chaîne complète ①②③ : 52-55 % (pistons) × 96 % (génératrice) × 94 % (moteur élec.) × 85-87 % (hélice/rotor) = 41–46 % global. Note V9 : le rendement hélice/rotor est désormais inclus dans la chaîne complète. Note ④ : le turbofan méthane à sur-détente optimisée atteint 44–48 % — supérieur au turbofan kérosène (42–44 %) mais le rendement 52–55 % des pistons ne se transfère pas à une turbomachine.	①②③ (④ : rôle complémentaire rendement différent)
Traction 100 % électrique (hélices ou rotors)	Découplage total propulsion/génération. KERS (récupération en descente) natif. Contrôle de puissance électrique instantané vs inertie mécanique turbine (délai 2–4 s).	①②③ (④ : turbofan direct)
Carburant méthane (GNL –162°C ou GNV 250 bar)	NOx –40 %, particules –70 %, contrails –50 à –90 % : bénéfices liés à la chimie CH ₄ , structurels et permanents. Progressivité 0→100 % bio sans modifier l'appareil ni le réseau.	①②③④
Bus DC 800 V	Standard électromobilité haute performance (Porsche Taycan, ERA Aura Aero, Gyro-Torique). Convergence coûts composants électronique de puissance.	①②③
Batterie tampon modeste (décollage + transitoires)	Dimensionnée pour les pics de puissance (décollage, montée, hover), pas pour l'autonomie totale. Masse maîtrisée, certifiabilité facilitée vs full-electric.	①②③

**Filière carburant unique (Résilience :
pyrogazification → Sabatier → bio-CH₄)**

Un seul carburant, une seule filière, quatre segments clients. GNL pour portée > 800 km, GNV 250 bar pour portée < 800 km. Montée en bio progressive sans changer les appareils.

① ② ③ ④

Note sur le long-courrier ④ : le turboréacteur méthane est la propulsion principale. L'ÉREV Atkinson est un complément fonctionnel embarqué (APU intelligent, alimentation systèmes, démarrage moteurs, production électrique en vol). Ce n'est pas un avion à traction électrique — c'est une architecture hybride où le méthane couvre 100 % de l'énergie de propulsion via turbofan, et le turbofan à sur-détente optimisée assure la propulsion ; l'Atkinson optimise les auxiliaires.

2. Matrice des quatre segments de la gamme

Les quatre segments couvrent l'intégralité du spectre aérien décarbonisable à horizon 2045 avec la technologie méthane. Chaque colonne est un appareil distinct ; les lignes sont les critères de comparaison.

Critère	① VTOL Gyro-Torique Bio-GNL	② Régional court-moyen 15 places GNL	③ Régional moyen ATR-72 ÉREV GNV	④ Long-courrier Turboréacteur méthane
Segment / usage	VTOL urbain · Médical ISR · Taxi aérien Souveraineté	Régional 15 pax Jusqu'à 1 500 km (ex. ERA, DHC-6)	Régional 70 pax 400–700 km (remplacement ATR-72)	Long-courrier 200–300 pax > 8 000 km (ex. Paris–New York)
Portée	550–600 km (→ 4h30+ v2 bio-GNL)	Jusqu'à 1 500 km (GNL –162°C) △Note : GNV 250 bar suffisant < 800 km	400–700 km (GNV 250 bar)	> 8 000 km (GNL –162°C réservoirs fuselage)
Vitesse croisière	180–200 km/h (→ 250 km/h cible v2 tore lifting body)	~450–480 km/h (turboprop électrique)	~510 km/h (hélices électriques)	Mach 0,82–0,85 (turboréacteur méthane)
Capacité	4–8 pax (selon configuration bloc énergétique)	15 pax (ou cargo)	70 pax (ou cargo)	200–300 pax
Architecture propulsion	6–8 rotors électriques + ÉREV Atkinson 40–250 kW (modulaire)	4–6 hélices électriques + ÉREV Atkinson 2 × ~500 kW	2 hélices électriques + ÉREV Atkinson 2 × 900 kW	Turboréacteur méthane (propulsion principale) + ÉREV Atkinson (APU intelligent)
Rôle de l'ÉREV Atkinson	Propulsion principale (générateur → rotors)	Propulsion principale (générateur → hélices)	Propulsion principale (générateur → hélices)	Complément fonctionnel (APU · systèmes · démarrage production élec. en vol)

Critère	① VTOL Gyro-Torique Bio-GNL	② Régional court-moyen 15 places GNL	③ Régional moyen ATR-72 ÉREV GNV	④ Long-courrier Turboréacteur méthane
Rendement Atkinson (régime fixe)	46–52 % (~2 500 tr/min)	52–55 % (point optimal permanent)	45–48 % (2 groupes en parallèle)	44–48 % (turbofan méthane à sur-détente optimisée) Note : le rendement 52–55 % des pistons Atkinson ①②③ ne s'applique pas à une turbomachine
Carburant (stockage appareil)	Bio-GNL –162°C (tore segmenté 4 réservoirs)	GNL –162°C (réservoirs composites fuselage/nacelle) → GNV 250 bar si < 800 km	GNV 250 bar (réservoirs type IV composite carbone)	GNL –162°C (réservoirs fuselage cryogéniques)
Batterie tampon	20–200 kWh (modulaire selon config)	~150 kWh (décollage + montée + secours)	200 kWh (décollage + montée + secours)	Non applicable (turbofan direct) UPS systèmes avioniques
KERS / récupération en descente	Oui — rotors en mode générateur en descente + vent arrière	Oui — hélices en mode générateur en descente ~3–5 % énergie récupérée (borne conservatrice V9)	Oui — hélices en mode générateur en descente ~3–5 % énergie récupérée (borne conservatrice V9)	N/A (turbofan)
Surcoût masse système vs référence kérosène	Nouveau segment (pas de référence directe hélicoptère)	~+400–600 kg (~5–7 % MTOW) Réservoirs GNL compensés par masse carburant –40 %	~+800 kg (~3,6 % MTOW) Validé dans note ATR-72 ÉREV	~–200 à –400 kg net (GNL plus léger + Atkinson auxiliaires légers)

Critère	① VTOL Gyro-Torique Bio-GNL	② Régional court-moyen 15 places GNL	③ Régional moyen ATR-72 ÉREV GNV	④ Long-courrier Turboréacteur méthane
CO ₂ — méthane fossile vs référence kérosène	-45 à -50 % (vs hélicoptère turbine H135)	-45 à -50 % (vs turboprop kérosène 15 pax)	-45 à -48 % (vs ATR-72 kérosène actuel)	-37 à -45 % (vs kérosène long-courrier)
CO ₂ — 50 % bio-GNL/GNV (filière Résilience)	-70 à -72 %	-70 à -72 %	-70 à -72 %	-69 à -75 % (+biochar pyrogazification)
NOx / Particules / Contrails	NOx -40 % PM -70 % Contrails : quasi nuls (altitude basse + CH ₄)	NOx -40 % PM -70 % Contrails : faibles (FL180–250 + CH ₄) Δ Voir note altitude	NOx -40 % PM -70 % Contrails : faibles (FL180–220 + CH ₄) Δ Voir note altitude	NOx -40 % PM -70 % Contrails -50 à -90 % (FL350–410 : bénéfice majeur)
Équivalence SAF (long-courrier ④)	N/A (VTOL)	N/A (régional)	N/A (régional)	GNL fossile seul = kérosène + 46,5 % SAF en CO ₂ (-37 % = équiv. 46 % SAF HEFA) Or 50 % SAF est impossible → Voir §9 pour analyse complète
Pourquoi H ₂ écarté (long-courrier ④)	N/A	N/A	N/A	Trois contraintes physiques permanentes (propriétés fondamentales H ₂) → Voir §9 pour l'analyse complète avec tableaux comparatifs
Coût carburant vs kérosène	-60 à -70 % (bio-GNL filière Résilience)	-15 % (GNL fossile) → -60 % (bio-GNL) GNV fossile : -10 à -20 %	~0,8–1,1 €/km (400 kg GNV / 400 km) vs kérosène +volatile	-15 % (GNL fossile) → -50 % (bio-GNL)

Critère	① VTOL Gyro-Torique Bio-GNL	② Régional court-moyen 15 places GNL	③ Régional moyen ATR-72 ÉREV GNV	④ Long-courrier Turboréacteur méthane
Infrastructure sol existante	GNL cryogénique hélipads/bases (à construire, faibles volumes)	GNL : avitaillement cryogénique aéroports (à construire) GNV < 800 km : réseau existant camions	Réseau GNV 250 bar (camions, bus) Existant et dense	GNL maritime existant → adaptation côté aéroport (investissement limité)
Concurrent principal	H135 turbine kérosène eVTOL électrique batteries	ERA Aura Aero (hybride élec. kéro/SAF) Autonomie 1 500 km même segment	ATR-72 kérosène + SAF partiel (< 6 % réaliste 2035)	Kérosène + SAF (< 6 % production mondiale réaliste 2035)
Avantage différenciant vs concurrent	Rendement ×1,8 vs turbine + carburant souverain + zéro rotor de queue	NOx/PM structurels (ERA kéro ne les touche pas) + portée identique 1 500 km + bio progressif sans modifier l'avion	–50 % coût exploitation + décarbonable progressivement	Seule solution long-courrier crédible (SAF : impossible à l'échelle) (H ₂ : incompatibilité physique permanente) → Voir §9
Horizon premier vol certifiable	2030–2033 (démonstrateur 2027–2029)	2030–2032 (si programme lancé 2026–2027)	2030–2033 (retrofit ATR-72 existant)	2032–2035 (consortium Airbus + RR)

Note altitude / contrails segments ②③ : les turboprops électriques (FL180–250) produisent peu de contrails persistants même avec du kérosène, car la formation des contrails de glace est sensible à l'altitude. Le bénéfice méthane sur les contrails est donc moindre sur ②③ qu'en long-courrier ④ — mais les bénéfices NOx –40 % et particules –70 % restent entiers et structurels sur tous les segments.

3. Cohérence climatique consolidée — Bilan polluant par polluant

Tous les bénéfices climatiques de la famille méthane sont liés à la chimie du CH₄, pas à son origine fossile ou biogénique. Ils sont donc constants quel que soit le pourcentage de bio dans le mélange — seul le CO₂ évolue avec la part bio.

Polluant / vecteur	Mécanisme physique	Réduction	Segments
NOx –40 %	Température de combustion CH ₄ structurellement plus basse que le kérosène. Mécanisme de Zeldovich (NOx thermiques) : formation exponentielle avec la température. Réduction physique, non technologique.	Constant (fossile ou bio)	①②③④ tous segments
Particules fines –70 %	CH ₄ pur : absence totale de composés soufrés et aromatiques générateurs de suies. Réduction chimique permanente. Vérifiée historiquement sur le programme soviétique Tu-156 (1996–1999).	Constant (fossile ou bio)	①②③④ tous segments
Contrails –50 à –90 % (long-courrier FL350+)	Température de combustion plus basse + absence de noyaux de condensation (soufre, suies). Forçage radiatif contrails > CO ₂ sur 20 ans (IPCC AR6). Bénéfice majeur concentré sur le long-courrier ④.	Maximal sur ④ Faible sur ②③ Quasi nul sur ①	④ principal ②③ partiel ① marginal
CO₂ — méthane fossile vs kérosène	Double levier : PCI méthane 50 MJ/kg vs 43 MJ/kg kérosène (+16 %) + rendement chaîne Atkinson estimé 41–46 % (chaîne complète avec hélice, à confirmer sur banc) vs turbofan kérosène 38–42 %. Rendement TG600 Safran corrigé V9 : 38–42 % (vs 35–38 % V8 — source GPT/Gemini). Chaîne ERA : 31–34 %. Moins de carburant consommé ET moins de CO ₂ par MJ.	–37 à –50 % selon segment	①②③④

Polluant / vecteur	Mécanisme physique	Réduction	Segments
CO₂ — 50 % bio-GNL/GNV (filière Résilience)	Bio-CH ₄ issu pyrogazification Résilience : bilan CO ₂ biogénique neutre sur le cycle de vie. Même appareil, même réservoir, même réseau. Montée 0→100 % bio sans modification.	–70 à –72 % vs kérosène	① ② ③ ④
CO₂ — 50 % bio + biochar (chiffré sur ④, à étendre ① ② ③)	Co-produit biochar pyrogazification : 2,5–3,1 t CO ₂ eq séquestrées / t biochar (ratio EBC/Puro.earth). Sur Paris–NY à 50 % bio-GNL + biochar : bilan net ~200 t CO ₂ vs 995 t kérosène.	~–80 % (④) À étendre aux ① ② ③	④ chiffré ① ② ③ à documenter
Fuites CH₄ (verrou non-négociable)	GWP100 CH ₄ = 27,9 (IPCC AR6). Seuil Résilience : ≤1 % fuite contractuel. Au-delà de 3,5 % de fuite, le bénéfice CO ₂ est effacé. Détection embarquée ≤0,5 % vol. obligatoire sur tous les segments.	Seuil ≤1 % non-négociable	① ② ③ ④ obligatoire

Argument différenciant fondamental : NO_x, particules et contrails représentent ensemble > 50 % du forçage radiatif de l'aviation sur 20 ans (IPCC AR6). Le SAF ne modifie pas structurellement ces trois vecteurs — il ne réduit que le CO₂, et seulement partiellement. La famille méthane Résilience est la seule solution qui les traite tous simultanément.

4. Cohérence filière — De la pyrogazification au réservoir

Une seule filière carburant alimente les quatre segments. Le choix GNL vs GNV dépend uniquement de la portée requise, pas de la technologie moteur.

Étape	① Gyro-Torique	② 15 places	③ ATR-72	④ Long-courrier
Production (Résilience)	Pyrogazification → bio-CH ₄ → liquéfaction GNL	Pyrogazification → bio-CH ₄ → liquéfaction GNL (ou GNV si < 800 km)	Pyrogazification → bio-CH ₄ → compression GNV 250 bar	Pyrogazification → bio-CH ₄ → liquéfaction GNL (85–90 % rendement)
Règle de choix GNL vs GNV	GNL (rayon d'action variable 55–600 km)	GNL pour > 800 km GNV pour < 800 km (infrastructure existante)	GNV (400–700 km densité suffisante)	GNL obligatoire (> 8 000 km GNV insuffisant)
Infrastructure sol existante utilisable	À construire (hélipads, faible volume)	GNL : à construire GNV : réseau camions existant	Réseau GNV camions/bus (dense, existant)	GNL maritime existant → adapter côté aéroport
Coût carburant bio- GNL/GNV 100 % (horizon Résilience)	0,08–0,12 €/kWh	0,08–0,12 €/kWh (GNL) 0,06–0,10 €/kWh (GNV)	0,06–0,10 €/kWh (GNV)	0,08–0,12 €/kWh (GNL)
vs kérosène (0,25–0,40 €/kWh)	–60 à –70 %	–65 à –75 %	–65 à –75 %	–60 à –70 %

5. Verrous technologiques et feuille de route

5.1 Verrous communs à mutualiser

Verrou	Nature	Segment s	Horizon
Certification EASA moteur Atkinson piston en propulsion aéronautique	Réglementaire (chemin inédit)	① ② ③	Dialogue EASA dès 2026 Certification 2028–2030
Gestion vibrations pistons sur structure aéronautique certifiée (AVC 4 niveaux documenté pour ①, à étendre à ② ③)	Technique (AVC + isolation passive)	① ② ③	Bancs d'essai 2026–2028 Qualification vibratoire aéronautique 2028–2030
Turbocompression haute altitude (maintien puissance Atkinson au-dessus de FL180)	Technique (turbocompr. méthane)	② ③	Dérivé auto/marine existant Adaptation aviation 2027–2029
Détection fuites CH ₄ embarquée ≤0,5 % vol. (seuil Résilience)	Sécurité (non-négociable)	① ② ③ ④	Capteurs industriels existants Qualification aviation 2026–2028
Slip méthane sur pistons Atkinson (CH ₄ non brûlé à l'échappement) Documentation combustion ① ② ③	Technique (GWP27,9 CH ₄)	① ② ③	Banc essai dédié 2026–2027 (turbines FL350+ : slip quasi nul vérifié Tu-156 ; pistons à documenter)
Catalyseur d'oxydation méthane (MOC) sur ligne d'échappement pistons Atkinson Garantie slip résiduel < 0,1 %	Technique (post-traitement échappement)	① ② ③	Technologie MOC existante (industrie stationnaire et maritime) Adaptation aviation 2026–2028 Qualification thermique et durabilité EASA 2028–2030
Infrastructure bio-GNL/GNV aéroports et bases VTOL	Logistique (filière Résilience)	① ② ③ ④	Déploiement Résilience Phase 1 (2028–2032) : 150 sites actifs

Verrou	Nature	Segment s	Horizon
Masse réelle moteurs Atkinson pistons à mesurer sur banc (verrou PRIORITÉ 1 — ② ③)	Technique (incertitude critique)	② ③	Mesure masse réelle sur banc avant tout engagement design. Ratio masse/puissance optimiste : moteur 6 cyl. + génératrice ~750-1 050 kg/unité ×2 pour ② ③. Écart potentiel +700-1 400 kg → MTOW potentiellement dépassé sur ② et ③. Identifié : GPT/Gemini juillet 2026.
Dessication méthane GNL avant injection (tamis moléculaires 3Å obligatoire — sécurité critique)	Sécurité (CRITIQUE)	① ② ③ ④	Méthane vaporisé depuis GNL -162°C contient humidité résiduelle → glace dans injecteurs, blocage soupapes de décharge, délaminage MLI. Solution : tamis moléculaires 3Å (2 lits, régénération cyclique). Point de rosée garanti < -60°C. Source : Long-courrier V5 §6 ③ bis.
Titane Ti-6Al-4V sur moteurs Atkinson (décision de conception gamme)	Conception (décision native)	① ② ③ ④	Gain estimé -45 % masse sur pièces structurales (d'après propriétés Ti-6Al-4V AMS 6931 — à confirmer sur banc). Surcout CAPEX gamme : +588-1 190 k EUR. Économie maintenance estimée 20 ans vs turbine : 25-42 M EUR. ROI calculé < 18 mois. TBO valeur centrale estimée : 40 000 h (par analogie moteurs stationnaires GNL — MAN, Wärtsilä). Détail : Apport Titane ÉREV Aviation Gamme V4.

5.2 Feuille de route commune

Période	Actions communes	① VTOL	② 15 pax	③ ATR-72	④ Long-courrier
2026–2028	Banc essai ÉREV Atkinson méthane · AVC vibratoire · Turbocompresseur altitude · Dialogue EASA · Qualification capteurs CH ₄	Démonstrateur 1:2 non-habité	Concept + maquette réservoirs GNL	Retrofit banc sol 1 ATR-72	Études Airbus/RR turbofan méthane
2028–2031	Qualification fatigue réservoirs GNL composites · Premiers vols bio-GNL/GNV · Certification partielle EASA	Prototype habité (CS-27)	Premier vol démonstrateur	Premier vol ATR-72 ÉREV	Démonstrateur turbofan méthane

Période	Actions communes	① VTOL	② 15 pax	③ ATR-72	④ Long-courrier
2031–2035	Certification ①②③ · Déploiement infra GNV/GNL aéroports · Montée bio-GNL Phase 2 Résilience	Entrée service ①	Certification + service ②	Entrée service ③	Premier vol ④
2035–2045	Montée bio 10→100 % · Biochar comptabilisé · Contribution flotte à –60/–80 Mt CO ₂ /an France 2045	Montée bio ①	Montée bio ②	Montée bio ③	Certification + montée bio ④

6. Positionnement vs solutions concurrentes

Lecture : chaque ligne est un critère de comparaison. La famille méthane Résilience est en colonne 2 ; les concurrents en colonnes 3, 4, 5.

Critère	Famille méthane Résilience (tous segments)	Kérosène + SAF (voie institutionnelle)	H ₂ liquide -253°C (horizon 2040+)	Électrique batteries (limité régional court)
NOx / PM / Contrails	-40 % / -70 % / -50→90 % Structuel CH ₄ (fossile ou bio)	-1→5 % / -15→25 % / -5→15 % Marginal (chimie kéro inchangée)	-40 % / -70 % / -50→90 % (similaire CH ₄ mais cellule refonte)	0 % en vol (électricité de prod. pas neutre)
Disponibilité 2035 à l'échelle	GNL fossile : existant bio- GNL : filière Résilience déployable	< 6 % SAF réaliste (50 % = ×80 production actuelle)	Incompatibilité physique permanente (densité, température, boil-off) → Voir §9	< 300 km (densité batterie insuffisante)
Long-courrier couvert	Oui — segment ④ Seule solution crédible < 2040	Partiellement (SAF très contraint coût prohibitif)	Non (contraintes physiques permanentes — pas un problème de date)	Non Physiquement impossible
Progressivité sans changer l'avion	Oui — 0→100 % bio sur même appareil même réseau	Partielle (contrainte biomasse et feedstock)	Non (refonte cellule complète)	Non (portée fixée par batterie)
Coût carburant vs kérosène	-15 % (fossile) → -65 % (bio)	+30 à +100 % (SAF 20 % irréductible)	Non défini (H ₂ vert très coûteux)	Faible /kWh mais infra lourde et portée limitée
Analyse détaillée	Voir §9 pour l'analyse complète SAF et H ₂ avec tableaux comparatifs			

7. Agenda de lissage inter-documents

Points identifiés nécessitant consolidation avant publication finale. Chaque item est localisé par segment et porte une action concrète.

Point à consolider	Segment(s)	Action requise
Rendement Atkinson ④ : turbofan ≠ pistons	④	Confirmé dans ce document : le turbofan méthane à sur-détente optimisée ④ atteint 44–48 % — supérieur au turbofan kérosène (42–44 %) grâce au PCI méthane +16 % et à la sur-détente, mais distinct des 52–55 % des pistons Atkinson ①②③. Une note technique dédiée (essais Rolls-Royce / Safran) est nécessaire pour valider précisément ce rendement en conditions de vol réelles.
Vibrations pistons ②③ : documentation AVC équivalente Gyro-Torique	②③	Le Gyro-Torique ① dispose d'un système AVC 4 niveaux documenté (§5 du document Gyro-Torique v2). Les segments ②③ doivent développer un traitement vibratoire équivalent. À formaliser dans les notes techniques 15 places et ATR-72.
KERS descente ②③ : (conservateur)\n~3–5 % (optimiste)\n(corrigé V9)	②③	Estimation : ~5–8 % d'énergie récupérée sur profil 400–800 km. À intégrer dans les bilans énergétiques des notes ATR-72 et 15 places. Le document ATR V1 mentionne la descente sans chiffrer le KERS.
Biochar : extension du bonus aux segments ①②③	①②③	Bonus biochar chiffré sur ④ (Paris–NY). Mêmes principes pour ①②③, volumes proportionnels à la consommation bio-GNL. Ratio EBC : 2,5–3,1 t CO ₂ eq/t biochar. À documenter segment par segment.
Contrails ②③ : ne pas surestimer le bénéfice altitude	②③	Les turboprops (FL180–250) produisent peu de contrails persistants même au kérosène. Le bénéfice méthane sur contrails est donc moindre sur ②③. À préciser dans les documents respectifs pour éviter une surestimation — le bénéfice NO _x /PM reste entier.

Point à consolider	Segment(s)	Action requise
Slip méthane pistons ①②③ : combustion à documenter	①②③	Note Aviation V11 précise que les turbines > 1 400°C brûlent 100 % du CH ₄ (slip quasi nul, vérifié Tu-156). Pour les pistons Atkinson ①②③, le slip résiduel doit être documenté sur banc. Impact GWP27,9 à quantifier si > 0,1 %.
Règle GNL/GNV : formalisation dans chaque document segment	①②③④	Règle à inscrire explicitement dans chaque document : GNV 250 bar pour portée < 800 km (infrastructure existante, certification facilitée) ; GNL -162°C pour portée > 800 km (densité énergétique nécessaire). Segment ② : GNL par défaut, note GNV en option.
Volume réservoirs GNV 250 bar vs GNL sur segment ③ (ATR-72, mission 800 km)	③	Densité GNV 250 bar : ~180 kg/m ³ vs GNL : 422 kg/m ³ . Pour 1 360 kg GNV (mission 800 km), volume brut ~7,5 m ³ (vs ~3,2 m ³ GNL). Intégration difficile dans fuselage ATR-72 : cylindres fort diamètre créant traînée potentielle en nacelle externe. À étudier lors du design : option GNV < 800 km à valider aérodynamiquement. Règle GNL/GNV maintenue (portée déterminante), mais la contrainte volumique GNV doit figurer dans le bilan de masse ATR-72 V3. (Source : analyse Gemini juillet 2026)

8. Message aux décideurs

Depuis cinquante ans, la stratégie climatique de l'aviation consiste à réduire progressivement les émissions d'un carburant fossile. Le Programme Résilience propose un changement de paradigme : remplacer ce carbone fossile par un carbone biogénique, tout en retirant durablement une fraction de ce carbone du cycle atmosphérique grâce au biochar. L'objectif n'est plus seulement de ralentir le changement climatique — c'est de contribuer à inverser progressivement son évolution. Ce changement de paradigme repose sur une démonstration physique et industrielle, pas sur une vision.

Le SAF n'est pas une solution de décarbonation de l'aviation. L'hydrogène liquide présente des contraintes physiques structurelles pour les contraintes du long-courrier commercial. C'est une loi physique, pas un problème de date.	50 % de SAF atteindrait le même résultat CO₂ que le GNL fossile (−37 %). Les analyses montrent que SAF ne décarbone pas l'aviation — il atteint à grand frais le point de départ du méthane fossile. Ce point est lui-même inatteignable : < 6 % de SAF réaliste en 2035. Le SAF ne touche structurellement ni les NO_x, ni les particules, ni les contrails (> 50 % du forçage radiatif aviation sur 20 ans). Analyse complète et tableaux → §9. Trois handicaps physiques permanents : liquéfaction à −253°C perd 30–35 % de l'énergie du carburant ; réservoirs ×3,8 vs GNL à énergie égale (fuselage non viable) ; boil-off 0,3–0,5 %/h inévitable — 7–10 % du carburant perdu en 48h d'escale. Ces contraintes sont des propriétés de la molécule H₂. Ces contraintes découlent des propriétés thermodynamiques fondamentales de la molécule H₂. Analyse complète et tableaux → §9.
Le méthane est disponible maintenant, sur toute la gamme.	GNL/GNV fossile dès aujourd'hui. Bio-GNL progressif via filière Résilience. Même appareil, même réseau, 0→100 % bio sans modification. NO_x/PM/contrails : bénéfices immédiats et permanents. Du VTOL au long-courrier, une seule architecture, une seule filière.
La France a tous les atouts pour être pionnière.	Airbus (cellules), Safran (moteurs, ENGINEUS), Aura Aero (régional), filière Résilience (carburant), infrastructure GNL maritime. La fenêtre est 2026–2028. Après, l'inertie institutionnelle consolide des solutions incomplètes.

9. Analyse détaillée — Kérosène/SAF et Hydrogène liquide

Ce chapitre développe les arguments synthétisés aux §2, §6 et §8 avec les tableaux comparatifs de référence.

9.1 Le SAF : pourquoi ce n'est pas une solution de décarbonation

Le SAF est présenté comme la voie prioritaire de décarbonation de l'aviation. L'analyse chiffrée montre qu'il ne peut pas remplir ce rôle — ni en volume disponible, ni sur l'ensemble des polluants.

9.1.1 Combien de SAF pour égaler le CO₂ du GNL fossile ?

Le GNL fossile réduit le CO₂ de –37 % vs kérosène. Pour atteindre ce même résultat avec du SAF :

Filière SAF	Réduction CO ₂ / filière	% SAF nécessaire pour égaler GNL fossile (–37 %)	Faisabilité 2035
HEFA (huiles usagées)	–80 % / t SAF	46,5 %	Impossible — totalité des huiles usagées mondiales (~6 Mt/an) = seulement 3–4 % des besoins
Fischer-Tropsch biomasse	–70 % / t SAF	53,1 %	Impossible — biomasse insuffisante, concurrence alimentaire
Power-to-Liquid (H ₂ vert)	–90 % / t SAF	41,3 %	Impossible — 150 Mt PtL = 1 500–2 000 TWh élec. renouvelable supplémentaire = 18–25 % de toute la production renouvelable mondiale actuelle, rien que pour l'aviation
SAF moyen réglementaire	–65 % / t SAF	57,2 %	Très difficile. SAF mondial 2025 : 1,9 Mt/an = 0,6 % du kérosène. 50 % SAF = x80 la production actuelle. Willie Walsh (DG IATA, jan. 2026) : objectifs SAF 2035 "hors d'atteinte".

Filière SAF	Réduction CO ₂ / filière	% SAF nécessaire pour égaler GNL fossile (-37 %)	Faisabilité 2035
GNL fossile méthane (référence Résilience)	—	0 % SAF Disponible MAINTENANT	Oui — infrastructure GNL maritime existante. Même résultat CO ₂ que 46,5 % de HEFA, PLUS NO _x -40 %, PM -70 %, contrails -50 à -90 % que le SAF ne touche pas.

Source : Note technique Aviation Programme Résilience V11 · IATA SAF Report 2025 · EASA Production SAF 2024 · Transport & Environment SAF Europe 2024

9.1.2 Ce que le SAF ne touche pas : NO_x, particules, contrails

Polluant	Part forçage radiatif aviation 20 ans (IPCC AR6)	SAF 50 %	GNL méthane fossile	Mécanisme	Source
CO ₂	~35 %	-18 % (50 % × 65 % moyenne réglementaire)	-37 % (fossile) → -75 % (bio+biochar)	PCI +16 % + rendement Atkinson supérieur	Note Résilience V11 NIST CH ₄
NO _x	~15 %	0 % (chimie kérosène inchangée)	-40 % structurel (tous mélanges bio/fossile)	Température combustion plus basse (mécanisme de Zeldovich)	IPCC AR6 WG1 Zeldovich 1946
Particules fines	~10 %	-15 à -25 % (partiel — réduction aromatiques)	-70 % structurel (tous mélanges bio/fossile)	CH ₄ pur : zéro soufre ni aromatiques générateurs de suies	ICAO Doc 9889 Tu-156 1996

Polluant	Part forçage radiatif aviation 20 ans (IPCC AR6)	SAF 50 %	GNL méthane fossile	Mécanisme	Source
Contrails (traînées de condensation)	~40 % (polluant dominant sur 20 ans)	-5 à -15 % (très marginal)	-50 à -90 % (FL350+, long-courrier)	T° combustion + absence noyaux de condensation (soufre, suies)	IPCC AR6 WG1 Lee et al. 2021
TOTAL forçage radiatif	100 %	Réduit ~20–25 % (CO ₂ + PM partiel seulement)	Réduit ~60–70 % (tous vecteurs simultanément)	Méthane traite tous les polluants par sa chimie propre	IPCC AR6 WG1 Lee et al. 2021

Conclusion SAF : le SAF constitue une solution de transition utile à court terme, mais présente des contraintes de mise à l'échelle mondiale. Les acteurs de la filière eux-mêmes reconnaissent l'impossibilité d'atteindre les volumes nécessaires (Willie Walsh, DG IATA, janvier 2026). Au-delà des volumes, le SAF ne touche pas structurellement les 65 % du forçage radiatif aviation liés aux NOx, particules et contrails. Et le GNL fossile fait déjà mieux sur le CO₂ seul, sans attendre la filière SAF.

9.2 L'hydrogène liquide : trois handicaps physiques permanents

Ces contraintes ne sont pas des problèmes de maturité technologique. Ces contraintes découlent des propriétés fondamentales de la molécule H₂, fixées par la mécanique quantique et la thermodynamique. Elles ne changeront pas en 2040, ni jamais.

9.2.1 Handicap 1 — Liquéfaction énergivore

Carburant	Température de liquéfaction	Énergie de liquéfaction (% du PCI carburant)	Énergie nette disponible
Kérosène	Liquide à T° ambiante (pas de liquéfaction)	0 %	100 % du PCI

Carburant	Température de liquéfaction	Énergie de liquéfaction (% du PCI carburant)	Énergie nette disponible
GNL méthane	-162°C	8–12 % du PCI (partiellement récupérable par échangeur thermique)	88–92 % du PCI + valorisation froid cryogénique (+3–8 kW)
H₂ liquide	-253°C (4 K au-dessus du zéro absolu)	30–35 % du PCI — contrainte thermodynamique permanente (limite de Carnot)	65–70 % du PCI net après liquéfaction

9.2.2 Handicap 2 — Volume des réservoirs : calcul pour 1 000 km long-courrier

Le calcul doit intégrer trois éléments : densité volumique du carburant, PCI massique, ET rendement de la chaîne de conversion. Ce rendement diffère fondamentalement selon l'architecture moteur — il faut donc distinguer les systèmes ÉREV pistons (segments ①②③), le turbofan méthane long-courrier (④), le turbofan H₂ et la pile à combustible H₂.

a) Rendements selon l'architecture de propulsion

Architecture	Carburant	Chaîne de conversion	Rendement global chaîne
Turbofan kérosène (référence long-courrier)	Kérosène	Combustion directe → turbine → poussée	~42–44 %
ÉREV Atkinson pistons (segments ①②③)	GNL / GNV méthane	Pistons Atkinson régime fixe (52–55 %) → générateur synchrone (95–97 %) → moteurs élec. hélices / rotors (93–95 %)	~41–46 % (chaîne complète) (Atkinson 52–55 % x gén. 96 % x mot. élec. 94 % x hélice 85–87 % — hélice incluse V9)

Architecture	Carburant	Chaîne de conversion	Rendement global chaîne
Turbofan méthane à sur-détente optimisée (segment ④ long-courrier)	GNL méthane	Turbofan méthane à sur-détente optimisée → poussée directe (sans conversion élec.) PCI méthane +16 % vs kérosène Principe Atkinson NON applicable à une turbomachine	~44–48 % (turbomachine méthane optimisée) ≠ 52–55 % pistons À valider par note technique dédiée
H₂ — Option A Turbofan H₂ direct	H ₂ liquide	Turbofan H ₂ → poussée directe NOx élevés (T° combustion H ₂ > kérosène) Mais perte liquéfaction –30 à –35 % en amont	~43–46 % (avant déduction perte liquéfaction)
H₂ — Option B Pile à combustible PEM + élec.	H ₂ liquide	Pile PEM (55–60 %) → moteurs élec. (93–95 %) Meilleur rendement intrinsèque mais puissance massique pile : 1–2 kW/kg vs turbofan : 10–15 kW/kg → masse rédhibitoire	~50–57 % (meilleur rendement mais masse et volume rédhibitoires)

Note : la pile à combustible H₂ offre le meilleur rendement intrinsèque de toutes les options — mais la puissance massique des piles PEM actuelles (1–2 kW/kg) est 7 à 10 fois inférieure à celle d'un turbofan (10–15 kW/kg). Pour un long-courrier nécessitant 60 000–80 000 kW, les piles seules pèseraient 30 000–80 000 kg — soit plus que la masse à vide de l'avion. Cette contrainte ne disparaîtra pas avant plusieurs décennies.

b) Volume de réservoir par architecture — 1 000 km, 300 pax

PCI net = PCI brut diminué des pertes de liquéfaction. Rendement = chaîne complète selon architecture.

Paramètre	Kérosène Turbofan 42 %	GNL méthane ÉREV Atkinson Chaîne 48 %	GNL méthane Turbofan ④ 46 %	H ₂ liquide Turbofan 44 % (brut)	H ₂ liquide Pile PEM 52 % (brut)
Densité liquide (kg/m ³)	800	420	420	70	70

Paramètre	Kérosène Turbofan 42 %	GNL méthane ÉREV Atkinson Chaîne 48 %	GNL méthane Turbofan ④ 46 %	H ₂ liquide Turbofan 44 % (brut)	H ₂ liquide Pile PEM 52 % (brut)
PCI massique brut (MJ/kg)	43	50	50	120	120
Perte liquéfaction	0 %	-8 à -12 % (partiel. récupéré)	-8 à -12 %	-30 à -35 % non récupérable	-30 à -35 % non récupérable
PCI volumique net (MJ/L)	34,4	~19,5	~19,5	~5,5	~5,5
Rendement chaîne propulsion	42 %	48 % (Atkinson + élec.)	46 % (turbofan méthane)	44 % (turbofan H ₂)	52 % (pile PEM + élec.)
Énergie utile / litre (MJ/L net × rdt)	$34,4 \times 0,42 = 14,4$ MJ/L	$19,5 \times 0,48 = 9,4$ MJ/L	$19,5 \times 0,46 = 9,0$ MJ/L	$5,5 \times 0,44 = 2,4$ MJ/L	$5,5 \times 0,52 = 2,9$ MJ/L
Volume réservoir (1 000 km, 300 pax)	~263 m ³ (référence)	~404 m ³ (+54 % vs kéro) masse -40 % → bilan masse favorable	~421 m ³ (+60 % vs kéro) masse -40 % → bilan masse favorable	~1 579 m ³ (+500 % vs kéro) ×3,9 vs GNL FUSELAGE NON VIABLE	~1 306 m ³ (+396 % vs kéro) ×3,2 vs GNL FUSELAGE NON VIABLE
% fuselage A350 (~1 000 m ³)	~26 % → viable	~40 % → viable	~42 % → viable	~158 % Impossible même avec cellule refaite de zéro	~131 % Impossible même avec cellule refaite de zéro

Conclusion : quelle que soit l'architecture H₂ retenue (turbofan direct ou pile à combustible), le volume de réservoir dépasse 130 % du fuselage total d'un A350. L'H₂ liquide est physiquement incompatible avec la géométrie d'un avion long-courrier — pas en raison d'un manque de maturité technologique, mais par une propriété fondamentale de la molécule H₂ fixée par la mécanique quantique.

9.2.3 Handicap 3 — Boil-off inévitable

Critère	GNL méthane	H ₂ liquide	Source
Taux de boil-off	0,1–0,3 % / jour (isolation MLI standard)	0,3–0,5 % / heure (même avec la meilleure MLI disponible)	GIIGNL 2023 AIGA Doc 2022
Perte après 48h d'escale	0,2–0,6 % du carburant → négligeable, gérable	7–10 % du carburant → rédhibitoire sur rotation longue	Calcul Résilience V11
Nature du gaz évaporé	CH ₄ → valorisable comme carburant ÉREV (boil-off = énergie utile)	H₂ pur rejeté à l'atmosphère GWP indirect ≈ 11 sur 100 ans (effet sur O₃ stratosphérique et CH₄ atmosphérique)	IPCC AR6 WG1 Ch. 6
Contrainte physique	Améliorable marginalement (MLI avancée, isolation active)	Irréductible : –253°C est 4 K au-dessus du zéro absolu. Aucun isolant ne peut supprimer le boil-off.	Thermodynamique (loi de Carnot)

Conclusion H₂ : ces trois handicaps sont des propriétés fondamentales de la molécule H₂ fixées par la mécanique quantique et la thermodynamique. Ces contraintes sont de nature thermodynamique fondamentale. L'H₂ liquide n'est pas une solution en attente de maturité : il est structurellement incompatible avec les contraintes du long-courrier commercial. Cela n'exclut pas des démonstrateurs régionaux très court-courrier, mais conduit à écarter l'option long-courrier H₂ à horizon 2045 et au-delà.

10. Pourquoi cette architecture est devenue possible aujourd'hui

L'architecture ÉREV Atkinson méthane n'est pas un concept ancien remis au goût du jour. C'est une architecture rendue possible par la convergence de huit avancées technologiques intervenues entre 2015 et 2025, dont aucune n'existait simultanément il y a vingt ans.

Technologie clé	Situation avant 2010	Situation 2025	Impact sur l'architecture ÉREV méthane
Moteurs électriques aéronautiques haute puissance (> 500 kW continu)	Inexistants en aéronautique certifiée. Seul usage : propulsion spatiale.	Safran ENGINEUS 100 kW certifié. MagniX 375 kW en service (Cessna Caravan électrique). Rolls-Royce Spirit of Innovation 400 kW, 623 km/h.	Permet la traction 100 % électrique des hélices/rotors ①②③ Jusqu'à 2×900 kW sur ATR-72
Électronique de puissance bus DC 800 V	Bus 48V ou 270V DC standard. Conversions 800V expérimentales.	Standard automotive haute perfo. (Porsche Taycan 2019, Hyundai Ioniq 5, Kia EV6). ÉRA Aura Aero : 800V natif.	Réduit les pertes par effet Joule. Diminue la masse des câbles. Convergence coûts composants automotive → aéronautique.
Batteries LFP haute puissance (pics de puissance décollage)	Énergie spécifique < 150 Wh/kg. Cyclage limité. Risque thermique.	LFP 200+ Wh/kg (2025). Cyclage > 3 000 cycles. Sécurité intrinsèque (pas de fuite thermique).	Batterie tampon 150–200 kWh certifiable en aviation. Masse < 1 000 kg. Sécurité EASA CS-23/25.
Calculateurs FBW temps réel (< 10 ms) multi-actionneurs	FBW disponible sur avions civils lourds (A320, B777) mais pas sur petits appareils.	FBW disponible sur drones certifiés (Airbus Zephyr, Ardupilot certifié ASTM). Fréquence 1 000 Hz standard.	Contrôle 6–8 rotors indépendants (Gyro-Torique ①). Gestion KERS en temps réel. Sécurité AVC active.
Réservoirs composites cryogéniques légers (Type IV + MLI)	Réservoirs cryogéniques en acier inoxydable. Masse rédhibitoire pour l'aviation.	Réservoirs composites carbone Type IV : –40 % masse vs acier. MLI 30 couches : boil-off 0,1 % / jour GNL.	GNL embarqué dans fuselage < 42 % du volume A350. GNL tore structurel (Gyro-Torique ①).

Technologie clé	Situation avant 2010	Situation 2025	Impact sur l'architecture ÉREV méthane
Simulation numérique combustion méthane (CFD haute fidélité)	CFD combustion disponible mais temps de calcul prohibitif (semaines).	CFD temps réel possible. Validation numérique combustion CH ₄ < 2 000 heures. Gémeau numérique moteur.	Conception moteur Atkinson optimisé méthane sans prototype physique préalable. Réduit délai de 3–5 ans.
Filière biométhane industrialisable (pyrogazification + Sabatier)	Biogaz agricole marginalement développé. Méthanisation complexe, coûts élevés.	3 lauréats GRDF 2026 sur pyrogazification + Sabatier. Stiesdal SkyClean (DK) : validation cascade digestat.	Carburant bio-CH ₄ disponible à horizon 2028–2030 pour les premiers vols ÉREV. Même filière, 4 segments.
Titane Ti-6Al-4V aéronautique (8e technologie clé — ajouté V9)	Alliage réservé aérospace haute performance. Fabrication additive LPBF coûteuse. Usinage 4× plus difficile que aluminium.	Ti-6Al-4V AMS 6931 : standard industriel. Precision Castparts, Safran Nacelles. Fabrication additive LPBF opérationnelle. A350 : 40 % titane en masse structurelle.	Groupe ÉREV Atkinson en titane Ti-6Al-4V : –45 % masse sur pièces structurelles. TBO valeur centrale 40 000 h (vs 6 500 h aubes HP turbine). ROI gamme 25–42 M EUR d'économie maintenance sur 20 ans. Décision de conception native.

La convergence de ces huit technologies entre 2015 et 2025 crée une fenêtre d'opportunité industrielle unique. En 2005, aucune de ces briques n'était disponible simultanément. En 2025, toutes sont disponibles ou en phase de certification. C'est cette convergence qui rend l'architecture ÉREV Atkinson méthane possible aujourd'hui — et la fenêtre de décision 2026–2028 est précisément le moment où consolider ou manquer cette opportunité.

10.2 Le biométhane : d'un carburant renouvelable à un vecteur de restauration du climat

L'originalité du Programme Résilience ne se limite pas à un carburant alternatif. Elle repose sur un triptyque qui n'existe dans aucun autre scénario de décarbonation de l'aviation. La distinction fondamentale est celle-ci : sans biochar, on réduit les émissions. Avec biochar, on retire

progressivement du CO₂ atmosphérique. Ce n'est pas une nuance — c'est un changement de paradigme climatique. Le biochar n'est pas un simple co-produit de la filière : il en est le verrou climatique.

Niveau	Ce que fait le biométhane Résilience	Ce que ne fait aucun autre scénario
1. Réduire les émissions	GNL/GNV fossile : -37 à -50 % CO ₂ dès maintenant. NO _x -40 %, PM -70 %, contrails -50 à -90 %. Bio-GNL 50 % : -70 à -72 % CO ₂ .	SAF : -18 % forçage radiatif global. H ₂ : refonte cellule + infra inexistante. Electrique : limité < 300 km.
2. Séquestrer durablement le carbone	Biochar co-produit pyrogazification : 2,5–3,1 t CO ₂ eq séquestrées / t biochar (ratio EBC/Puro.earth certifié). Stabilité millénaire si H/C < 0,4. LE VERROU CLIMATIQUE DU PROGRAMME : sans biochar → on réduit les émissions. avec biochar → on retire du CO ₂ atmosphérique. Ce n'est pas la même chose.	Aucun autre scénario aviation ne génère un co-produit de séquestration carbone lors de la production du carburant. SAF : zéro séquestration. H ₂ : zéro séquestration. Electrique : zéro séquestration.
3. Restaurer le cycle du carbone	À 150 sites Résilience × 1 000 t/j × 2045 : biochar + CO ₂ biogénique stabilisé → contribution au retrait net de CO ₂ atmosphérique (-60 à -80 Mt CO ₂ /an France).	Les scénarios classiques visent la neutralité. Résilience vise le retrait net — condition nécessaire pour un retour à un climat acceptable à horizon 2100–2200.

Conclusion : à l'état actuel des connaissances et des technologies industrialisables pour l'aviation commerciale mondiale, le méthane — puis le biométhane issu d'une filière intégrant la séquestration durable du carbone — est la seule architecture capable de répondre simultanément aux contraintes climatiques, énergétiques, industrielles et économiques du secteur aérien. Cette conclusion est une démonstration physique et industrielle, sous réserve de validation expérimentale pour les paramètres non encore mesurés en conditions aéronautiques.