

AVIATION MÉTHANE — SEGMENT ③

ATR-72 ÉREV GNV — Régional 70 passagers 400–700 km

Document technique — Programme Résilience V11

Juillet 2026 — Document de travail interne

Ce document couvre le segment ③ régional 70 passagers. Pour le dénominateur commun (bilan climatique, filière Résilience, comparaison SAF/H₂), se référer à la Matrice de famille V8.

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

1. Positionnement dans la gamme

Le segment ③ est le retrofit régional le plus crédible du marché : l'ATR-72-600 existant est la plateforme de référence mondiale du turboprop régional (600 exemplaires en service). La conversion ÉREV GNV remplace les deux turbopropulseurs PW127M par deux hélices électriques alimentées par des moteurs Atkinson pistons à régime fixe + génératrices, sans modifier la cellule.

Critère	Segment ③ ATR-72 ÉREV	Concurrent ATR-72 kérosène
Segment / usage	Régional 70 pax — 400–700 km Remplacement ATR-72 kérosène	Régional 70 pax — 400–700 km Turboprop kérosène Jet-A1
Propulsion	2 hélices électriques + 2 × 900 kW Atkinson GNV + 200 kWh batterie tampon LFP	2 turbopropulseurs PW127M 2 × 2 050 kW thermiques
Carburant	GNV 250 bar (réservoirs Type IV) → Bio-GNV progressif filière Résilience Note : GNL –162°C si > 800 km	Kérosène Jet-A1 (réseau mondial existant)
Rendement chaîne propulsion	45–48 % (Atkinson pistons) × 96 % génératrice × 94 % moteur élec. × 87 % hélice = ~41–46 % chaîne complète (vs 47–50 % sans rdt hélice)	~38 % turbopropulseur kérosène classique
CO ₂ vs référence	–45 à –48 % (GNV fossile) –70 à –72 % (50 % bio-GNV) → Voir §8 bilan carbone	Référence (0 %)
Coût carburant / 400 km	~390–550 € (400 kg GNV × 0,07 €/kWh bio-GNV filière Résilience, ou × 0,10–0,12 €/kWh GNV fossile réseau) = 1,4–2,0 €/100 pax·km –40 à –57 % vs kérosène	~900 € (750 kg kérosène × 1,2 €/kg) = 3,2 €/100 pax·km
Émissions CO ₂ / 100 pax·km	~0,0–0,1 kg CO ₂ /pax·100 km (bio-GNV biogénique)	~8,4 kg CO ₂ /pax·100 km (kérosène fossile)

2. Architecture ÉREV — Chaîne de propulsion

L'architecture ÉREV découple totalement la génération d'énergie (moteurs Atkinson pistons à régime fixe) de la propulsion (hélices électriques). La puissance variable est gérée électriquement — les moteurs Atkinson fonctionnent toujours à leur rendement maximal.

Élément	Valeur / Spécification	Commentaire technique
Puissance hélice équivalente	2 × 1 800 kW	Proche ATR-72 original (2 × 2 050 kW thermiques). Légère réduction compensée par meilleur rendement moteur.
Puissance électrique continue en croisière	2 × 800 kW = 1 600 kW	Montée plus gourmande (~2 × 1 200 kW), croisière plus basse. Batterie tampon gère les transitoires.
Moteurs Atkinson GNV (2 groupes)	2 × 6 cylindres, 2 × 900 kW élec. Régime fixe ~2 500 tr/min Rendement 45–48 %	Dérivés moteurs auto/industriels optimisés méthane. Régime fixe = toujours au pic de rendement Atkinson. Indice octane CH ₄ = 130 → taux compression élevé sans cliquetis.
Génératrices (2 × couplées)	2 × génératrices aimants permanents Bus DC 800 V Rendement 95–97 %	Standard électromobilité haute performance. Convergence coûts composants automobile → aéronautique.
Moteurs électriques hélices (2 nacelles)	2 × 1 200 kW crête Densité > 5,4 kW/kg Masse : 440 kg total	Suppression turboprops PW127M (–960 kg) + boîtes transmission (–320 kg). Bruit réduit. Contrôle fin de la puissance.
Batterie tampon LFP (60 kWh)	60 kWh — technologie LFP 15C haute puissance Masse : 480 kg	Décollage + montée + boost + secours. Recharge partielle en croisière (prolongateur seul couvre). KERS en descente → 5–8 % énergie récupérée.
Électronique de puissance + câblage HV	Onduleurs SiC 800 V Câblage HV blindé Masse : 312 kg	Carbure de Silicium (SiC) : pertes minimales à haute fréquence de commutation. Câblage HV : masse réduite vs basse tension.
KERS — Récupération phases descente	Hélices en mode\ngénérateur en descente\n~3–5 % énergie récupérée\n(borne conservatrice)\ncible optimiste : 5–8 %	Sur profil 400–700 km : recharge batterie tampon en descente. ATR kérosène brûle du carburant même en descente — ÉREV récupère de l'énergie.

3. Bilan de masse — Mission 800 km, 70 passagers (MTOW 23 000 kg)

L'économie de 590 kg de carburant à chaque vol compense directement la moitié du surpoids fixe de l'architecture ÉREV. L'appareil reste sous la limite MTOW tout en préservant 100 % de la charge utile.

Poste de masse	ATR-72-600 standard (turboprop Jet-A1)	ATR-72 ÉREV Atkinson (segment ③ Bio-GNV)	Écart (Δ)	Explication
Masse à vide opérationnelle (OEW)	13 500 kg	14 820 kg	+1 320 kg	Chaîne ÉREV + réservoirs GNV
Masse de carburant (800 km)	1 950 kg kérosène	1 360 kg GNV	–590 kg	PCI +16 % + rdt 43,7 % vs 37 %
Charge utile (70 pax)	6 650 kg	6 650 kg	0 kg	100 % préservée
Masse totale au décollage (TOW)	22 100 kg	22 830 kg	+730 kg	< 23 000 kg MTOW ✓

3.1 Décomposition du surpoids OEW +1 320 kg

Sous-ensemble	Masse	Détail / Compensation
Moteurs électriques nacelles (2 × 1 200 kW)	+440 kg	Suppression turboprops PW127M : -960 kg Suppression boîtes de transmission : -320 kg Bilan nacelles : -840 kg net favorable
Moteurs Atkinson 2 × 900 kW\n+ génératrices intégrées\nΔncertitude masse critique	+1 520 kg\n(hypothèse optimiste\nà valider sur banc)	ΔNCERTITUDE CRITIQUE identifiée (Gemini/GPT 2026). Ratio 0,84 kg/kW (hypothèse initiale) est optimiste vs données industrielles : moteur 6 cyl. suralimenté seul ~800–900 kg + génératrice 900 kW ~400–600 kg = ~1 400 kg/unité × 2 = ~2 800 kg réaliste. Écart potentiel +1 280 kg non comptés → TOW estimé ~25 000 kg > MTOW actuel 23 000 kg. Solutions : (1) MTOW augmenté par ATR sur fuselage allongé existant ; (2) réduction charge utile -850 kg → 13–14 pax ; (3) profil portée réduit avec moins de carburant. Programme de mesure masse réelle sur banc Atkinson 900 kW requis avant engagement design.
Génératrices haute tension couplées (2×)	+410 kg	Inclus dans le groupe motopropulseur Atkinson. Couplage direct arbre moteur.
Batterie tampon LFP 60 kWh (15C)	+480 kg	Décollage + montée + secours. Recharge partielle en croisière. KERS descente valorisé.
Onduleurs SiC + câblage HV	+312 kg	Bus DC 800 V standard automotive. Convergence coûts composants électronique de puissance.
Système AVC 4 niveaux (anti-vibrations)	+42 kg	Masse très faible pour un gain majeur (confort cabine équivalent turboprop moderne). Voir §5.
Réservoir cryogénique GNV (Type IV) + circuits de régazéification	+480 +136 = +616 kg	Réservoir Type IV composite carbone. Volume : 2–2,2 m³ pour 400 kg GNV (250 bar). Régazéification + régulation pression intégrées.
SURPOIDS TOTAL OEW	+1 320 kg	Compensé à 45 % par économie carburant -590 kg par vol.

3.2 Calcul de la consommation GNV — Justification des -590 kg

Énergie utile requise aux hélices pour 800 km, 70 pax : ~23,8 GJ.

	ATR-72 kérosène	ATR-72 ÉREV GNV
Énergie utile aux hélices	~23,8 GJ	~23,8 GJ (identique)
Rendement global propulsion	~37 % (turboprop kérosène)	~43,7 % (chaîne ÉREV complète)
PCI carburant	43 MJ/kg (kérosène)	50 MJ/kg (méthane)
Masse carburant mission	23,8 GJ ÷ (43 × 0,37) = 1 498 kg + réserves réglementaires (45 min) = 1 950 kg kérosène	23,8 GJ ÷ (50 × 0,437) = 1 089 kg + réserves réglementaires = 1 360 kg GNV
Économie masse carburant	Référence	-590 kg (-30 %) Compense 45 % du surpoids OEW

4. Réservoirs GNV 250 bar — Spécifications

Le GNV comprimé à 250 bar (vs GNL –162°C pour les segments longue distance) est le choix optimal pour le segment ③ : infrastructure existante (réseaux camions/bus), certification plus simple, pas de cryogénie embarquée. Portée < 800 km : GNV suffit. Portée > 800 km : GNL possible (voir règle §1).

Paramètre	Valeur	Justification / Commentaire
Pression de stockage	200–250 bar	Standard industrie (bus, camions, navires). Matériaux et équipements éprouvés. Réseau de distribution existant.
Technologie réservoir	Type IV composite carbone (liner HDPE + enroulement filamentaire)	Rapport masse/contenance optimal. Tenue en fatigue certifiée (cycles pression). Standard véhicules lourds NGV.
Volume nécessaire (400 kg GNV, mission 800 km)	2 000–2 200 L (2–2,2 m³)	Densité GNV 250 bar : 0,18–0,20 kg/L. Intégration en section arrière fuselage hors zone sous pression. Impact limité sur volume cabine.
Masse réservoirs + équipements	400–500 kg (sans carburant)	Inclus dans bilan masse OEW §3. Avitaillement : stations GNV 250 bar standard (même technologie bus/camions → réseau dense existant).
Règle de choix GNV vs GNL	GNV < 800 km GNL > 800 km	Pour missions > 800 km (ex. liaisons transnationales), réservoirs GNL –162°C nécessaires (densité volumique 0,42 kg/L vs 0,19 kg/L GNV). Même moteurs Atkinson, même architecture — seul le réservoir change.
Infrastructure sol existante	Réseau GNV 250 bar camions/bus (dense, existant)	Avantage décisif vs GNL : pas d'investissement cryogénique aéroport. Avitaillement GNV = même équipement que les bus urbains. Coût infrastructure sol ≈ 0 € supplémentaire à court terme.

5. Contrôle actif des vibrations (AVC) — 4 niveaux

L'intégration de moteurs à pistons en aéronautique pose un défi structural majeur : les vibrations basse fréquence et acyclismes générés par les impulsions de pression dans les cylindres. Contrairement à une turbomachine (rotation continue), un moteur thermique alternatif crée des efforts harmoniques transmis aux fuselages et voilures. Le système AVC 4 niveaux ramène le niveau vibratoire à celui d'un turboprop moderne.

→ *Gyro-Torque Bio-GNL v2.0 §5 — AVC 4 niveaux documenté sur VTOL (architecture de référence)*

Niveau	Nom	Bande de fréquence	Mécanisme
1	Neutralisation à la source (lissage couple/acyclisme via génératrice)	10–300 Hz (harmoniques d'allumage)	Génératrice à aimants permanents forte inertie dynamique. Variateur de puissance réagit à chaque impulsion de combustion (μs) : pic d'absorption lors explosion, micro-couple d'assistance lors compression. Lisse le couple en sortie de vilebrequin par voie électromagnétique. Absorbe jusqu'à 75 % de l'acyclisme avant transmission aux supports.
2	Masselottes d'équilibrage dynamiques (arbres contrarotatifs)	20–150 Hz (bielle / manivelle)	2 arbres contrarotatifs d'équilibrage en bas-carter, déphasage variable contrôlé par actionneurs piézoélectriques. Annulation mécanique directe des forces d'inertie 1er et 2e ordre (moments de galop et de pilon). Adapté au cycle Atkinson dont la cinématique diffère du cycle Otto.
3	Bâtis-moteurs actifs (suspension)	5–500 Hz (filtrage de structure)	Groupe moteur + génératrice sur berceau suspendu. Chaque plot = élastomère haute performance (isolation passive HF) + actionneur magnétostrictif Terfenol-D (boucle régulation). Accéléromètres triaxiaux au carter mesurent le vecteur de force instantané.

Niveau	Nom	Bande de fréquence	Mécanisme
	magnétostrictive + piézocéramique)		Actionneur génère déformation opposée (déphasage 180°). Atténuation > 30 dB (96 % des efforts) transmis à la voilure ou au fuselage.
4	Annulation acoustique cabine (ASAC — Active Structural Acoustic Control)	20–1 000 Hz (atténuation perçue passagers)	Actionneurs inertiels piézoélectriques compacts répartis sur cadres fuselage et couples principaux. Microphones de cabine mesurent le niveau sonore résonnant. Panneaux de doublage cabine équipés d'actionneurs réinjectent des contre-vibrations annulant le bourdonnement basse fréquence (hum).

5.1 Performance globale du système AVC

Critère	Sans AVC (montage rigide)	AVC passif seul (silentblocs élastomères)	Système AVC 4 niveaux (Résilience)
Transmission effort au fuselage (g)	~1,20 g (insupportable)	~0,35 g (acceptable)	< 0,02 g (équivalent turboprop)
Bruit résiduel cabine (dB(A))	92–95 dB(A) (insupportable)	82–85 dB(A) (gênant)	72–74 dB(A) (standard réacteur)
Fatigue structurelle nacelle	Élevée (craques < 5 000 h)	Modérée	Nulle (atténuation > 98 % des pics)
Masse totale système AVC	0 kg	~15 kg	42 kg (compensée par –590 kg carburant)

Conclusion AVC : le système 4 niveaux permet d'obtenir un niveau vibratoire et acoustique en cabine parfaitement comparable à celui d'un turboprop moderne (Dash 8-Q400 ou ATR-72-600), annulant le principal obstacle d'acceptabilité des moteurs thermiques alternatifs en aviation. Masse de 42 kg largement compensée par l'économie carburant.

6. Fuites méthane et contrôle des émissions

GWP100 CH₄ = 27,9 (IPCC AR6). Seuil Résilience : ≤ 1 % fuite contractuel sur toute la chaîne. Au-delà de 3,5 % de fuite, le bénéfice CO₂ est effacé. Sur le segment ③, le verrou principal est le slip méthane des moteurs Atkinson pistons.

Source de fuite	Risque	Contrôle	Niveau résiduel cible
Slip méthane moteurs Atkinson pistons (imbrûlés échappement)	Modéré (à documenter sur banc)	Catalyseur d'oxydation méthane (MOC) sur ligne d'échappement. Technologie existante (industrie stationnaire et maritime, norme EURO 6 VI). Banc essai dédié 2026–2027 pour documentation slip résiduel. Qualification EASA 2028–2030.	< 0,1 % avec MOC (à confirmer sur banc)
Fuites fugitives connectiques GNV 250 bar	Faible (technologie existante)	Raccords double vanne GNV haute pression standard industrie. Détecteurs CH ₄ catalytiques + infrarouge, seuil 0,5 % vol. Contrôles périodiques selon procédures GNV véhicules lourds certifiées.	< 0,5 % vol. → < 0,1 % fuite chaîne complète
Fuites amont (production bio-GNV + compression)	Faible (contrôle filière Résilience)	Boucles fermées de récupération boil-off et fuites filière Résilience. Seuil ≤ 0,5 % vol. sur sites de production (seuil	< 0,5 % amont (seuil Résilience)

Source de fuite	Risque	Contrôle	Niveau résiduel cible
		contractuel Résilience). Monitoring continu CH ₄ capteurs infrarouge.	
BILAN FUITE TOTAL	Seuil critique : 3,5 % efface bénéfice CO₂	MOC + connectiques GNV standard + contrôle filière. Seuil Résilience ≤ 1 % contractuel.	< 1 % total Conservateur ×3,5 vs seuil critique

7. Gestion du centrage (CG) — Réservoirs GNV 250 bar

Sur le segment ③, les réservoirs GNV Type IV sont positionnés en section arrière du fuselage (hors zone sous pression). La vidange progressive déplace le CG vers l'avant. Les leviers de gestion sont similaires au segment ④ mais simplifiés (pas de cryogénie, pas de phases liquide/gaz à gérer).

Levier	Mécanisme	Spécificité GNV vs GNL
Séquencement de vidange (Fuel Scheduling)	FMS gère la vidange selon profil calculé maintenant le CG dans enveloppe autorisée. Soutirage alterné entre réservoirs si configuration multi-réservoirs.	Simplifié vs GNL : gaz comprimé homogène, pas de phases liquide/gaz ni de variations de densité. Jaugeage masse simple (capteurs pression).
FBW / THS (trim automatique)	FBW réajuste en continu l'angle THS pour annuler le moment piqueur lié à l'avancée du CG lors de la vidange arrière.	Identique GNL. Intégré nativement dans l'architecture FBW ÉREV (déjà présent pour gestion puissance hélices).
Jaugeage GNV haute pression	Capteurs de pression multipoints sur réservoirs Type IV. Calculateur déduit masse exacte GNV via équation d'état gaz réel (facteur Z méthane à 250 bar).	Plus simple que GNL : pas de cryogénie, pas de phases mixtes. Précision masse GNV garantie par capteurs pression standard industrie NGV.
Positionnement optimal réservoirs	Réservoirs Type IV en position centrale basse (plancher section milieu) + arrière fuselage. Distribution 60/40 avant/arrière réduit le déplacement CG lors de la vidange.	Avantage GNV : réservoirs cylindriques compacts (2–2,2 m ³ total) permettent une distribution plus flexible qu'un réservoir GNL (volume plus important).

8. Bilan carbone — Mission 400 km, 70 passagers

Indicateur	ATR-72 kérosène	ATR-72 ÉREV GNV fossile	ATR-72 ÉREV Bio-GNV
Coût carburant total (€/100 pax·km)	~3,21 €/100 pax·km (900 € ÷ 280)	~1,39 €/100 pax·km (390 € ÷ 280)	~1,20–1,39 €/100 pax·km (Bio-GNV ≈ même coût ou moins selon filière)
Émissions CO ₂ (kg/pax·100 km)	~8,4 kg CO ₂ /pax·100 km	~4,5–4,8 kg CO ₂ /pax·100 km (–45 à –48 %)	~0,0–0,1 kg CO ₂ /pax·100 km (biogénique — > –90 %)
NOx / Particules fines	Référence	NOx –40 % PM –70 % (chimie CH ₄ structurelle)	NOx –40 % PM –70 % (identique — chimie CH ₄)
Contrails	Référence (FL180–220 : déjà faibles à cette altitude)	Faibles → quasi nuls (FL180–220 + CH ₄) △ Bénéfice moindre qu'en long-courrier	Faibles → quasi nuls (même altitude) Bénéfice NOx/PM reste entier
Rapport coût carburant	Base (1,00)	~–57 % vs base	~–57 % à –65 % vs base

Note contrails §②③ : les turboprops électriques (FL180–220) produisent peu de contrails persistants même au kérosène — la formation des contrails de glace est sensible à l'altitude. Le bénéfice méthane sur les contrails est donc moindre sur ③ qu'en long-courrier ④ (FL350+). En revanche, les bénéfices NOx –40 % et particules –70 % restent entiers et structurels à toutes les altitudes.

→ Bilan climatique complet, mécanismes physiques et comparaison SAF/H₂ : Matrice famille V8 §3 et §9

9. Verrous spécifiques et feuille de route segment ③

→ Verrous communs à toute la gamme (EASA Atkinson pistons, détection CH₄, infrastructure bio-GNV) : Matrice famille V8 §5

Verrou spécifique ③	Nature	Action requise
Qualification slip méthane moteurs Atkinson pistons + certification MOC aviation	Technique + EASA (priorité 1)	Banc essai Atkinson méthane 2026–2027 : mesure slip résiduel. Intégration MOC (catalyseur d'oxydation méthane) sur ligne échappement. Qualification thermique et durabilité EASA 2028–2030. Technologie MOC existante (industrie stationnaire/maritime) à adapter aviation.
Validation vibrations AVC en configuration ATR-72 (banc sol + vol)	Technique (EASA CS-25)	Le Gyro-Torique ① a documenté l'AVC 4 niveaux en VTOL. Sur ATR-72, adapter niveaux 2 (arbres équilibrage) et 3 (bâtis magnétostrictifs Terfenol-D) à la configuration nacelle turboprop. △Point de qualification spécifique niveau 3 : Terfenol-D fragile aux chocs mécaniques et sensible aux cycles thermiques (nacelle ATR –40°C altitude). Qualification tenue long terme Terfenol-D en environnement aéronautique requis. Banc sol 2027–2028. Qualification fatigue structure nacelle 2028–2030.
Turbocompression Atkinson haute altitude (FL180–250) maintien puissance nominale	Technique (turbocompr. méthane)	Moteur Atkinson pistons perd de la puissance avec la densité de l'air à FL180–250. Turbocompresseur méthane : dérivé technologie auto/marine. △Point signalé par GPT : la turbocompression réduit partiellement l'efficacité du cycle Atkinson (la sur-détente est comprimée par la pression de suralimentation). Rendement Atkinson en altitude estimé 42–45 % vs 45–48 % au sol. Validation maintien ~900 kW élec par moteur à FL250 + mesure rendement réel en altitude.
Certification réservoirs GNV Type IV en fuselage ATR-72 (EASA CS-25)	Réglementaire (nouveau pour CS-25)	Réservoirs GNV Type IV certifiés pour véhicules terrestres (NGV). Chemin de certification aéronautique EASA CS-25 à établir — AUCUN précédent en CS-25 (précédents CS-23 seulement sur avions légers). Qualification fatigue cyclique

Verrou spécifique ③	Nature	Action requise
		(cycles pression), crash, fuite. ΔDélai plus prudent : 2029–2032 (vs 2026–2029 initial). Programme d'essais dédié EASA à lancer dès 2026.
KERS descente ③ : gain à chiffrer précisément	Technique (à documenter)	Estimation actuelle : ~3–5 % énergie récupérée (borne conservatrice) à ~5–8 % (borne optimiste) sur profil 400–700 km. ΔSignalé par Gemini : passage en mode régénératif hélice à pas variable génère une traînée supplémentaire pouvant réduire la finesse aérodynamique. À mesurer lors des essais banc et vol.

9.2 Feuille de route spécifique ③

Période	Actions ③ spécifiques	Actions communes gamme (voir Matrice V8 §5)
2026–2028	Retrofit banc sol 1 ATR-72 ÉREV GNV. Qualification réservoirs Type IV fuselage. Banc essai AVC 4 niveaux en nacelle ATR. Dialogue EASA certification GNV aviation.	Banc essai ÉREV Atkinson méthane. Dialogue EASA certification pistons aéronautique. Qualification capteurs CH ₄ embarqués.
2028–2031	Premier vol ATR-72 ÉREV GNV. Qualification slip méthane + MOC en vol. Validation turbocompresseur FL250. Chiffrage KERS descente en conditions réelles.	Qualification fatigue réservoirs. Premiers vols bio-GNV. Certification partielle EASA.
2031–2033	Certification EASA complète ATR-72 ÉREV GNV. Entrée en service commercial segment ③.	Déploiement infra GNV aéroports. Montée bio-GNV filière Résilience Phase 2.
2033–2045	Montée bio-GNV 0→100 % sans modifier l'appareil. Contribution flotte à –60/–80 Mt CO ₂ /an France 2045.	Convergence filière Résilience. Biochar comptabilisé dans bilans carbone.