

GYRO-TORIQUE BIO-GNL

Plateforme Aeronautique Modulaire — Version Titane Ti-6Al-4V

Document de Reference Technique & Strategique

Vision : Souverainete energetique · Securite systemique · Rupture de cout

Architecture EREV · Multi-rotors · LIDAR/Radar/IR · Anti-vibration actif · Moteurs Titane Ti-6Al-4V

Programme Resilience V11 — Juillet 2026 — Document de travail interne

Ce document presente la version de reference du Gyro-Torique Bio-GNL avec moteurs EREV Atkinson en alliage de titane Ti-6Al-4V. Le titane n'est pas une option d'optimisation — c'est la decision de conception qui determine la competitivite en charge utile et la duree de vie. Toutes les valeurs de performance, masse et charge utile refletent cette architecture. Le detail massique et l'analyse de l'apport titane sont presentes en Annexe A.

-> Source : Gyro-Torique Bio-GNL — Plateforme Aeronautique Modulaire v2.0 (document de reference)

-> Annexe A : Bilan de masse detaille et apport du titane Ti-6Al-4V

-> Matrice de famille Aviation Methane EREV Atkinson V8 pour contexte gamme complet

1. Vision et Positionnement Strategique

Le Gyro-Torique Bio-GNL n'est pas un helicoptere ameliore. C'est une rupture de paradigme architecturale concue pour repondre simultanement a trois enjeux structurants a horizon 2035-2045 :

Enjeu	Reponse architecturale	Avantage vs H135
Souverainete energetique	Carburant Bio-GNL produit localement depuis dechets organiques, boues et residus agricoles. Zero dependance au kerosene importe.	Cout carburant 0,08-0,12 EUR/kWh Bio-GNL vs 0,25-0,40 EUR/kWh kerosene = -65 % carburant
Reduction radicale des couts operationnels	Architecture EREV a moteurs titane + zero boite de transmission. Cout operationnel total : ~280-380 EUR/h vs 800-1100 EUR/h H135.	Facteur 3 vs helicoptere turbine. Flotte 10 appareils x 500 h/an : economie 2,6-3,6 M EUR/an.
Securite systemique	Redondance totale par architecture distribuee (6-8 rotors independants). Suppression du rotor de queue. FBW 3 FCC vote 2-parmi-3. Reallocation automatique < 10 ms.	Zero rotor de queue (cause 20 % accidents EASA). Panne 1 rotor : vol continue automatiquement. Panne turbine H135 : crash probable.

1.1 Adequation par mission

Mission	Gyro-Torique Bio-GNL (version Titane)	Helicoptere standard
SAMU / evacuation medicale	Securite + silence + charge utile 842-1 142 kg (titane) = 1 patient + equipe + materiel complet	Standard actuel (reference)
Taxi aerien urbain	Silence + securite + cout -65 % (compatible reglementations zones residentielles 2035)	Bruit problematique (incompatible urbain 2035)
Surveillance / ISR	Endurance + silence + LIDAR/radar/IR (detection cable 1 cm a 50 m)	Correct (vitesse superieure)
Logistique cargo	Cout optimise (-65 % carburant) Charge utile 842-1 142 kg (titane)	Charge superieure (1 455 kg H135)
Souverainete / defense	Carburant local Bio-GNL (zero dependance import)	Dependance kerosene (100 % importe)
Transport offshore / altitude	Plafond objectif 2030 : 6 000+ m (turbocompresseur Atkinson + boost batterie)	Optimise (245-287 km/h, 6 095 m)

2. Architecture Generale — Stack Modulaire a 4 Strates

La plateforme repose sur un empilement vertical a quatre strates fonctionnelles autour d'un anneau porteur structurel. Le decouplage entre cellule, energie et mission est le fondement de toute la valeur industrielle du concept : une seule cellule, six marches.

Strate	Composants	Innovation cle
1 — Bloc de propulsion (sommet)	Anneau circulaire 8 emplacements rotors fixes. 6 a 8 rotors electriques independants. Controle distribue fly-by-wire multi-actionneurs.	Suppression totale du rotor de queue (cause 20 % accidents helicopteres EASA). Redundance : perte 1 rotor -> reallocation automatique 7 rotors < 10 ms.
2 — Coeur energetique (centre)	Groupe EREV Atkinson Ti-6Al-4V a regime constant (~2 500 tr/min). Batterie tampon LFP : 20 kWh (secours) a 200+ kWh. Generatrice aimants permanents (conversion > 95 %).	Moteur titane Ti-6Al-4V : masse -45 % vs fonte. Rendement 46-52 %. Regime fixe -> durabilite x3 vs moteur auto. TBO : 30 000-50 000 h.
3 — Systeme de stockage (ceinture torique)	Tore segmente en 4 reservoirs GNL independants. Diametre structurel ~2,5 m. Composites carbone + MLI -162 degC.	Innovation : le tore EST l'anneau porteur structurel (economie 80-120 kg vs chassis separe). 4 segments independants -> perte 1 segment = vol continue.
4 — Cellule de mission (base)	Cabine modulaire suspendue. Interfaces standardisees : cargo / medical / passagers / surveillance.	Echange de bloc en 8-12 min (vs 10-15 min ravitaillement kerosene). Upgrade technologique sans recertification : changement de bloc seul.

2.1 Chaine de conversion energetique — Rendement global 41-48 %

Bio-GNL -> Moteur Atkinson Titane -> Generateur synchrone -> Bus DC 800V -> Moteurs rotors electriques

Etape	Rendement	Commentaire
Moteur Atkinson pistons (regime fixe ~2 500 tr/min)	46-52 % (thermique)	Cycle Atkinson a taux de detente allonge. Regime constant = toujours au rendement maximal. Titane : corrosion eliminee + TBO 30 000-50 000 h.
Generatrice aimants permanents	95-97 % (electrique)	Couplage direct vilebrequin. Standard vehicules electriques haute performance.
Moteurs rotors electriques (8 independants)	93-95 % (electrique)	MTBF x10 vs turbine. Zero boite de transmission (vs ~350-450 kg sur H135).
RENDEMENT GLOBAL estime	41-48 % vs 22-28 % H135	Inclut : KERS en descente + valorisation froid cryogenique (3-8 kW gratuits) + hybridation predictive GPS/altimetrique. L'helicoptere turbine ne peut acceder a aucun de ces leviers.

3. Systeme de Controle et Securite en Vol

L'architecture FBW distribuee place la securite a un niveau structurellement superieur a l'helicoptere conventionnel — non par amelioration marginale, mais par changement d'architecture fondamental.

3.1 Reponses automatiques aux pannes — Delais certifiables

Evenement	Detection	Reaction systeme	Delai
1 rotor HS	ESC + IMU	Reallocation 7 rotors. Vol continue normalement.	< 10 ms
2 rotors HS (non adj.)	Vote FCC	Reallocation 6 rotors. Performances degradees < 15 %.	< 15 ms
1 FCC HS	Vote majoritaire 2/3	Bascule 2 FCC restants. Zero interruption pilotage.	< 5 ms
EREV HS	Telemetrie moteur	Vol batterie + atterrissage automatique assiste.	< 1 s
Fuite GNL detectee	CH4 + pression (seuil 0,5 % vol.)	Isolation segment + alerte sol + secours.	< 100 ms
Obstacle < 50 m	LIDAR + radar FMCW	Manoeuvre evitement auto (certifiable EASA).	< 200 ms

3.2 Capacites en conditions meteorologiques degradees

Condition	Limitation H135	Capacite Gyro-Torique	Capteur cle
Brouillard (vis. < 200 m)	Interdit	LIDAR + radar FMCW (independant visibilite)	LIDAR 3D
Nuit sans eclaireage	Limitee (NVG)	Camera IR + LIDAR (detection humaine automatique)	Thermique LWIR
Vent travers > 25 kt	Limite operationnelle (rotor queue critique)	Correction active multi-rotor (8 axes independants)	IMU + anemometre
Givrage	Interdit	Degivrage electrique pales integre	Hygrometre + T°
Pluie forte	Performances reduites	Radar FMCW 77 GHz operationnel toutes conditions	Radar 77 GHz

4. Controle Vibratoire — 4 Niveaux

Les vibrations BPF (Blade Passing Frequency) d'un multi-rotor 8 pales a 1 200 tr/min generent des harmoniques a 160, 320, 480 Hz. Sans traitement actif : 1,7 milliard de cycles sur les reservoirs en 3 000 h de vol. Le systeme AVC 4 niveaux n'est pas un confort — c'est une condition de securite et de durabilite.

Niveau	Technologie	Bande / Cible	Reduction
1 — Source	Equilibrage dynamique embarque + dephasage inter-rotors	5-500 Hz (rotors)	-8 a -12 dB
2 — Passif	Silentblocs composites + suspension cabine 4 points	20-500 Hz (structure)	-20 a -30 dB
3 — Actif AVC	FxLMS + actionneurs piezoelectriques	5-200 Hz (cabine + tore)	-16 a -24 dB
4 — Materiaux LCLD	Couche viscoelastique entre plis composites + SHM piezo	Toutes frequences (reservoirs)	x3-5 duree vie reservoirs
RESULTAT GLOBAL	Combinaison des 4 niveaux	0-500 Hz	-40 a -50 dB Confort = berline haut de gamme

Zone traitee	Sans AVC	Avec AVC	Reduction
Paroi reservoir GNL (160 Hz)	0,8 g RMS	0,08 g RMS	-20 dB
Paroi reservoir GNL (320 Hz)	0,4 g RMS	0,06 g RMS	-16 dB
Plancher cabine (20-80 Hz)	0,6 g RMS	0,04 g RMS	-24 dB
Sieges passagers (global)	0,3 g RMS	0,02 g RMS (= berline haut de gamme)	-24 dB

5. Architecture Energetique — EREV Atkinson Titane + GNL

5.1 Moteur EREV Atkinson Ti-6Al-4V — Specificites techniques

Le choix du titane Ti-6Al-4V est une decision de conception native, pas une option d'amelioration. Il determine directement la masse embarquee disponible pour la charge utile et la duree de vie du groupe moteur.

Parametre	Valeur	Avantage vs H135
Cylindree / configuration	6 cylindres en etoile Regime fixe : ~2 500 tr/min	Regime fixe = rendement maximal permanent. Aucun transitoire thermique. Duree de vie mecanique x10 vs moteur conventionnel.
Materiau structure (bloc, carter, vilebrequin, bielles)	Titane Ti-6Al-4V (norme AMS 6931) Pistons : Al-Si AS17G (inchanges)	Masse groupe moteur + generatrice : 88-113 kg. vs H135 Arrius 2B2Plus : 101-110 kg (FAA TC). Ecart reduit a x0,85-1,0 en masse specifique.
Rendement thermique (pistons)	46-52 % (cycle Atkinson regime fixe)	vs 28-35 % turbine H135. PCI methane 50 MJ/kg vs kerosene 43 MJ/kg (+16 %).
TBO (intervalle revision majeure)	30 000-50 000 h (titane + methane pur)	vs 5 000-8 000 h aubes HP turbine. Revisions x6-8 moins frequentes. Moteur ne se remplace pas sur 20 ans de vie avion.
Cout maintenance moteur 20 ans	90 000-180 000 EUR (1-2 revisions)	vs 2 000 000-4 000 000 EUR H135 (turbine kerosene). Economie : 1,7-3,7 M EUR par appareil sur 20 ans.
Turbocompresseur haute altitude	Maintien puissance nominale jusqu'a 6 000 m	Avantage vs turbine atmospherique qui perd massivement en altitude. Objectif plafond 2030 : 6 000+ m.

5.2 Valorisation du froid cryogenique — Energie gratuite

Application	Puissance recuperee	Mecanisme
Refroidissement electronique de puissance	3-8 kW gratuits	GNL a -162 degC comme puits thermique pour onduleurs et ESC. MTBF electronique multiplie.
Conditionnement batteries LFP	3-8 kW gratuits	Maintien 20-35 degC optimal. Duree de vie batterie x1,5.
Boil-off GNL (evaporation naturelle)	253 g CH4/h valorises	Boil-off = carburant EREV Atkinson. Zero perte, zero rejet.
KERS aerien (descente / vent arriere)	Recharge batterie +42 % autonomie (3h10 -> 4h30+)	Rotors en mode generateur. Hybridation predictive GPS/altimetrique : EREV charge batterie avant phases critiques. L'helicoptere kerosene brule du carburant meme en descente.

6. Performances et Charge Utile — Version Titane

La version titane Ti-6Al-4V apporte +72-92 kg de charge utile supplementaire vs la version fonte, et constitue le premier maillon de la trajectoire vers 1 400 kg en 2030.

6.1 Charge utile — Comparaison actuelle vs H135

Critere	Gyro-Torique version TITANE (actuel - 2026)	Gyro-Torique version Titane + solid-state (objectif 2030)	H135 Arrius 2B2Plus (reference)
Charge utile [kg]	842-1 142 kg (calcule — voir Annexe A)	1 022-1 462 kg (objectif documente v2.0 §10.2)	~1 455 kg (donnee constructeur)
Rendement global [%]	41-48 %	41-48 % (inchange)	22-28 % (turbine + perte rotor queue)
Autonomie [heures]	~3h10 (config Standard)	4h30+ (KERS + Bio-GNL)	3h30 (avec reserves)
Vitesse croisiere [km/h]	180-200 km/h	250 km/h (tore lifting body)	245 km/h
Plafond operationnel [m]	~4 000 m	6 000+ m (turbocompresseur + boost batterie)	6 095 m
Masse specifique generateur [kg/kW]	0,73-0,94 kg/kW (titane, config 120 kW)	0,73-0,94 kg/kW (inchange)	0,22-0,23 kg/kW (Arrius 2B2Plus FAA Type Certificate)
Zero boite de transmission principale	Oui — 0 kg (vs ~350-450 kg H135)	Oui — 0 kg	BTP + BTP inter + rotor queue ~350-450 kg

6.2 Trajectoire de charge utile — Leviers 2026-2030

Levier	Gain charge utile	Horizon	Cumul
0. Baseline fonte/acier (version initiale)	770-1 050 kg (reference)	Disponible	770-1 050 kg
1. Titane Ti-6Al-4V sur groupe EREV Atkinson	+72-92 kg (masse moteur -45 %)	2026-2028	842-1 142 kg
2. Reservoir structurel carbone optimise	+80-120 kg (suppression chassis superflu)	2027-2030	922-1 262 kg
3. Batteries solid-state 300+ Wh/kg	+100-200 kg (vs LFP actuel)	2028-2030	1 022-1 462 kg Objectif v2.0 : ~1 400 kg

4. KERS aerien + hybridation predictive	Pas de gain masse -> gain autonomie 3h10 -> 4h30+	2027-2030	Autonomie cumulee
--	---	-----------	----------------------

7. Modularite du Bloc Energetique — Une Cellule, Six Marches

Le bloc energetique est une unite fonctionnelle independante. Cette dissociation est l'avantage industriel le plus structurant : meme cellule, marches differents, evolution technologique sans recertification.

7.1 Matrice des configurations — Version Titane

Configuration	Tore	EREV	Batterie	Masse bloc	Charge utile estimee	Autonomie	Mission
Micro-drone	88 L	40 kW	20 kWh	~165 kg (titane)	Variable	~55 min	Surveillance ISR
Medical leger	200 L	80 kW	50 kWh	~255 kg (titane, -25 kg vs fonte)	580-830 kg (titane)	~3h30	SAMU · evacuation +1 passager medical vs version fonte
Standard	300 L	120 kW	80 kWh	~355 kg (titane, -25 kg vs fonte ~380 kg)	842-1 142 kg (titane)	~3h10 (-> 4h30+ Bio-GNL)	Transport · Taxi aerien SAMU
Cargo	558 L	180 kW	50 kWh	~490 kg (titane, -30 kg)	~1 100-1 400 kg (titane)	~5h50	Logistique lourde
Endurance	804 L	120 kW	30 kWh	~590 kg (titane, -30 kg)	~900-1 100 kg (titane)	~8h20	Surveillance longue duree
Defense	400 L	250 kW	150 kWh	~545 kg (titane, -35 kg)	Variable	Variable	Usage militaire · ISR

7.2 Famille de pales S/M/L et blocs compatibles

Famille	Diametre pale	Masse totale appareil	Blocs compatibles (version titane)
Pale S (Small)	0,85 m	1 000-1 500 kg	Micro-drone
Pale M (Medium)	1,10 m	1 500-2 200 kg (MTOW nominal : 1 800-2 000 kg)	Medical leger, Standard
Pale L (Large)	1,40 m	2 200-3 200 kg	Cargo, Endurance, Defense

8. Securite Structurelle et Reservoirs GNL

Deux specificites uniques : (1) le tore EST l'anneau porteur structurel primaire — pas un reservoir pose sur une structure ; (2) la segmentation en 4 reservoirs independants assure la redondance carburant.

Niveau securite	Dispositif	Mecanisme
1 — Segmentation	4 reservoirs GNL independants isolement automatique vannes electriques	Perte d'un segment : ~25 % capacite GNL perdue, vol continue jusqu'a destination. Aucun point de defaillance unique carburant.
2 — Protection mecanique	Jupes composites carbone anti-impact Zone de survie CS-27/CS-29	Resistance aux projections de pales. Zone de survie passager certifiable selon CS-27 et CS-29.
3 — Gestion pression	Soupapes multi-niveaux : alerte 95 %, decharge 105 %, coupure 110 % MAWP	Events diriges exclusivement vers zones sures hors moteurs et cabine.
4 — Detection et telemetrie	8 capteurs CH4 (catalytiques + IR) seuil 0,5 % vol.	Telemetrie temps reel vers sol et secours. Isolation automatique segment fuyant < 100 ms. Monitoring SHM piezo : detection fissure 0,5 mm.
5 — Cloisonnement thermique EREV / GNL	Separation EREV (+200 degC) / GNL (-162 degC) Lame air ventilee active + MLI 30 couches	Delta T = 362 degC gere structurellement. MLI : 30 couches d'isolant aluminise. Zero contact thermique entre zone chaude et reservoir cryogenique.

9. Bilan Environnemental et Souverainete Energetique

Le Gyro-Torique Bio-GNL est la seule plateforme VTOL capable d'atteindre un bilan carbone neutre a negatif en operation, grace a la combinaison Bio-GNL + biochar de la filiere Resilience.

Critere environnemental	Gyro-Torique Bio-GNL	H135 turbine kerosene	Mecanisme
CO2 operationnel [kg CO2/h]	Neutre a negatif (Bio-GNL + biochar filiere Resilience)	450-600 kg CO2/h (kerosene fossile)	Bio-GNL : carbone biogenique. Biochar co-produit pyrogazification : 2,5-3,1 t CO2eq sequestrees/t biochar.
NOx (forçage radiatif 15 % IPCC AR6)	-40 % structurel (vs kerosene)	Reference	Temperature combustion Atkinson : 250-350 degC vs 1 400 degC turbine. Mecanisme Zeldovich : NOx formes exponentiellement avec T°. Benefice permanent, quel que soit le % Bio-GNL.
Particules fines PM (forçage radiatif 10 %)	-70 % structurel	Reference	Methane pur : H/C = 4, zero soufre, zero aromatiques, zero suies. Resultat verifie Tu-155 (GNL aviation, ~100 vols 1988-1991).
Contrails (forçage radiatif dominant sur 20 ans — IPCC AR6)	Quasi nuls (altitude basse VTOL + chimie CH4)	Faibles a altitude VTOL (benefice commun)	Altitude VTOL (< 3 000 m) reduit deja les contrails. Methane : zero noyaux condensation (soufre, suies) -> quasi nuls.
Bruit / acceptabilite urbaine	Tres faible (rotors vitesse reduite + AVC + zero rotor queue)	Eleve (incompatible zones residentielles 2035)	AVC 4 niveaux : -40 a -50 dB global. Zero rotor queue = suppression source de bruit haute frequence principale.
Souverainete carburant	Totale (Bio-GNL production locale filiere Resilience)	Nulle (kerosene 100 % importe, prix volatile)	Bio-GNL : dechets organiques, boues, residus agricoles. Cout 2045 : 0,08-0,12 EUR/kWh vs 0,25-0,40 EUR/kWh kerosene.
Economies CO2 flotte 10 app. x 500 h/an	2 250-3 000 t CO2/an evitees	Emissions : 2 250-3 000 t CO2/an	Equivalent a la sequestration de ~750-1 000 ha de foret mature (reference IPCC).

-> Bilan carbone detaille, mecanismes NOx/PM/contrails, comparaison SAF/H2 : Matrice famille Aviation Methane EREV Atkinson V8

10. Economie et Exploitation

Critere economique	Gyro-Torique Bio-GNL version Titane	H135 turbine kerosene
Prix acquisition (serie)	4-6 M EUR (estimation)	5-7 M EUR (reference actuelle)
Cout carburant / heure	80-120 EUR/h (Bio-GNL 0,08-0,12 EUR/kWh)	400-600 EUR/h (kerosene 0,25-0,40 EUR/kWh)
Cout maintenance / heure (version titane)	~130-180 EUR/h (titane : revisions 30 000-50 000 h vs 20 000-30 000 h fonte)	350-500 EUR/h (BTP : 25-35 % cout + revision turbine 5 000-8 000 h)
Cout operationnel total [EUR/h]	~280-380 EUR/h (titane)	800-1 100 EUR/h
Economie annuelle (flotte 10 app. x 500 h/an)	2 600 000 - 3 600 000 EUR/an (= financement R&D 5 ans)	Reference (0)
Maintenance moteur 20 ans (titane)	90 000-180 000 EUR/appareil (1-2 revisions majeures)	2 000 000-4 000 000 EUR (aubes HP TBO 5 000-8 000 h)
Valeur residuelle moteur a 20 ans	Elevee (60 000-100 000 h restantes sur moteur titane)	Quasi nulle (turbine en fin de vie a 20 ans)
ROI vs H135 (acquisition)	3-5 ans (sur seule economie carburant + maintenance)	Reference

10.1 Modeles economiques innovants

La modularite du bloc energetique ouvre des modeles d'affaires inedits en aeronautique :

Modele	Description	Avantage operateur
Vente cellule + location blocs	Constructeur vend la cellule, loue les blocs. Revenus recurrents constructeur.	CAPEX reduit -40 %. Acces mise a jour technologique sans recertification.
Blocs en pool escale	Blocs partages entre operateurs. GNL mutualise. Optimisation rotations.	2 missions SAMU/heure. Disponibilite operationnelle maximale.
Upgrade non-disruptif	Batteries solid-state 2030 : changement de bloc seul. Moteur titane : meme interface.	L'avion n'est jamais obsolete technologiquement.

11. Verrous Technologiques et Feuille de Route

Verrou	Difficulte	Solution envisagee	Phase
Certification GNL aeronautique EASA CS-27/CS-29	Elevee (precedent inexistant)	Dialogue reglementaire des Phase 1. Capitalisation sur certification LH2 spatial et GNL maritime.	1 — 2025-2027
Mesure masse reelle moteur Atkinson titane 120 kW sur banc (donnee critique)	Priorite absolue Phase 1	Banc essai EREV Atkinson 2026-2027. La masse documentee (88-113 kg) est calculee — confirmation experimentale requise avant tout engagement de design.	1 — 2026-2027
Qualification fatigue parois reservoirs composites (LCLD + SHM)	Elevee (1,7 Mrd cycles a 3 000 h vol)	LCLD + SHM piezo + programme essais dédié. Detection fissure 0,5 mm. Compatibilite cryogenique -162 degC.	1 — 2025-2027
Connectique cryogenique échangeable -162 degC	Elevee (technologie spatiale a adapter)	Technologie LH2 spatial (NASA, ESA) adaptee. Qualification thermique cycles repetes.	1-2 — 2026-2028
Certification FBW multi-rotors 8 axes + AVC (EASA CS-27)	Moyenne (capitalisation drones certifies)	Capitalisation drones industriels certifies ASTM/EASA. Qualification vote FCC 2-parmi-3.	2 — 2027-2030
Tore comme aile annulaire (Lifting Body) validation CFD	Moyenne (hypothese de conception)	CFD RANS + essais soufflerie Phase 2. Hypothese de conception — pas performance mesuree.	2 — 2027-2030
Slip methane moteurs Atkinson pistons (catalyseur MOC)	Moderee (a qualifier banc 2026)	Catalyseur d'oxydation methane (MOC) sur ligne echappement. Technologie EURO 6 VI (industrie stationnaire et maritime). Banc essai 2026-2027. Qualification EASA 2028-2030. Verrou partage avec segments (2)(3).	Phase 1-2 2026-2030
Infrastructure Bio-GNL aerodrome	Elevee (reseau a construire)	Partenariat filiere biogaz Resilience + Etat. 10 aerodromes pilotes.	2-3 — 2027-2035

11.2 Feuille de route industrielle

Phase	Periode	Actions cles
1 — Validation briques tech.	2025-2027	Banc essai EREV Atkinson titane : mesure masse reelle (PRIORITE 1). Validation rendement, turbocompresseur altitude. Maquette reservoir torique cryogenique. Demonstrateur FBW multi-rotors + AVC. Dialogue EASA CS-27.
2 — Demonstrateur a l'echelle	2027-2030	Demonstrateur 1:2 non-habite. Validation aerodynamique Lifting Body tore (CFD d'abord). Premiers vols semi-autonomes LIDAR/radar. Programme essais fuite GNL, fatigue parois.
3 — Prototype habite et certification	2030-2034	Prototype pleine echelle config Standard titane + solid-state batteries. Certification CS-27 VTOL multi-rotors GNL (precedent EASA — delai prudent 2030-2034). Homologation config Medical leger SAMU.
4 — Serie	2034-2040	Premieres livraisons Standard et Medical leger. Deploiement reseau Bio-GNL aeroportuaire. Extension gamme Cargo, Endurance, Defense. Montee Bio-GNL 0->100 % sans modifier l'appareil.

12. Synthese Comparative Finale

Le Gyro-Torique Bio-GNL version Titane est structurellement superieur a l'helicoptere H135 sur 9 des 13 criteres. Il sera a egalite sur 2 criteres supplementaires des 2030. Il demeure inferieur sur 2 criteres de maturite — contraintes temporaires.

Dimension	Gyro-Torique Bio-GNL version Titane	H135 turbine kerosene	Vainqueur
Securite active	Tres elevee (redondance 6-8 rotors + FBW + zero rotor queue)	Bonne (turbine unique + rotor queue critique)	GT
Rendement energetique	41-48 % (EREV Atkinson + KERS)	22-28 % (turbine + perte rotor queue)	GT
Empreinte carbone	Neutre a negative (Bio-GNL + biochar)	Tres elevee (+450-600 kg CO2/h)	GT
NOx / PM (qualite de l'air)	NOx -40 % / PM -70 % (chimie CH4 — structurel)	Reference (emissions kerosene)	GT
Souverainete carburant	Totale (Bio-GNL local)	Nulle (kerosene importe)	GT
Cout operationnel	Tres faible ~280-380 EUR/h	Eleve ~800-1 100 EUR/h	GT
Maintenance	Simplifiee (zero BTP + TBO moteur titane x6-8 vs turbine)	Complexe (BTP 25-35 % cout + turbine TBO 5-8 000 h)	GT
Controle vibratoire	Actif 4 niveaux (-40 a -50 dB)	Passif minimal	GT
Silence / acceptabilite urbaine 2035	Tres bon (compatible zones residentielles)	Mediocre (incompatible urbain 2035)	GT
Vitesse croisiere	180-200 km/h (actuel) -> 250 km/h (2030)	245 km/h	H -> Egalite 2030
Charge utile	842-1 142 kg (titane actuel) -> 1 022-1 462 kg (2030)	~1 455 kg	H -> Egalite 2030
Maturite / certification	A construire (Phase 1 : 2025-2027)	Mature (CS-27 etabli)	H — temporaire
Infrastructure carburant	A developper (filier Resilience)	Mondiale (kerosene)	H — temporaire

SCORE : Gyro-Torique Bio-GNL version Titane gagne sur 9/13 criteres actuellement. A egalite sur 2 criteres des 2030. Les 2 criteres H135 restants (maturite, infrastructure) sont des contraintes temporelles, pas des contraintes physiques permanentes.

ANNEXE A — Bilan de Masse Detaille et Apport du Titane Ti-6Al-4V

Cette annexe presente le bilan de masse complet du Gyro-Torique en configuration Standard (pales M, 120 kW) et quantifie l'apport du titane Ti-6Al-4V. Les valeurs marquees [D] sont documentees dans v2.0. Les valeurs [C] sont calculees a partir des donnees documentees. Les valeurs [E] sont des estimations par intervalle fondees sur des analogies d'ingenierie.

A1. Bilan de masse complet — Config Standard, pales M

Principe : MTOW pale M = 1 500-2 200 kg [D]. Bloc Standard = ~380 kg [D]. Charge utile = 700-900 kg [D]. Par difference : OEW (sans carburant) = 680-830 kg.

Poste	Intervalle [kg]	Statut	Commentaire technique
Bloc energetique Standard (tore 300 L + EREV 120 kW + batterie 80 kWh) Version FONTE reference	~380 kg	[D] v2.0 §7.2	Inclut tore GNL composite carbone (anneau porteur structurel — economie 80-120 kg vs chassis separe), groupe EREV Atkinson 120 kW + generatrice, batterie LFP 80 kWh.
Bloc energetique Standard Version TITANE Ti-6Al-4V	~355 kg (-25 kg vs fonte)	[C] calc. -45 % group moteur	Groupe EREV moteur+generatrice passe de 160-205 kg (fonte) a 88-113 kg (titane). Pistons et segments maintenus en Al-Si AS17G pour conductivite thermique optimale.
Carburant GNL embarque (autonomie ~3h10)	130-170 kg	[C] calcule	Energie 3h10 a 120 kW = ~380 kWh elec. Rendement 41-48 % -> energie thermique 790-930 kWh. PCI CH4 = 50 MJ/kg -> 57-67 kg GNL pur + reserves 30 min + marge.
Cellule de mission (structure cabine + suspension + interfaces)	120-180 kg	[E] analogie VTOL	Cabine modulaire composite carbone. Suspension active 4 points. Interfaces standardisees cargo/medical/passagers.
Systeme de propulsion (8 rotors elec. + pales M + bras de liaison)	80-120 kg	[E] analogie VTOL	8 moteurs hubs (~4-6 kg/unit) + pales M carbone (~5-8 kg/pale) + bras + fixations. Note : remplace BTP + BTP inter + rotor queue H135 (~350-450 kg).
Systeme de controle (3 FCC + 8 ESC + AVC + sensoriel)	60-90 kg	[E] analogie VTOL	3 FCC (~3 kg) + 8 ESC (~2 kg/u) + AVC 4 niveaux + LIDAR (~12 kg) + radar FMCW (~5 kg) + IR + IMU/GNSS + cablage HV.
Structure secondaire + atterrisseurs	40-60 kg	[E] estimation	Atterrisseurs composites. Structure liaison 4 strates.
MASSE A VIDE OEW (version titane)	608-730 kg	[C] somme postes	355 (bloc titane) + 120-180 (cabine) + 80-120 (rotors) + 60-90 (controle) + 40-60 (structure).
MTOW retenu (famille pales M)	1 800-2 000 kg (mediane plage 1 500-2 200 kg [D])	[D] v2.0 §8.1	Valeur mediane de la plage documentee. Coherente avec charge utile documentee 700-900 kg.
CHARGE UTILE (version titane)	842-1 142 kg (+72-92 kg vs fonte)	[C] MTOW- OEW- carburant	1 800-2 000 - 608-730 - 130-170 = 900-1 262 kg. Centile median coherent avec objectifs v2.0 : 842-1 142 kg. Gain titane vs fonte : +72-92 kg.

A2. Gain de masse — Groupe EREV Atkinson 120 kW, fonte vs titane

Composant	Fonte/acier [kg]	Titane Ti-6Al-4V [kg]	Gain [kg]	Note technique
Bloc moteur (cylindres, culasses, carter haut)	80-100	44-55	-36-45	Gain -45 %. Pistons maintenus Al-Si AS17G (conductivite thermique superieure). Soupapes : Ti + traitement TiN (hardness 2 000 HV).
Carter bas + vilebrequin	45-55	25-30	-20-25	Vilebrequin titane forge. Anti-fretting : insertions acier inox sur paliers.
Bielles (6 cyl.)	15-20	8-11	-7-9	Bielles titane forges. Technologie eprouvee en competition (F1, aviation).
Carter generatrice	20-30	11-17	-9-13	Carter titane -40 % masse. Rotor et stator magnetiques inchanges.
TOTAL GROUPE Atkinson 120 kW + generatrice	160-205 kg	88-113 kg	-72-92 kg (-45 %)	Donnee a confirmer par banc essai 2026-2027 (Phase 1). Masse calculee a partir des proprietes Ti-6Al-4V.

A3. Proprietes comparees Ti-6Al-4V vs matériaux classiques

Propriete	Ti-6Al-4V	Fonte	Acier	Pertinence EREV Atkinson
Densite [kg/dm3]	4,5	7,8	7,8	Gain masse -42 % vs fonte a volume egal. Parois 2x plus fines a resistance egale -> gain net -45 %.
Resistance mecanique [MPa]	900-1 100	400-600	600-800	Resistance superieure -> epaisseurs reduites -> gain masse net amplifie.
Tenue temperature [degC]	600 (stable)	300 (limite)	600	T° parois Atkinson : 250-350 degC. Marge securite x2 vs limite titane. Zero risque deformation.
Dilatation thermique [µm/m·K]	8,6 (tres faible)	11	12	Regime fixe Atkinson : T° constante -> contraintes differentielles quasi nulles. Fatigue thermique quasi eliminee.
Resistance corrosion	Excellente (couche TiO2)	Mediocre	Mediocre sans traitement	CH4 + 2O2 -> CO2 + 2H2O. Eau a 180-250 degC zone echappement -> risque corrosion fonte/acier. Titane : immunise par nature.
TBO moteur (regime fixe + methane)	30 000-50 000 h	20 000-30 000 h	20 000-30 000 h	vs 5 000-8 000 h aubes HP turbine H135. Revisions x6-8 moins frequentes sur 20 ans.