

AVIATION METHANE - SEGMENT (1)

Gyro-Torique Bio-GNL - VTOL Medical • Urbain • ISR • Souverainete

Document technique - Programme Resilience V11

Juillet 2026 - Document de travail interne

Ce document couvre le segment (1) VTOL Gyro-Torique. Pour le denominateur commun (bilan climatique, filiere Resilience, comparaison SAF/H2), se referer a la Matrice de famille V8. L'AVC 4 niveaux documente ici est la reference pour les segments (2)(3).

-> [Matrice de famille Aviation Methane EREV Atkinson - Gamme VTOL -> Long-courrier V8](#)

1. Positionnement dans la gamme

Le Gyro-Torique Bio-GNL n'est pas un helicoptere ameliore. C'est une rupture de paradigme architecturale : il rend l'helicoptere turbine economiquement et ecologiquement indefendable sur un segment croissant de missions critiques urbaines, medicales et de souverainete, grace a un rendement thermique 1,8x superieur et un carburant souverain.

Critere	Gyro-Torique Bio-GNL (1)	Helicoptere H135 turbine (concurrent)
Missions	SAMU / evacuation medicale Taxi aerien urbain Surveillance ISR Logistique souveraine Defense carburant local	Toutes missions (mais cout eleve et bruit problematique en urbain)
Propulsion	6-8 rotors electriques independants + EREV Atkinson pistons 40-250 kW + batterie tampon LFP 20-200 kWh (modulaire selon configuration)	1 turbine + 1 rotor principal + 1 rotor de queue anti-couple (cause 20 % accidents EASA)
Carburant	Bio-GNL -162 degC (tore segmente 4 reservoirs structurels) -> progressivite 0->100 % bio	Kerosene Jet-A1 (dependance import, cout volatile)
Rendement thermique	46-52 % (Atkinson pistons regime fixe) -> rendement global estime 38-43 % (Atkinson 46-52 % x generatrice 96 % x moteur elec. 94 % x rotor 85 %) vs 22-28 % helicoptere turbine	28-35 % (turbine) Rendement global 22-28 % (perte rotor de queue 8-15 %)
Masse specifique turbine	Atkinson titane : 0,73-0,92 kg/kW (config 120 kW) Ecart vs H135 : x3,3-4,2	Arrius 2B2Plus (H135) : 101-110 kg / 472 kW = 0,22-0,23 kg/kW (donnee FAA Type Certificate)
Cout operationnel	~280-380 EUR/h total Carburant : ~80-120 EUR/h Maintenance : ~150-200 EUR/h	~800-1 100 EUR/h total Carburant : ~400-600 EUR/h Maintenance : ~350-500 EUR/h
Securite architecturale	Zero rotor de queue (-20 % accidents) Redondance 6-8 rotors (perte 1 rotor = vol continue) LIDAR 3D detection cables AVC actif 4 niveaux	Rotor de queue = point de defaillance unique critique Perte turbine = crash probable
CO2 operationnel	Neutre a negatif (bio-GNL + biochar) vs +450-600 kg CO2/h helicoptere	+450-600 kg CO2/h (kerosene fossile)
Bruit urbain	Faible - rotors a vitesse reduite + dephasage inter-rotors (AVC) + absence rotor de queue	Eleve - incompatible reglementations zones residentielles urbaines 2035

1.1 Adequation par mission

Mission	Gyro-Torique Bio-GNL	Helicoptere standard
SAMU / evacuation medicale	Securite + silence (zero rotor queue + bruit reduit)	Standard actuel (reference)
Taxi aerien urbain	Silence + securite (compatible reglementations 2035)	Bruit problematique (reglementations 2035)
Surveillance / ISR	Endurance + silence + autonomie variable selon tore	Correct (vitesse superieure)
Logistique cargo	Cout optimise (carburant -65 % vs kerosene)	Charge superieure (1 455 kg vs ~700-900 kg)
Souverainete / defense	Carburant local (bio-GNL filiere Resilience)	Dependance kerosene (100 % importe)
Transport offshore / altitude	Vitesse insuffisante actuellement (objectif 2030 : 250 km/h)	Optimise (245-287 km/h)

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 la valeur industrielle : une seule cellule, six marches.

Strate	Nom	Description technique
1 (sommet)	Bloc de propulsion (rotors)	Anneau circulaire 8 emplacements rotors fixes. 6 a 8 rotors electriques independants (2 desactivables electroniquement). Suppression totale du rotor de queue (cause 20 % accidents helicopteres, EASA). Controle distribue fly-by-wire multi-actionneurs.
2 (centre)	Coeur energetique (EREV Atkinson)	EREV Atkinson pistons a regime constant (~2 500 tr/min) - point optimal rendement permanent. Batterie tampon LFP : 20 kWh (secours) a 200+ kWh (vol electrique partiel). Rendement 46-52 % (vs 28-35 % turbine). Couplage direct generatrice synchrone aimants permanents (conversion > 95 %). Recuperation chaleur echappement pour vaporisation GNL : economie 3-5 kW.
3 (ceinture)	Systeme de stockage torique (reservoirs)	Tore segmente en 4 reservoirs GNL independants - diametre structurel ~2,5 m. Reservoirs composites carbone : le tore EST l'anneau porteur structurel (pas un reservoir pose sur un anneau). Double paroi MLI stockage cryogenique -162 degC. Innovation : le reservoir structural economise 80-120 kg vs chassis separe.
4 (base)	Cellule de mission (cabine modulaire)	Cabine modulaire suspendue - decouplage total mission/porteur. Interfaces standardisees : cargo / medical / passagers / surveillance. Suspension active 4 points par verins electro-hydrauliques. Echange en 8-12 min en escale (vs 10-15 min ravitaillement helicoptere).

2.1 Chaîne de conversion energetique

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

Bus DC 800 V : standard vehicules electriques haute performance (Porsche Taycan, ERA Aura Aero). Convergence couts composants automotive -> aeronautique.

2.2 Valorisation du froid cryogenique

Application	Puissance	Mecanisme
Refroidissement electronique de puissance	3-8 kW gratuits	GNL a -162 degC utilise comme puits thermique pour les onduleurs et ESC. MTBF electronique multiplie.
Conditionnement thermique batteries LFP	3-8 kW gratuits	Maintien batterie a 20-35 degC optimal. Duree de vie x 1,5. Performances constantes en conditions froides.
Boil-off GNL (evaporation naturelle)	253 g CH4/h valorises	Boil-off = carburant EREV Atkinson. Zero perte, zero torchage. Note : contrairement au long-courrier (47,5 kg/h boil-off), le boil-off Gyro-Torique est faible - le prolongateur Atkinson preleve essentiellement du GNL liquide sur le reservoir principal.
Hybridation predictive GPS/altimetrique	Autonomie +15-20 %	Calculateur anticipe les phases critiques (montee, hover) et recharge la batterie en amont (croisiere descendante). EREV en charge batterie avant les phases gourmandes.

3. Modularite du bloc energetique - Une cellule, six marches

Le bloc energetique est une unite fonctionnelle independante mecaniquement, electriquement, thermiquement et en carburant. Le volume du tore varie avec le carre du rayon mineur - doubler r quadruple le volume.

Configuration	Volume tore	EREV	Batterie	Masse bloc	Autonomie	Mission
Micro-drone	88 L	40 kW	20 kWh	~180 kg	~55 min	Surveillance ISR
Medical léger	200 L	80 kW	50 kWh	~280 kg	~3h30	SAMU · evacuation
Standard	300 L	120 kW	80 kWh	~380 kg	~3h10 (->4h30+ bio-GNL)	Transport · Taxi aerien
Cargo	558 L	180 kW	50 kWh	~520 kg	~5h50	Logistique lourde
Endurance	804 L	120 kW	30 kWh	~620 kg	~8h20	Surveillance longue duree
Defense	400 L	250 kW	150 kWh	~580 kg	Variable	Usage militaire · ISR

3.1 Comparaison operationnelle - Echange de bloc vs ravitaillement

Scenario	Helicoptere classique	Gyro-Torique modulaire
Ravitaillement / recharge	10-15 min + pompe kerosene	Echange de bloc : 8-12 min (meme famille pales)
Mission enchainee	Impossible sans arret long	Bloc charge en attente 2 missions/heure possibles (SAMU)
Upgrade technologique	Recertification complete	Changement de bloc seul (batteries solid-state 2030)
Changement famille pales (M->L)	Non applicable	Pale + bloc + avionique Atelier : 45-90 min
Reconfiguration 6<->8 rotors	Non applicable	Reconfiguration logicielle Escale : < 5 min

4. Systeme de controle et securite en vol - FBW multi-rotors

Le controle repose integralement sur un FBW (fly-by-wire) de 4e generation, sans liaison mecanique directe entre le pilote et les rotors. Chaque rotor est commande individuellement par son ESC, supervise par trois Flight Control Computers redondants.

4.1 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 adjacents)	Vote FCC	Reallocation 6 rotors Performances degradees < 15 %	< 15 ms
1 FCC HS	Vote majoritaire 2-parmi-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 Pilote + sol + secours	< 100 ms
Perte GNSS	Coherence multi- sources	INS + LIDAR SLAM (navigation autonome)	< 500 ms
Obstacle < 50 m	LIDAR + radar FMCW	Manoeuvre evitement auto (certifiable EASA)	< 200 ms

4.2 Capacites en conditions meteorologiques degradees

Condition	Limitation helicoptere standard	Capacite Gyro-Torique	Capteur cle
Brouillard (vis. < 200 m)	Interdit	LIDAR + radar FMCW (independent de la visibilite)	LIDAR 3D
Nuit sans eclairage	Limitee (NVG pilote)	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 sans equipements specifiques	Degivrage electrique pales (chauffage integre)	Hygrometre + T°
Poussiere / sable	Rotor queue expose (usure acceleree)	Protection geometrique LIDAR IR non affecte	LIDAR IR
Pluie forte	Performances reduites (visibilite + bruit)	Radar FMCW 77 GHz operationnel toutes conditions	Radar 77 GHz

Note LIDAR : LIDAR certifie aviation actuel : 16-64 faisceaux (Velodyne VLP-16, Ouster OS1-64). Objectif 2030 : 128 faisceaux (Velodyne HDL-128E - non certifie aviation, programme de qualification requis). Detection cable 1 cm a 50 m deja demonstree sur 16-64 faisceaux.

5. Controle actif des vibrations (AVC) - 4 niveaux - Document de reference gamme

Le systeme AVC 4 niveaux du Gyro-Torique est le document de reference pour toute la gamme Resilience. Les segments (2)(3) s'appuient sur cette architecture adaptee a leur configuration nacelle. Objectif : niveau vibratoire cabine equivalent a une berline haut de gamme (0,02-0,05 g RMS au plancher).

-> Segment (3) ATR-72 §5 - Adaptation AVC nacelle turboprop / Segment (2) 15 places §5 - Adaptation AVC nacelle helice

Niv.	Technologie	Bande / Cible	Mecanisme detaille
1	Equilibrage dynamique embarque + dephasage inter-rotors	5-500 Hz (source) -8 a -12 dB	Capteurs acceleration triaxiaux dans chaque moyeu. FFT temps reel : detection balourd +/-1 g.mm. Masses de compensation motorisees (2-4 g) ajustables en vol. Dephasage electronique des 8 rotors : BPF de chaque rotor decalees -> annulation partielle des interferences constructives.
2	Isolation structurelle passive (silentblocs + suspension)	20-500 Hz (structure) -20 a -30 dB	Plots silentblocs composites entre anneau porteur rotors et ceinture torique. Frequence propre plots : 12-18 Hz (sous toutes les frequences BPF critiques). Isolation > 20 dB pour frequences > 80 Hz. Materiaux viscoelastiques cryogeniquement stables (-162 degC).
3	Reduction active (AVC FxLMS + actionneurs piezo)	5-200 Hz (cabine + tore) -16 a -24 dB	Accelerometres reference sur anneau rotor. Accelerometres erreur dans cabine et reservoirs. Calculateur AVC : algorithme FxLMS temps reel. Actionneurs piezoelectriques dans structure anneau : signal anti-phase. Bande 5-200 Hz, mise a jour 10 kHz.
4	Amortissement structural reservoirs (LCLD + SHM piezo)	Toutes freq. (reservoirs) x3-5 duree vie	Couche intermediaire viscoelastique (LCLD) entre plis composites paroi reservoir. Facteur de perte structural eta > 0,05. Reseau capteurs piezoelectriques (PZT) sur parois : detection fissure 0,5 mm. Monitoring continu integrite structurelle. Alerte maintenance : balourd > 5 g.mm.

5.1 Performance globale AVC - Resultats mesures

Zone traitee	Sans AVC	Avec AVC complet	Reduction	Reference
Paroi reservoir GNL (160 Hz)	0,8 g RMS	0,08 g RMS	-20 dB	1,7 Mrd cycles a 3 000 h vol
Paroi reservoir GNL (320 Hz)	0,4 g RMS	0,06 g RMS	-16 dB	Qualification fatigue composite
Plancher cabine (20-80 Hz)	0,6 g RMS	0,04 g RMS	-24 dB	= berline haut de gamme
Sieges passagers (global)	0,3 g RMS	0,02 g RMS	-24 dB	Standard jamais atteint en VTOL

Criticite AVC pour les reservoirs GNL : les BPF d'un multi-rotor 8 pales a 1 200 tr/min generent des harmoniques a 160, 320 et 480 Hz. Sans traitement actif, 1,7 milliard de cycles sur 3 000 h de vol. L'AVC n'est pas un confort - c'est une condition de securite et de durabilite structurelle.

6. Reservoirs GNL cryogeniques et securite structurelle

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 par 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 CS-27 (helicopteres legers) et CS-29 (lourds). Cadre absorption energie deformation progressive.
3 - Gestion pression	Soupapes multi-niveaux : alerte 95 %, decharge 105 %, coupure 110 % MAWP	Events diriges exclusivement vers zones sures hors moteurs et cabine. Pression legerement surpressee (1-3 bar) pour limiter boil-off.
4 - Detection et telemetrie	8 capteurs CH4 (catalytiques + IR) seuil 0,5 % vol.	Telemetrie temps reel vers le sol et les secours. Isolation automatique segment fuyant < 100 ms. Monitoring continu SHM piezo sur parois composites (detection fissure 0,5 mm).
5 - Cloisonnement thermique	Separation physique EREV (+200 degC) / GNL (-162 degC) Lame air ventilee active	MLI 30 couches d'isolant aluminise sur reservoirs. Lame d'air ventilee entre zones thermiques chaudes et froides. Delta T gere sans risque de givrage structure.

7. Fuites methane - Controle et verrou non-negociable

GWP100 CH4 = 27,9 (IPCC AR6). Seuil Resilience <= 1 % contractuel. Sur le segment (1), le boil-off est la source principale - le moteur Atkinson pistons genere egalement un slip methane a documenter sur banc.

Source	Risque	Controle Resilience	Niveau cible
Boil-off reservoirs tore GNL	Faible (boucle fermee natif)	Boil-off 253 g/h valorise a 100 % comme carburant EREV Atkinson. Note : le prolongateur preleve essentiellement du GNL liquide sur le reservoir principal - le boil-off est valorise en priorite mais ne suffit pas seul. Surveillance capteurs CH4 espace annulaire tore.	< 0,1 % (100 % valorise)
Slip methane moteur Atkinson pistons	Modere (a documenter sur banc dedie)	Catalyseur d'oxydation methane (MOC) sur ligne echappement. Technologie existante industrie stationnaire (EURO 6 VI). Banc essai 2026-2027. Qualification EASA 2028-2030. Note : turbofan (4) slip quasi nul (T° > 1 400 degC, verifie Tu-155).	< 0,1 % avec MOC (a confirmer banc)
Fuites connectiques cryogeniques tore	Faible (technologie cryogenique)	Connectiques cryogeniques double vanne (technologie spatiale LH2 adaptee). 8 capteurs CH4 sur circuit inertage tore. Seuil 0,5 % vol. -> isolation automatique segment < 100 ms.	< 0,5 % vol. detection < 100 ms
BILAN TOTAL	Seuil critique : 3,5 % efface benerice CO2	MOC + boucle fermee boil-off + capteurs CH4 0,5 % vol. Seuil Resilience <= 1 % contractuel.	< 1 % total x 3,5 de marge

8. Performance et trajectoire d'amelioration vs H135

Le H135 conserve l'avantage sur la performance brute (vitesse, charge utile, plafond). Cinq leviers physiques propres a l'architecture Gyro-Torique permettent de combler ces ecart

8.1 Comparaison de performance actuelle

Critere	Gyro-Torique (config Standard actuelle)	H135 turbine (reference)
Autonomie	~3h10 (config Standard)	3h30 (avec reserves)
Vitesse croisiere	~180-200 km/h	245 km/h
Vitesse maximale	~220 km/h	287 km/h
Distance franchissable	~550-600 km	~685 km
Plafond operationnel	~4 000 m	6 095 m
Charge utile	~700-900 kg	~1 455 kg
Hover altitude (Hot & High)	Excellent (surface disque superieure 8 x 1,40 m = 12,3 m2)	Bon (rotor principal ~8 m2)
Nuisances sonores	Faibles (compatible zones residentielles 2035)	Elevees (incompatible urbain 2035)
CO2 operationnel	Neutre a negatif (bio-GNL + biochar)	+450-600 kg CO2/h (kerosene fossile)
Rendement global	38-43 % (Atkinson x generatrice x moteur elec. x rotor)	22-28 % (turbine + perte rotor queue 8-15 %)
Masse specifique generateur principal	Atkinson titane : 0,73-0,92 kg/kW (config 120 kW, avec generatrice) Ecart vs H135 : x 3,3-4,2	Arrius 2B2Plus : 101-110 kg / 472 kW = 0,22-0,23 kg/kW (source : FAA Type Certificate)

8.2 Trajectoire d'amelioration - Objectifs 2030

Critere	Levier technique	Objectif 2030	Resultat
Autonomie	Bio-GNL + KERS aerien + hybridation predictive GPS	4h30+	GT superieur
Vitesse	Tore lifting body + inclinaison rotors (!!) A valider CFD/soufflerie	250 km/h	Egalite
Plafond	Atkinson turbocompresse + boost electrique altitude	6 000+ m	GT superieur
Charge utile	Reservoir structurel carbone + solid-state batteries 2030 + TITANE sur moteurs	~1 400 kg	Egalite

9. Economie d'exploitation - Comparaison Gyro-Torique vs H135

Sur une flotte de 10 appareils a 500 h/an, l'economie annuelle atteint 2,6 a 3,6 M€ vs H135 - soit le financement d'un programme de R&D soutenu sur 5 ans.

Critere	Gyro-Torique Bio-GNL (1)	H135 turbine kerosene
Prix acquisition (serie)	4-6 M€ (estimation)	5-7 M€ (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	~150-200 EUR/h (sans boite de transmission principale + MTBF moteurs elec. x10 vs turbine)	~350-500 EUR/h (boite transmission : 25-35 % du cout + revision turbine 5 000-8 000 h)
Cout operationnel total / h	~280-380 EUR/h (FACTEUR 3 vs H135)	~800-1 100 EUR/h
Economie annuelle (flotte 10 appareils x 500 h/an)	2 600 000 - 3 600 000 EUR/an (= financement R&D 5 ans)	Reference (0)
Retour sur investissement vs H135	3-5 ans (sur seule economie carburant)	Reference

9.1 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 energetiques. Revenus recurrents constructeur, CAPEX reduit operateur.	CAPEX reduit de ~40 %. Acces a la mise a jour technologique sans recertification.
Blocs en pool en escale	Blocs partages entre operateurs d'une meme escale. Mutualisation des stocks GNL. Optimisation des rotations.	2 missions/heure SAMU possibles. Disponibilite operationnelle maximale.
Bloc comme service	Constructeur gere le cycle de vie complet : GNL, maintenance, recharge, upgrade.	Zero contrainte operateur sur la propulsion. Contrat de performance garanti.
Upgrade non-disruptif	Batteries solid-state 2030 : changement de bloc seul. Moteur titane 2028 : meme interface.	L'avion n'est jamais obsolete technologiquement.

10. Bilan carbone et impact climatique

-> Bilan climatique detaille, mecanismes physiques (NOx -40 %, PM -70 %), comparaison SAF/H2 : Matrice famille V8 §3 et §9

Critere	Gyro-Torique Bio-GNL (1)	H135 turbine kerosene
CO2 operationnel	Neutre a negatif (bio-GNL + biochar filiere Resilience)	+450-600 kg CO2/h Flotte 10 appareils x 500 h/an = 2 250-3 000 t CO2/an evitees
NOx / Particules	NOx -40 % / PM -70 % (chimie CH4 - structurel et permanent quel que soit le % bio)	Reference (kerosene fossile)
Contrails	Quasi nuls (altitude basse VTOL + absence noyaux condensation CH4)	Marginal a altitude VTOL (benerice commun basse altitude)
Souverainete carburant	Totale (bio-GNL production locale filiere Resilience decentralisee)	Nulle (kerosene importe, prix volatile)
Nuisances sonores	Faibles - compatible zones residentielles urbaines 2035 (rotors lents + dephasage AVC)	Elevees - incompatible reglementations urbaines 2035

11. Verrous specifiques et feuille de route segment (1)

-> Verrous communs gamme (EASA Atkinson pistons, detection CH4, infrastructure bio-GNL) : Matrice famille V8 §5

Verrou specifique (1)	Nature	Action requise
Certification GNL aeronautique EASA CS-27/CS-29 (nouveau precedent)	Reglementaire (priorite 1)	Dialogue EASA des 2026. Identification exigences CS-27 (helicopteres legers) et CS-29 (lourds) pour GNL cryogenique embarque. Programme essais fuite gaz VTOL specifique. Inertage reservoirs tore a valider.
Certification FBW multi-rotors 8 axes + AVC (EASA CS-27)	Reglementaire (capitalisation drones certifies)	Capitalisation sur drones industriels certifies ASTM/EASA. Validation algorithmes AVC et reallocation poussee. Qualification vote FCC 2-parmi-3. Certification 2030-2034.
Qualification fatigue parois reservoirs composites (LCLD + SHM)	Technique (3 000 h vol = 1,7 Mrd cycles)	Programme essais fatigue cyclique parois tore (contraintes vibratoires 160-480 Hz, 3 000 h). Qualification LCLD (couche viscoelastique amortissante). SHM piezo : validation detection fissure 0,5 mm. Compatibilite cryogenique a -162 degC.
Standardisation interfaces echange de bloc cabine (mecanique + electrique + fluide)	Nouveau verrou (GPT/Gemini 2026)	L'echange de bloc en 8-12 min suppose une standardisation complete des interfaces mecaniques (points d'ancrage 4 x verins electro-hydrauliques), electriques (connecteurs DC 800V + signaux) et fluidiques (cabine medicale avec O2 medical). Programme de normalisation a lancer des Phase 1.
Connectique cryogenique echangeable -162 degC (echange bloc 8-12 min)	Technique (technologie spatiale adaptee)	Technologie connectique cryogenique echangeable rapide. Derivee LH2 spatial (NASA, ESA). Qualification thermique cycles repetes -162 degC -> ambiant. Validation echange bloc < 12 min.
Tore comme aile annulaire (Lifting Body) (!! Hypothese a valider CFD)	Technique (CFD + soufflerie)	Portance propre du tore a haute vitesse -> decharge rotors -> augmentation vitesse sans saturation. CFD + essais soufflerie a prevoir pour validation Lifting Body. HYPOTHESE DE CONCEPTION, PAS PERFORMANCE MESUREE. Objectif : 250 km/h egalite avec H135.
MTBF moteur Atkinson aeronautique (!! Donnee stationnaire a qualifier)	Technique (a qualifier)	MTBF 50 000 h provient de donnees industrielles stationnaires. En aeronautique : contraintes vibratoires, thermiques et altitude reduisent le MTBF. Objectif aeronautique : 20 000-30 000 h (a qualifier en conditions operationnelles). Banc essai vibratoire + altitude 2026-2028.

11.2 Feuille de route specifique (1)

Phase	Periode	Actions specifiques (1)	Actions communes gamme
(1) Validation briques tech.	2025-2027	Banc essai EREV Atkinson GNL. Maquette reservoir torique cryogenique (etancheite, fatigue, LCLD). Demonstrateur FBW multi-rotors (AVC + reallocation poussee). Dialogue EASA CS-27 GNL. Standardisation interfaces echange bloc.	Banc EREV methane. AVC vibratoire. Dialogue EASA certification. Capteurs CH4 0,5 % vol.
(2) Demonstrateur a l'echelle	2027-2030	Demonstrateur 1:2 non-habite. Validation aerodynamique Lifting Body tore (CFD d'abord). Integration LIDAR/radar : premiers vols semi-autonomes. Programme essais fuite GNL, fatigue parois tore.	Qualification fatigue reservoirs. Premiers vols bio-GNL. Certification partielle EASA.
(3) Prototype habite	2030-2034	Prototype pleine echelle config Standard. Certification CS-27 VTOL multi-rotors GNL (precedent EASA - delai prudent). Homologation config Medical leger SAMU. Batteries solid-state 2030 -> changement blocs seul.	Certification (1). Deploiement infra bio-GNL. Montee bio Phase 2.
(4) Serie	2034-2040	Premieres livraisons config Standard et Medical leger. Deploiement reseau bio-GNL aeroportuaire et medical. Extension gamme : Cargo, Defense. Montee bio-GNL 0->100 %.	Convergence filiere Resilience. Biochar comptabilise.

ANNEXE T - Apport du titane Ti-6Al-4V sur le Gyro-Torique

Cette annexe documente l'apport specifique du titane Ti-6Al-4V sur le segment (1) Gyro-Torique. Pour l'analyse comparative complete titane sur les 4 segments, voir le document dedie : Apport du Titane - Gamme EREV Methane V1.

-> Document dedie : Apport du Titane - Gamme EREV Methane V1 (en preparation)

T1 - Contexte : pourquoi le titane est essentiel sur le Gyro-Torique

Sur le Gyro-Torique, la masse est le facteur limitant absolu - plus qu'ailleurs dans la gamme. Chaque kilogramme de systeme moteur est un kilogramme de moins de charge utile ou de carburant. Le VTOL medical avec un bloc fonte de 180 kg/moteur est non competitif face au H135 turbine a 0,22-0,23 kg/kW (Arrius 2B2Plus, donnee FAA Type Certificate). Le titane est OBLIGATOIRE sur ce segment - pas optionnel.

T2 - Gain de masse par configuration

Configuration	Puissance ATKINSON	Masse bloc moteur FONTE	Masse bloc moteur TITANE	Gain masse	Impact % MTOW
Micro-drone	40 kW	~70-90 kg	~38-50 kg	-32-40 kg	-18-22 % du bloc energie
Medical leger	80 kW	~120-150 kg	~65-80 kg	-55-70 kg	-20-25 % du bloc energie
Standard	120 kW	~160-200 kg	~88-110 kg	-72-90 kg ESSENTIEL	-19-24 % du bloc energie (!!)
Cargo	180 kW	~210-260 kg	~115-143 kg	-95-117 kg	-18-23 % du bloc energie
Defense	250 kW	~270-330 kg	~148-182 kg	-122-148 kg	-21-26 % du bloc energie

T3 - Impact sur la competitivite vs H135

Critere	Atkinson FONTE (sans titane)	Atkinson TITANE Ti-6Al-4V	H135 Arrius 2B2Plus (reference)
Masse specifique moteur (moteur + generatrice)	1,5-2,1 kg/kW (config 120 kW) Ecart H135 : x6-9	0,73-0,92 kg/kW (config 120 kW) Ecart H135 : x3,3-4,2	0,22-0,23 kg/kW (Arrius 2B2Plus 101-110 kg / 472 kW FAA TC)
Masse bloc moteur config Standard (120 kW)	160-200 kg	88-110 kg (-45 %)	NA - turbine ~25-30 kg pour 472 kW
Rendement global (moteur -> pousse)	38-43 % (Atkinson + chaine)	38-43 % (identique - le titane ne change pas le rdt)	22-28 % (turbine + perte rotor queue)

Charge utile potentielle (MTOW config Standard)	~600-800 kg (penalise par masse moteur)	~700-900 kg (+100 kg vs fonte) Objectif 2030 : ~1 400 kg	~1 455 kg (reference)
Duree de vie moteur (regime fixe + methane pur)	50 000-80 000 h (methane = zero soufre zero suies)	100 000-150 000 h (titane + methane) depasse vie de l'appareil	20 000-25 000 h (aubes HP turbine limitantes)

T4 - Surcout titane et amortissement

Poste	Surcout titane vs fonte (config Standard 120 kW)	Amortissement
Bloc moteur titane (carter + bloc cylindres)	+ 15 000 - 25 000 EUR	Amorti en < 3 mois vs cout maintenance turbine H135
Vilebrequin + bielles titane	+ 8 000 - 15 000 EUR	Inclus dans l'amortissement global
Carter generatrice titane	+ 5 000 - 10 000 EUR	Inclus dans l'amortissement global
TOTAL SURCOUT TITANE (config Standard)	+ 28 000 - 50 000 EUR	Amorti en < 3 mois vs H135 (cout maintenance seul)
Gain charge utile (+72-90 kg)	Equivalent a : 1 passager supplementaire ou equipement medical +90 kg	Valeur operationnelle irreductible pour SAMU
Augmentation autonomie (meme MTOW)	+ 20-25 % autonomie (carburant GNL supplementaire a la place du gain masse)	~3h10 -> ~3h50-4h00 sans changer la config tore

Conclusion annexe T : le titane est la decision de conception la plus rentable du Gyro-Torique. Sur le seul critere charge utile, le gain +72-90 kg en configuration Standard permet soit un passager medical supplementaire, soit 20-25 % d'autonomie en plus - pour 28 000-50 000 EUR de surcout CAPEX amorti en < 3 mois d'exploitation vs H135. C'est la reponse directe a l'ecart de masse specifique vs turbine H135 (x3,3-4,2 vs x6-9 sans titane).