

AVIATION METHANE EREV ATKINSON

Gamme complete : VTOL · Regional · Long-courrier

APPORT DU TITANE Ti-6Al-4V — Synthèse technique et économique

Moteurs Atkinson pistons a regime fixe — Note V4 (juillet 2026)

Ce document synthetise l'apport du titane Ti-6Al-4V sur les 4 segments de la gamme EREV Aviation Resilience. Le titane n'est pas une option d'optimisation incrementale : c'est une decision de conception qui determine la faisabilite sur certains segments et l'avantage competitif sur les autres.

-> Gyro-Torique Bilan Masse Complet V1 — analyse rigoureuse bilan masse et competitivite vs H135

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

NOTE METHODOLOGIQUE (positionnement Gyro-Torique) : le bilan de masse rigoureux (doc. dedie) etablit que le vrai verrou de masse sur le Gyro-Torique n'est pas le moteur mais la batterie : solid-state 300+ Wh/kg (horizon 2028-2030) determine +/- 444 kg de masse — soit 3x le gain titane. En scenario B (solid-state 2030, coherent avec certification 2030-2034) : charge utile SANS titane = 750-1 250 kg (deja competitif SAMU). AVEC titane = +72-92 kg supplementaires = +1 passager medical OU +25 % autonomie. Le titane est PRIORITAIRE sur ce segment — pas une condition de faisabilite binaire.

1. Pourquoi le titane — Physique et thermodynamique

Deux proprietes du systeme EREV Atkinson rendent le titane particulierement adapte : (1) regime fixe (~2 500 tr/min) — 12-15 cycles thermiques/an vs 3 000-5 000 pour un moteur auto — la fatigue thermique est quasi eliminee pour tous les matériaux ; (2) temperature parois basse (250-350 degC) — le titane y est thermodynamiquement stable avec une marge de securite x2. Ces deux conditions sont permanentes et inherentes a l'architecture EREV.

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 % sur pieces structurelles.
Resistance [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 ou fluage.
Dilatation [µm/m·K]	8,6 (tres faible)	11	12	Regime fixe : T° constante -> contraintes differentielles quasi nulles. Titane : dilatation 30 % plus faible que acier - > fatigue quasi eliminee.
Corrosion H2O (combustion CH4)	Nulle (TiO2 autoprotetrice)	Moderee (180-250 degC)	Moderee	CH4 -> CO2 + 2H2O. L'eau se condense zone echappement a 180-250 degC -> corrosion fonte/acier. Titane : immunise par nature.
Pistons / segments	NON (conductivite faible)	NON	NON	Solution hybride : bloc titane + pistons Al-Si AS17G + chemises Nikasil. Conductivite thermique Al : 130 W/m·K vs Ti : 22 W/m·K. Les pistons restent en alu pour evacuation thermique.

2. Gain de masse par segment — Comparatif et impact sur la charge utile

Le gain de masse (-45 % sur les pieces structurelles) est constant en proportion pour tous les segments. Son impact sur la charge utile varie selon la taille de l'appareil et le verrou de conception dominant.

Segment	Puissance moteur	Masse groupe EREV FONTE [kg]	Masse groupe EREV TITANE [kg]	Gain [kg]	Impact charge utile	Priorite titane	Verrou dominant
(1) Gyro-Torique config Medical	1 x 80 kW	120-150	65-80	+55-70 kg (-45 %)	+1 passager medical OU +25 % autonomie	PRIORITAIRE (gain operationnel decisif)	Batterie solid-state 2028-2030 (+/- 444 kg)
(1) Gyro-Torique config Standard	1 x 120 kW	160-205	88-113	+72-92 kg (-45 %)	842-1 142 kg (vs 770-1 050 fonte)	PRIORITAIRE (gain operationnel decisif)	Batterie solid-state 2028-2030
(2) 15 places EREV 2 x 500 kW	2 x 500 kW	1 500-2 100	1 200-1 800	+280-320 kg (-20 %)	MTOW 8,5 t maintenu Charge 100 % preservee	IMPORTANT (resout incertitude MTOW)	Masse moteurs incertitude critique (a mesurer sur banc)
(3) ATR-72 EREV 2 x 900 kW	2 x 900 kW	1 480-1 840	780-1 016	+666-824 kg ~700 kg (-45 %)	MTOW 23 t maintenu avec confort	UTILE (ferme bilan masse avec certitude)	Masse moteurs incertitude moderee (a mesurer sur banc)
(4) Long-courrier Prolongateur E-REV 60-80 kW	1 x 60-80 kW (APU intelligent)	80-110	44-60	+36-50 kg (-45 %)	Prolongateur plus leger + durable	COMPLEMENTAIRE (gain utile sur appareil 280 t)	Turbofan methane (propulsion principale non concernee)

Note segment (4) : le long-courrier utilise un turbofan methane comme propulsion principale (turbomachine — non concernee par le titane pistons). Le prolongateur E-REV Atkinson embarque (~60-80 kW, APU intelligent) est exactement la meme architecture que les segments (1)(2)(3) : gain titane -45 % sur le groupe moteur = +36-50 kg de masse disponible en plus pour le carburant ou le fret sur un appareil de ~280 t. Gain relatif faible mais coût CAPEX titane faible aussi.

3. Duree de vie — Double avantage regime fixe + titane

Le regime fixe et le titane agissent sur des mecanismes de degradation differents et se combinent de facon multiplicative. La colonne 'Reference industrielle' ancre les estimations dans des donnees connues.

Critere	Turbine H135 Arrius 2B2Plus	EREV Atkinson FONTE regime fixe + CH4	EREV Atkinson TITANE regime fixe + CH4	Reference industrielle connue
Fatigue thermique (cycles chaud/froid)	Elevee 3 000-5 000 h (demarrages/extinctions quotidiens)	Tres faible 20 000-30 000 h (12-15 cycles/an) Valeur centrale : 25 000 h	Quasi nulle 30 000-50 000 h Valeur centrale : 40 000 h	Groupe electrogene GNL a regime fixe : 80 000-120 000 h (MAN, Caterpillar) Moteur navire GNV : 40 000-60 000 h
Corrosion (H2O combustion)	Negligeable (T° > 1 000 degC au-dessus condensation)	Moderee (H2O a 180-250 degC zone echappement)	Nulle (TiO2 stable)	Moteurs GNV automobiles : corrosion reduite vs essence
Usure cylindres (H/C = 4, zero soufre)	N/A (turbine)	Reduite de 40-60 % vs kerosene/essence Valeur centrale : -50 %	Reduite de 40-60 % (idem fonte) Chemises Nikasil optimisees	Bus GNV Paris RATP : +50 % duree de vie moteur vs diesel (retour exploitation)
TBO (intervalle revision majeure)	5 000-8 000 h (aubes HP turbine) Valeur centrale : 6 500 h	20 000-30 000 h Valeur centrale : 25 000 h	30 000-50 000 h Valeur centrale : 40 000 h	Moteurs stationnaires GNL a regime fixe : 40 000-60 000 h TBO (Wärtsila, MAN)
Cout revision majeure / moteur [EUR]	400 000-800 000 (aubes HP + chambre)	30 000-80 000 (soupapes, segments)	30 000-80 000 (soupapes TiN, intervalles x2)	Moteur industriel 20 000-50 000 EUR (estimation)
Duree de vie totale moteur	20 000-25 000 h Valeur centrale : 22 500 h	40 000-70 000 h Valeur centrale : 55 000 h	60 000-100 000 h Valeur centrale : 80 000 h (depasse vie avion)	Moteur diesel maritime a regime fixe : 80 000-120 000 h (Wärtsila, MAN)
Revisions majeures sur 20 ans (3 000 h/an = 60 000 h)	8 revisions (TBO 6 500 h)	2-3 revisions (TBO 25 000 h)	1-2 revisions (TBO 40 000 h)	Gain titane vs fonte : -1 revision sur 20 ans

4. Surcout titane et retour sur investissement — Par segment

Le surcout CAPEX titane est systematiquement inferieur a 3 % du prix d'acquisition de l'appareil. Il est amorti en quelques mois sur la seule economie de maintenance vs turbine kerosene.

Segment	Surcout CAPEX titane [EUR]	Economie maintenance 20 ans vs turbine [EUR]	ROI surcout titane	Gain operationnel specifique
(1) Gyro-Torique config Standard (120 kW)	+ 28 000-50 000	1 700 000-3 700 000 (vs H135 turbine)	< 3 mois vs H135	+72-92 kg charge utile = +1 passager medical OU +25 % autonomie
(2) 15 places EREV 2 x 500 kW	+ 240 000-500 000	12 000 000-19 000 000 (vs ERA TG600 Safran)	< 18 mois vs ERA	MTOW 8,5 t maintenu Charge utile 100 % preservee
(3) ATR-72 EREV 2 x 900 kW	+ 300 000-600 000	12 000 000-19 000 000 (vs PW127M / ERA equiv.)	< 30 jours (flotte 10 avions)	Bilan masse ferme avec confort MTOW 23 t garanti
(4) Long-courrier Prolongateur E-REV (60-80 kW)	+ 20 000-40 000	90 000-180 000 (maintenance E-REV seul)	< 6 mois	E-REV plus leger et plus durable sur appareil 280 t
TOTAL GAMME (1 avion de chaque segment)	+ 588 000-1 190 000 surcout CAPEX total	25 790 000-41 880 000 economie totale 20 ans	< 18 mois (pire cas)	Valeur residuelle moteurs elevant encore le bilan : moteurs titane a ~60 000-100 000 h restantes a 20 ans

5. Synthese par segment — Tableau de bord

Lecture : la priorite titane reflète l'impact sur la faisabilite ou la competitivite du segment. Le verrou dominant indique ce qui conditionne le bilan masse plus que le titane lui-même.

Segment	Priorite titane	Gain masse	TBO titane (valeur centrale)	Surcout CAPEX	ROI	Gain operationnel specifique
(1) Gyro-Torique Medical / Standard	PRIORITAIRE (gain decisif par mission)	-55-92 kg (selon config)	40 000 h (valeur centrale)	+28 000-50 000 EUR	< 3 mois	+1 passager medical OU +25 % autonomie Verrou reel : batterie solid-state 2030
(2) 15 places EREV	IMPORTANT (resout incertitude masse critique)	-280-320 kg	40 000 h (valeur centrale)	+240 000-500 000 EUR	< 18 mois	MTOW 8,5 t maintenu Charge 100 % preservee
(3) ATR-72 EREV	UTILE (bilan masse confortable)	~700 kg	40 000 h (valeur centrale)	+300 000-600 000 EUR	< 30 jours (flotte)	Confort conception MTOW 23 t sans incertitude
(4) Long-courrier E-REV seulement	COMPLEMENTAIRE (gain sur systeme global)	-36-50 kg (E-REV seul)	40 000 h (valeur centrale idem autres segments)	+20 000-40 000 EUR	< 6 mois	Prolongateur plus leger et durable Turbofan non concerne

6. Contraintes specifiques a la mise en oeuvre du titane aeronautique

Les contraintes du titane sont reelles mais toutes resolues en aeronautique courante. Aucune n'est un obstacle nouveau — elles sont standard sur A350 (40 % titane en masse), B787, trains d'atterrissage certifies.

Contrainte	Description	Solution / Mitigation	Surcoût
Usinabilite (x4 plus difficile que aluminium)	Outils carbure WC obligatoires. Vitesses de coupe 30-50 m/min vs 300+ pour alu. Lubrification abondante.	Standard aeronautique haute performance. Sous-traitants europeens disponibles (Precision Castparts, Arcam, Safran Nacelles). Deja maitrise sur cellules A350.	Inclus dans surcout CAPEX (x3-5 vs alu)
Soudage sous atmosphere inerte (chambre argon)	Le titane s'oxyde instantanement a l'air lors du soudage. Atmosphere argon/helium obligatoire.	Technologie standard aeronautique (deja requise aciers inox 316L). Chambres argon disponibles chez tous sous-traitants tier-1. Pas un obstacle.	Negligeable (equipement existant)
Fretting (usure micro-glissement aux assemblages boulonnes)	Sensibilite aux interfaces boulonnees sous vibrations. Risque sur fixations bloc-moteur.	Insertions acier inox ou bagues bronze aux zones de contact. Traitement de surface TiN (hardness 2 000 HV). Standard sur trains d'atterrissage Boeing/Airbus.	+5-10 % sur cout assemblages critiques
Conductivite thermique faible (22 W/m·K vs 130 alu)	Le titane evacue mal la chaleur. Pistons titane = temperature de tete plus elevee -> risque detonation.	Solution hybride : bloc moteur titane + pistons Al-Si AS17G + chemises Nikasil. Deja appliquee en F1 et aviation competition. Le bloc est en titane, les pistons restent en alu.	Zero surcout (pistons alu standard)
Cout matiere (x20-40 vs fonte)	Ti-6Al-4V : 30-70 EUR/kg lingot. Piece forgee apres usinage : 200-500 EUR/kg. vs fonte : 1-2 EUR/kg.	Le surcout matiere est une fraction du surcout total (usinage dominant). A l'echelle aeronautique : meme cout relatif que ce que paye deja Airbus sur A350 (40 % titane en masse). Amorti < 18 mois vs maintenance turbine.	Inclus dans surcout global \$4

7. Conclusion — ROI global gamme et decision de conception

Sur la gamme complete, le titane represente un surcout CAPEX total de 588 000-1 190 000 EUR pour une economie de maintenance de 25-42 M EUR sur 20 ans. C'est le meilleur rapport investissement/retour du programme.

Indicateur	Valeur gamme complete (1 avion de chaque segment)	Lecture strategique
Surcout CAPEX total titane vs moteurs fonte/acier	588 000 - 1 190 000 EUR (valeur centrale : ~900 000 EUR)	< 3 % du prix d'acquisition cumule d'une gamme complete. Fraction negligeable.
Economie maintenance totale vs turbine kerosene sur 20 ans	25 790 000 - 41 880 000 EUR (valeur centrale : ~34 M EUR)	x29 a x35 le surcout CAPEX. Retour sur investissement exceptionnel, independamment des gains de charge utile.
ROI surcout titane (pire cas = segment (2))	< 18 mois (sur maintenance seule)	Sans compter les gains de charge utile, d'autonomie et de valeur residuelle. Le titane se finance lui-meme.
Valeur residuelle moteurs a 20 ans	Elevee sur tous les segments (60 000-100 000 h restantes sur moteur titane a 20 ans)	Un moteur titane EREV Atkinson a 20 ans a plus de la moitie de sa vie devant lui. Valeur residuelle significative a la revente ou au retrofit. Turbine kerosene : quasi nulle.
Gain operationnel cumule (charge utile + autonomie)	(1) : +1 passager medical OU +25 % autonomie (2) : MTOW maintenu (3) : bilan masse certain (4) : E-REV plus leger	Ces gains operationnels sont independants de l'economie de maintenance. Ils s'y ajoutent.
Decision de conception (pas option incrementale)	Titane = decision native a prendre des la conception, pas un upgrade posterieur	L'EREV Atkinson methane en titane Ti-6Al-4V se positionne comme un moteur aeronautique concu nativement pour l'aviation — pas un derive industriel adapte. C'est l'argument determinant face a Safran, Rolls-Royce et l'EASA.

FORMULATION STRATEGIQUE : le moteur EREV Atkinson methane en alliage de titane Ti-6Al-4V est un generateur aeronautique concu nativement pour l'aviation, a combustion propre, a regime fixe, dont la duree de vie depasse celle de l'appareil qu'il equipe. Cette formulation, combinee au ROI de la gamme, est la reponse directe a tout interlocuteur industriel ou reglementaire qui comparerait cette architecture a un 'moteur de voiture adapte'.