

AVION MOYEN-COURRIER BIO-GNL

Architecture cryogenique integree ailes + gestion thermique + auxiliaires electriques

Extension du segment (4) Long-courrier — Programme Resilience V11

Version technique V2 — Document de travail — Hypotheses explicitement bornees — Juillet 2026

Ce document traite la faisabilite technico-certifiable d'un avion moyen-courrier (classe A321neo) utilisant le Bio-GNL liquide (-162 degC) comme carburant principal. Il constitue le segment intermediaire entre le long-courrier (4) [turbofan methane, reservoirs fuselage arriere] et les segments regionaux (2)(3). Les corrections et amendements des documents Programme Resilience V11 de juillet 2026 sont integres : rendements corriges, verrous identifies, dessication GNL, gestion thermique.

-> Segment (4) Long-courrier Bio-GNL V6 — reference architecture turbofan methane

-> Matrice de famille Aviation Methane EREV Atkinson Gamme V9 — cadre gamme

-> Note Aviation Bio-GNL Programme Resilience V11 — donnees thermodynamiques

1. Perimetre et Positionnement dans la Gamme

Le moyen-courrier Bio-GNL est le maillon manquant entre le long-courrier (4) (>4 000 km, A350 equivalent, turbofan seul) et les segments regionaux (2)(3) (<1 500 km, ATR/15 places, EREV pistons). Sur 2 000-4 000 km, la propulsion est assures par les memes turbofans methane que le (4), mais l'architecture des reservoirs et la gestion energetique sont simplifiees par la masse et la duree de vol inferieures.

Critere	Moyen-courrier Bio-GNL (ce document)	Long-courrier (4) (reference)	ATR-72 (3) (reference)
Classe avion	Monocouloir 180-220 pax (A321neo equivalent) MTOW ~95-100 t	Bicouloir 300-400 pax (A350 equivalent) MTOW ~280 t	Turboprop regional 70 pax, 23 t MTOW
Propulsion	Turbofan methane (idem Long-courrier) 2 x CFM LEAP ou PW1000G adaptes CH4	Turbofan methane 2 x Rolls-Royce / Safran sur-detente	EREV Atkinson pistons 2 x 900 kW + helices electriques
Carburant	Bio-GNL -162 degC Reservoirs aile (cryogeniques)	Bio-GNL -162 degC Reservoirs fuselage arriere (8 segments)	GNV 250 bar ou GNL si > 800 km
Autonomie cible	2 000-4 000 km (Paris-Istanbul, Paris-Abidjan)	6 000-14 000 km (intercontinental)	400-700 km (regional)
Architecture reservoirs	Integres dans les ailes (caissons redesignes)	Fuselage arriere (+36 % volume vs kero)	Nacelle dorsal ou arriere fuselage
E-REV Atkinson (prolongateur)	NON (APU GNL uniquement + petite batterie tampon)	OUI (60-80 kW APU intelligent + Stirling)	OUI (2 x 900 kW propulsion principale)
Avantage cle vs long-courrier	Reservoirs aile (pas de redesign fuselage + CG stable)	Volume +538 m3 (Paris-NY) -> fuselage elargi requis	N/A (segment different)

2. Avion de Reference et Profil de Mission

Parametre	Valeur	Commentaire
Classe avion	Monocouloir 180-220 pax MTOW ~95-100 t	Equivalent A321neo. Cabine inchangee.
Autonomie cible	2 000-4 000 km Reserve : 45 min + diversions	Couvre Europe-Afrique de l'Ouest, Europe-Moyen-Orient, transatlantique court.
Missions typiques	2-4 rotations / jour Vol unitaire : 2-4 h Temps sol : 1-4 h	Profil similaire A321neo existant. Pression sur rapidite de ravitaillement.
Carburant embarque (mission 3 000 km)	~7 000-8 500 kg GNL (vs ~12 000 kg kerosene a energie equivalente)	PCI GNL 50 MJ/kg vs 43 MJ/kg kero (+16 %). Rendement turbofan methane legerement superieur au kero. Masse carburant -30 a -40 % vs kerosene.
Volume reservoirs (mission 3 000 km)	~17-21 m3 brut GNL (dont ~7-9 m3 net + isolation MLI)	Densite GNL 420 kg/m3. Volume brut = volume net + double paroi MLI (~40-50 % volume total). A comparer avec reservoirs aile A321 : ~26 m3 (kero).

3. Carburant et Proprietes Energetiques

Carburant	PCI massique	Densite	PCI volumique	Avantage / Contrainte
Jet-A1 (reference)	~43 MJ/kg	800 kg/m3	~34 GJ/m3	Reference. Reservoirs souples integres aile, zero surcout masse.
Bio-GNL (-162 degC)	~50 MJ/kg (+16 %)	420 kg/m3	~21 GJ/m3 (-38 % vol.)	Masse carburant -15 a -20 % a energie egale. Volume +50-60 % vs kero. Reservoirs cryogeniques double paroi requis (+500-700 kg vs reservoirs kero).
GNV 250 bar (comparaison)	~50 MJ/kg	~180 kg/m3	~9 GJ/m3 (-73 % vol.)	Densite volumique tres insuffisante pour moyen-courrier. Volume requis x4 vs kero. Non viable sur cette classe. Confirme le choix GNL.

Conclusion §3 : le GNL est le seul vecteur energetique viable pour cette classe. Le GNV est exclu par la contrainte volumique (-73 % energie/litre vs kero). L'hydrogene liquide presente des contraintes encore plus penalisantes (volume x3,5 vs GNL, boil-off irreductible). Le Bio-GNL est la seule option compatible avec une integration aile sur A321-equivalent.

4. Architecture des Reservoirs Cryogeniques

4.1 Principe retenu — Integration aile

Contrairement au long-courrier (4) qui necessite des reservoirs en fuselage arriere (+36 % volume, redesign majeur), le moyen-courrier peut integrer le GNL dans les caissons d'aile redesignes. C'est l'avantage architectural decisif de cette classe : le fuselage est integralement preserve.

Critere	Integration aile (moyen-courrier)	Integration fuselage arriere (long-courrier ref.)
Volume disponible vs volume requis	Caissons aile A321 redesignes : ~26 m3 kero -> ~17-21 m3 GNL net Compatible apres redesign	Fuselage arriere (+36 % volume) Passagers reduits ou fuselage elargi Redesign majeur requis
Centre de gravite	Stable : reservoirs symetriques gauche/droite, vidange simultanee FMS classique suffisant	Variable : 8 segments, vidange sequencee, FMS specifique GNL, FBW plus reactif requis
Jaugeage GNL (phases liquide/gaz)	Simplifie : 2 reservoirs symetriques + capteurs capacitifs cryogeniques	Complexe : 8 segments + variations densite + FMS gestion CG
Certification CS-25	Precedent CS-25 aile cryogenique a etablr. Effort eleve mais perimetre delimite.	Precedent CS-25 fuselage cryogenique a etablr. Plus complexe. Impact structure primaire.
Fuselage	100 % preserve (zero redesign fuselage)	Redesign ou elargissement requis pour volume GNL (+36 %) Surface mouillee +8-12 %
Avantage industriel	Cabine commerciale inchangee Certification passagers standard Moins de precedents a ceer	Fuselage commercial incompatible New design requis

4.2 Specifications techniques reservoirs aile

Parametre	Valeur / Specification	Commentaire
Type de reservoir	Double paroi : inner : Al 2219 ou inox 304L outer : CFRP structural Isolation : MLI 30 couches + vide partiel	Al 2219 : alliage cryogenique certifie (LH2 spatial). Inox 304L : precedent cuves GNL marines. CFRP : allège et isole structurellement.
Epaisseur isolation	100-150 mm MLI (vs 200-300 mm Long-courrier)	Duree de vol plus courte (2-4 h vs 12-14 h) -> isolation moins critique. Boil-off < 0,05 %/vol.
Taux de pertes thermiques	<= 0,4 %/jour <= 0,05 %/vol (3 h)	Standard industrie GNL maritime adapte. Boil-off non dimensionnant sur vol court.

Pression service	1-3 bar (legerement surpresse) MAWP : 4 bar Soupapes : 3,5 bar alerte 4,2 bar decharge	Legere surpression : reduit boil-off + facilite vidange turbopump. Standard cuves GNL marines.
Dessication GNL avant injection (VERROU SECURITE)	Dessiccateur tamis 3A obligatoire avant injection turbofan Point de rosee < -60 degC	Verrou identifie (Programme Resilience V11 juillet 2026). Methane vaporise contient humidite residuelle -> glace dans injecteurs turbofan. Tamis 3A (2 lits, regeneration cyclique). Masse : 15-25 kg. Identique segment (4) Long-courrier §6.
Securite (5 niveaux)	1) Double paroi + vide partiel 2) Soupapes multi-niveaux 3) Capteurs CH4 0,5 % vol. 4) Inertage N2/CO2 5) Zone crash-protected chaque reservoir	Standards CS-25 §25.1455 adaptes cryogenie. Precedent LH2 spatial exploitable. Pas de precedent aile cryogenique civil - programme de qualification specifique requis.

5. Gestion du Boil-off

Sur moyen-courrier, le boil-off est moins critique qu'en long-courrier grace aux vols plus courts et aux rotations rapides. L'approche retenue valorise 100 % du boil-off sans reliquefaction active.

Phase	Boil-off genere	Valorisation	Residuel
Vol (2-4 h)	1-3 kg GNL/vol (<= 0,05 %/vol)	APU GNL (demarrage + secours) Conditionnement cabine Auxiliaires electriques	Zero : 100 % valorise en vol (faible volume)
Escale courte (1-2 h)	2-8 kg GNL (accumulation)	APU GNL maintien + systemes sol + conditionnement cabine	Zero si APU GNL en service continu
Escale longue (> 8 h / nuit)	10-40 kg GNL	Option 1 : APU GNL maintenu Option 2 : Vent controle (conformite ICAO) Option 3 : raccordement collecte GNL sol	Flux gerable (vs 200-400 kg Long-courrier nuit)

Avantage moyen-courrier vs long-courrier : le boil-off journalier (10-40 kg) est 5-10 fois inferieur a celui du long-courrier (200-400 kg). La gestion au sol est significativement plus simple et ne necessite pas de reliquefaction active ni de systeme Stirling embarque.

6. Propulsion — Turbofan Methane

Le moyen-courrier utilise la meme architecture de propulsion que le segment (4) long-courrier : turbofan methane a sur-detente optimisee. L'EREV Atkinson pistons n'est pas la propulsion principale — il est cantonné a son role d'APU intelligent.

6.1 Turbofan methane — specifications

Parametre	Valeur estimee	Commentaire
Base moteur	CFM LEAP-1A ou PW1100G adapte methane (sur-detente Atkinson)	Adaptation chambre de combustion + injecteurs + materiaux compatible CH4. Programme moteur dedie requis.
Rendement thermique turbofan methane	44-48 % (vs 42-44 % kero)	Gain : PCI methane +16 % + sur-detente optimisee. Note : distinct des 52-55 % des moteurs Atkinson pistons (architectures incomparables).
Rendu propulsif global (thermique + propulsif)	28-31 % (GNL seul) 29-32 % (GNL + precooling passif)	Source : Note Aviation Resilience V11. Le precooling passif (valorisation froid -162 degC) apporte +1-2 pts sur le cycle.
NOx (vs kerosene)	-40 % attendu (chimie CH4, mecanisme Zeldovich etabli, a confirmer sur banc)	Mecanisme de Zeldovich : formation NOx exponentielle avec T degC. Combustion CH4 plus froide -> reductioin structurelle. Quel que soit le % bio-GNL.
Particules fines (PM)	-70 % attendu (CH4 pur, zero soufre, verifie Tu-155, a confirmer turbofan)	CH4 pur : H/C = 4, zero soufre. Combustion complete. Resultat verifie Tu-155 (~100 vols GNL aviation, 1988-1991).
Contrails	-50 a -70 % (FL350-410)	Altitude de croisiere moyen-courrier : FL350-390. Benefice contrails significatif (vs segments regionaux FL180-250 ou le gain est moindre).
Adaptation (effort industriel)	Chambre combustion + injecteurs GNL + materiaux compatibles (programme 8-12 ans)	Technologie de base (turbofan) mature. Effort d'adaptation modere vs nouveau moteur. CFM/Safran/Rolls-Royce ont chacun des axes de R&D methane.

6.2 APU GNL — Prolongateur EREV Atkinson (role limite)

Sur le moyen-courrier, l'EREV Atkinson pistons est cantonné à son rôle naturel : APU intelligent (auxiliaire de puissance). Il ne contribue pas à la propulsion principale.

Composant	Specification	Role
APU GNL (Atkinson pistons 40-80 kW)	Moteur Atkinson 6 cyl. Regime fixe ~2 500 tr/min Rendement 46-52 % Masse estimee : 80-120 kg (+ 40-60 kg generatrice)	Demarrage moteurs (remplace APU kero). Alimentation electrique sol + escale. Secours electrique en vol (RAT remplace). Conditionnement cabine escale. Boil-off valorise comme carburant APU.
Batterie tampon	80-150 kWh (LFP haute puissance) Masse : 400-750 kg (200 Wh/kg horizon 2030)	Demarrage APU GNL. Secours transitoire < 30 min. Pas de propulsion. Compatible masse/securite feu/crashworthiness CS-25.
Puits de chaleur passif GNL (-162 degC)	~7 kW thermiques (valorisation gratuite vaporisation naturelle)	Precooling air prelevement moteur. Refroidissement avionique et racks electroniques. Conditionnement cabine partiel. Economie electrique estimee 3-5 %.

7. Impact Masse et Structure

Le surpoids lie aux reservoirs cryogeniques est compense par la reduction de masse carburant (GNL plus leger que kero a energie egale) et optimise par le choix integration aile (fuselage et CG inchanges).

Poste	Delta masse [kg]	Commentaire
Reservoirs GNL vs reservoirs kero aile (double paroi + isolation)	+500-700 kg	Reservoirs cryogeniques double paroi vs reservoirs kero souples. Surcout structurel principal.
Isolation cryogenique (MLI 100-150 mm)	+80-120 kg	Couches MLI + vide partiel entre parois.
APU GNL Atkinson (vs APU kero standard)	+20-50 kg	APU GNL plus lourd qu'APU kero standard mais integre prolongateur electrique.
Batterie tampon (80-150 kWh)	+400-750 kg	Poste le plus penalisant. Horizon 2030 (solid-state 300+ Wh/kg) -> reduction a 250-450 kg.
Dessiccateur tamis 3A (securite injection)	+15-25 kg	Verrou securite critique. Masse faible mais obligatoire.
Systeme capteurs + gestion boil-off	+30-50 kg	Capteurs CH4 + vannes + calculateur gestion GNL.
SURPOIDS TOTAL (systeme GNL)	1 045-1 695 kg (1,0 a 1,7 t)	Plage d'estimation. Valeur centrale : ~1,3 t. Poste batterie = 38-45 % du surpoids total -> levier principal pour horizon 2030.
Economie masse carburant (mission 3 000 km)	-3 500 a -4 500 kg (GNL vs kero a energie egale)	PCI GNL +16 % + rendement turbofan methane legerement superieur. Sur mission 3 000 km / 200 pax : ~12 000 kg kero vs ~7 500-8 500 kg GNL.
BILAN NET (surpoids systeme + economie carburant)	-1 800 a -2 800 kg (bilan favorable)	Le gain masse carburant (-3 500 a -4 500 kg) depasse largement le surpoids systeme GNL (+1 0 a +1,7 t). MTOW maintenu. Marge disponible pour charge utile ou carburant.

Les estimations presentees suggerent que le bilan masse est favorable sur le moyen-courrier : la duree de vol (2-4 h) est a priori suffisante pour que l'economie carburant (GNL plus leger) depasse le surpoids des reservoirs cryogeniques. Ce resultat reste a confirmer par design detaille. C'est l'inverse du court-courrier (<1 h) ou le surpoids systeme tend a dominer.

8. Valorisation du Froid Cryogenique (-162 degC)

Le GNL a -162 degC est un puits de chaleur gratuit disponible en permanence. Sa valorisation passite est un avantage unique du Bio-GNL vs kero, H2 et SAF.

Application	Puissance recuperee	Mecanisme	Gain estime
Precooling air prelevement (intercooler CCA)	15-25 kW thermiques	Air compresseur HP (650 degC) refroidi par echangeur GNL avant injection chambre. Rendement thermique moteur +2-3 pts. Verrou : fatigue thermique echangeur (delta T > 800 degC) -> programme essais Safran/RR requis.	~1,5-2 % consommation
Climatisation cabine (passager + crew)	8-15 kW thermiques (en montee/croisiere)	Echangeur GNL sur circuit air cabine. Reduction extraction Pack. Compatible systeme BLEED existant.	~1-2 % consommation
Refroidissement avionique et racks	3-8 kW thermiques	GNL comme puits froid pour baies electroniques. MTBF electronique ameliore.	~0,5 % consommation
Puits passif global (valorisation naturelle)	~7 kW thermiques (sans compresseur)	Valorisation passive de la vaporisation naturelle. Identique segment (4) long-courrier. Gratuit, disponible sans equipement supplementaire.	Base garantie
TOTAL VALORISATION FROID CRYOGENIQUE	26-50 kW thermiques	Gain propulsif estime 3-5 % (non comptabilise comme marge certifiee — estimation par analogie avec systemes de precooling connus, a valider par essais moteur). Avantage potentiel unique Bio-GNL vs SAF/H2.	3-5 % (estime)

9. Comparaison de Filières — Bio-GNL vs SAF vs H2 liquide

La comparaison pertinente pour un decideur industriel n'est pas moteur contre moteur, mais filiere contre filiere. Cette section compare Bio-GNL, SAF et H2 liquide sur 8 dimensions simultanees. Les resultats sont des estimations fondees sur les donnees disponibles.

Dimension	SAF (Sustainable Aviation Fuel)	Bio-GNL (filiere Resilience)	H2 liquide (reference)
Disponibilite mondiale 2035	< 6 % du kerosene mondial (IATA janv. 2026) Production 2025 : 0,6 %	0->100 % bio-GNL sur meme appareil Filiere biomasse residuelle	< 2 % prevu 2035 Infrastructure -253 degC inexistante
Ressources biomasse (competition alimentaire)	HEFA : competition ressources alimentaires FT-biomasse : limitee	Pyrogazification dechets et residus agricoles Zero competition alimentaire	Electrolyse eau + elec renouvelable : limitee
Infrastructure existante utilisable	Reseau kero existant SAF : drop-in compatible	LNG maritime : 10 000+ navires Reseau camions GNL existant Avitaillement aeroportuaire a adapter	Aucune infrastructure existante civile Rupture totale
Cout carburant (horizon 2035)	0,3-0,8 EUR/kWh (x3-6 vs kero) HEFA : prime 3-5x	0,08-0,12 EUR/kWh (Bio-GNL filiere Resilience) -60 a -70 % vs kero	0,4-1,2 EUR/kWh (H2 vert + liquefaction) incertain
Scalabilite (montee en puissance)	Plafond physique mondial ~8-10 % du carburant aviation (HEFA + e-SAF)	Scalable sur dechets organiques mondiaux Potentiel : couverture totale	Limite par electricite renouvelable et eau
Stockage et logistique	Identique kero (stockage ambiant) Logistique la plus simple	GNL -162 degC infrastructure cryogenique Boil-off valorisable APU	H2 -253 degC Boil-off 7-10 %/48h irreductible
NOx / PM / Contrails (65 % forçage radiatif)	NOx : 0 % reduction PM : -15-25 % partiel Contrails : -5-15 % marginal	NOx : -40 % attendu PM : -70 % attendu Contrails : -50-70 % FL350+	NOx : eleves si T haute H2O vapeur : augmente contrails
Biochar (sequestration active)	NEANT (pas de co-produit sequestration)	2,5-3,1 t CO2eq/t biochar (co-produit pyrogazification) Bilan carbone negatif possible	NEANT
BILAN FILIERE (dimensions gagnees)	1/8 (infrastructure existante)	7/8 (sauf infrastructure cryogenique a construire)	0/8

Cette comparaison de filieres constitue l'argument le plus difficile a refuter dans le debat SAF vs Bio-GNL. L'avantage du SAF (infrastructure drop-in existante) est temporel ; ses desavantages (disponibilite plafonnee, cout prohibitif, NOx/PM/contrails non traitees, pas de biochar) sont structurels. Le desavantage du Bio-GNL (infrastructure cryogenique a construire) est temporel ; ses avantages sont permanents.

-> Matrice Aviation Methane EREV Atkinson V9 §9 — analyse SAF et H2 liquide detaillee

10. Bilan Environnemental

Le Bio-GNL traite simultanément les 4 vecteurs du forçage radiatif de l'aviation. Le SAF n'en traite qu'un (CO2 partiel), a un cout prohibitif et une disponibilite limitee.

Vecteur (% forçage radiatif)	Kero fossile (reference)	Bio-GNL 50 % (moyen-courrier)	Bio-GNL 100 % (filiere Resilience)	SAF 50 % (comparaison)
CO2 (~35 % forçage)	Reference	-45 a -50 %	-70 a -72 % (neutre a negatif + biochar)	-40 a -45 % (si SAF disponible)
NOx (~15 % forçage)	Reference	-40 % structurel (chimie CH4)	-40 % structurel (idem)	0 % (chimie combustion kero inchangee)
Particules PM (~10 % forçage)	Reference	-70 % structurel	-70 % structurel (idem)	-15 a -25 % (partiel)
Contrails (~40 % forçage sur 20 ans)	Reference	-50 a -70 % (FL350-390 + chimie CH4)	-50 a -70 % (idem)	-5 a -15 % (marginal)
FORÇAGE RADIATIF GLOBAL 20 ANS	100 % (reference)	-48 a -57 %	-63 a -74 % (neutre a negatif)	-10 a -20 % (insuffisant)
Progressivite sans changer l'avion	Nulle	0->100 % Bio-GNL sans modifier l'appareil ni le reseau	100 % atteint (meme appareil)	Contraint (< 6 % SAF realiste en 2035)

-> Bilan carbone detaille, mecanismes physiques NOx/PM/contrails, comparaison H2 : Matrice Aviation Methane EREV Atkinson V9 §9

11. Certification — Points Cles Identifies

11.1 Dossiers majeurs EASA CS-25

Dossier	Difficulte	Base certifiable	Avantage vs Long-courrier
Reservoirs cryogeniques aile CS-25 (\$25.963, \$25.1455)	Elevee (precedent inexistant aile civile)	CS-25 \$25.963 (reservoirs aile) + \$25.1455 (carburant cryogenique). Base CS-25 existante a completer. Precedent LH2 special exploitable partiellement.	Volume < fuselage. CG stable. Perimetre delimite.
Resistance feu (aile + nacelle)	Elevee	CS-25 \$25.863 (resistance feu). GNL : point d'eclair absent (-162 degC), inflammabilite 5-15 % dans air (zone etroite). Comportement feu different kero -> qualification specifique.	GNL se disperse vers le haut (plus leger que l'air)
Dessication GNL avant injection turbofan	Moderee (technologie existante)	Tamis moleculaires 3A (industrie GNL marine). Qualification EASA vibrations + cycle thermique requis. Point de rosee < -60 degC garanti. Source : verrou identifie Programme Resilience V11.	Meme verrou que (4) Long-courrier. Solution industrielle existante.
Fatigue thermique echangeur intercooler CCA (delta T > 800 degC)	Elevee (verrou metallurgie)	Echangeur air HP (650 degC) / GNL (-162 degC). 3 risques : choc thermique, grivrage humidite air HP, contraintes mecaniques dilatation differentielle. Programme essais dedie Safran/Rolls-Royce requis.	Idem (4) Long-courrier. Programme d'essais conjoint possible.
Procedures sol (ravitaillement cryogenique)	Moderee (formation MRO)	Infrastructure GNL aeroportuaire a developper. Formation equipage et MRO. Precedent LNG maritime (10 000+ navires) + protocoles securite SIGTTO.	Volume boil-off plus faible (vols courts)

11.2 Facteurs favorables vs Long-courrier

Le moyen-courrier presente une complexite certificationnelle significativement inferieure au long-courrier sur plusieurs dimensions :

Facteur	Moyen-courrier (avantage)	Long-courrier (reference plus complexe)
Redesign fuselage	ZERO (reservoirs aile)	Fort (fuselage arriere +36 % ou elargi)
Stockage longue duree (>48 h)	NON (rotations courtes 1-4 h)	OUI (escales intercontinentales)
Volume boil-off au sol	Faible (10-40 kg/nuit)	Eleve (200-400 kg/nuit)
Reservoir cabine	NON	NON (identique)
Gestion CG (Centre de Gravite)	Simple (2 reservoirs symetriques)	Complexe (8 segments, FMS specifique)
Complexite globale vs kero	Moderee (inferieure Long-courrier et H2 liquide)	Elevee (superieuren Long-courrier)

12. Verrous Specifiques et Feuille de Route

Verrou	Nature	Action requise	Horizon
Dessication methane GNL avant injection turbofan (tamis 3A obligatoire)	Securite (CRITIQUE)	Tamis moleculaires 3A entre vaporisateur et injecteurs turbofan. Point de rosee < -60 degC. Qualification EASA vibrations + thermique. Masse : 15-25 kg. Technologie GNL maritime existante a qualifier aviation.	Phase 1 2025-2027
Fatigue thermique échangeur intercooler CCA (delta T > 800 degC)	Technique (metallurgie critique)	Programme essais dedie : (1) choc thermique cycles demarrage/extinction ; (2) grivrage humidite air HP -> dessicateur air HP ou purge periodique ; (3) dilatation differentielle Inconel/316L. Consortium Safran / Rolls-Royce programme Phase 1.	Phase 1-2 2025-2030
Reservation CS-25 reservoirs aile cryogeniques (precedent inexistant)	Reglementaire (nouveau precedent)	Dialogue EASA des 2026 : \$25.963 + \$25.1455 + \$25.863. Qualification fatigue cyclique (cycles pression, thermique). Qualification impact + feu. Programme dedie avec Airbus / Boeing.	Phase 1-2 2026-2030
Infrastructure GNL aeroports court-moyen courrier	Infrastructure (a developper)	Avitaillement GNL cryogenique : bras flexibles, protocoles securite, formation MRO. Point de depart : LNG maritime (SIGTTO). Programme pilote 5-10 aeroports 2028-2033.	Phase 2 2028-2033
Adaptation turbofan methane (chambre + injecteurs + materiaux)	Technique (programme moteur)	Chambre de combustion + injecteurs GNL. Materiaux compatibles CH4 haute temperature. Programme R&D dedie CFM/Safran/RR. Analogie : adaptation de la PW1000G ou LEAP-1A. Delai programme : 8-12 ans.	Phase 1-3 2025-2035

12.2 Feuille de route

Phase	Periode	Actions cles
1 — Validation briques tech.	2025-2028	Dialogue EASA CS-25 cryogenie aile. Programme essais intercooler CCA (Safran/RR). Qualification tamis 3A aviation. Maquette reservoir aile GNL cryogenique. Adaptation turbofan methane Phase 0.
2 — Demonstrateur	2028-2033	Demonstrateur sol : reservoirs aile GNL + turbofan adapte methane. Premier vol essais. Certification partielle EASA. Infrastructure 5 aeroports pilotes GNL.
3 — Prototype et certification	2033-2038	Prototype A321-equivalent Bio-GNL. Certification CS-25 complete. Entree en service commercial premiers exemplaires. Montee en Bio-GNL 0->50 %.
4 — Serie	2038-2045	Deploiement flotte. Montee Bio-GNL 50->100 % sans modifier l'appareil. Contribution -63 a -74 % forçage radiatif total.

13. Conclusion Technique

Pour la classe moyen-courrier (2 000-4 000 km, 180-220 pax), les estimations et analyses presentees dans ce document suggerent que l'utilisation du Bio-GNL avec reservoirs d'aile cryogeniques dedies, turbofan methane a sur-detente optimisee, gestion passive du boil-off et APU GNL intelligent est techniquement coherente, potentiellement certifiable en evolution CS-25, et presente un bilan masse a priori favorable (economie carburant GNL > surpoids systeme cryogenique).

Critere	Conclusion	Condition
Faisabilite technique	Techniquement coherente (estimations bornees)	Sous reserve de validation experimentale des verrous identifies §11
Bilan masse	Favorable (bilan net -1,8 a -2,8 t vs kero a mission egale)	Estimation. Confirmation par design detaille Phase 2.
Bilan environnemental	Favorable (-48 a -57 % forçage radiatif global)	Bio-GNL 50 %. Monte a -63 a -74 % a 100 % bio.
Architecture reservoirs	Integration aile preferesentielle (fuselage preserve)	Redesign caissons aile necessaire. Pas de redesign fuselage.
Complexite certification	Inferieure au Long-courrier et a l'H2 liquide	Superieure au kero actuel. Precedent CS-25 aile cryogenique a construire.
Principal effort	Conception aile cryogenique dedicee + turbofan methane	Effort industriel significatif mais bornee. Non sur la propulsion ou l'exploitation.