OpenAE-905

Spécification Générale d'Architecture

Plateforme motopropulsive modulaire 65 CV pour aviation légère et systèmes aériens sans pilote

THÈSE DU PROGRAMME

Créer une plateforme moteur conçue dès l'origine pour l'aéronautique, positionnée entre la légèreté historique du Rotax 582 et la maturité du Rotax 912, structurée comme une architecture ouverte, modulaire et industrialisable : carburateur puis EFI, niveaux de redondance au choix, plusieurs PSRU, et trajectoire vers une version dual-fuel / heavy-fuel pour drones de défense.

DOCUMENT DE TRAVAIL POUR APPROBATION DU PREMIER COMITÉ TECHNIQUE

DIFFUSION	**Comité technique, contributeurs qualifiés, partenaires industriels et investisseurs.**

Ce document décrit une intention d'architecture et des hypothèses M0. Il ne constitue ni une déclaration de conformité, ni une fiche de performances démontrées, ni une offre commerciale ferme.

DATE	NOM	MODIFICATIONS	VERSION	VALIDATION	VALIDATION COMITÉ
30/07/2026	Eric BARBOT	Baseline architecture M0	A	*Aerolism Engineering*	***REQUISE***

Chapitres

1. Légende de maturité..... 5
2. Glossaire..... 5
3. Résumé exécutif..... 6
3.1. Caractéristiques de la baseline M0..... 7
3.2. Indicateurs de positionnement de la baseline M0..... 8
4. Vision, contexte et positionnement stratégique..... 9
4.1. Un moteur conçu pour l'aéronautique dès la première esquisse..... 9
4.2. Une plateforme ouverte, mais gouvernée..... 9
4.3. Un double marché qui partage le même noyau technologique..... 10
5. Le corridor de marché entre Rotax 582 et 912..... 11
5.1. La limite basse : la classe Rotax 582..... 11
5.2. La limite haute : la classe Rotax 912..... 11
5.3. Tableau de positionnement..... 12
5.4. Indicateurs de positionnement du besoin marché..... 13
6. Choix fondamental du trois-cylindres face au bicylindre 4T adapté..... 14
6.1. Pourquoi le bicylindre quatre temps paraît séduisant..... 14
6.2. Avantage torsionnel du trois-cylindres..... 14
6.3. Équilibrage et vibration..... 15
6.4. Continuité de puissance en mode dégradé..... 15
6.5. Bilan comparatif..... 15
6.6. Indicateurs de positionnement architecture..... 16
7. Mission, objectifs et enveloppe de performances..... 17
7.1. Mission de référence..... 17
7.2. Enveloppe M0..... 17
7.3. Convention de masse..... 18
7.4. Indicateurs de positionnement performance et masse..... 18
8. Principes directeurs de modularité OpenAE..... 19
8.1. Indicateurs de positionnement de modularité..... 20
9. Architecture mécanique du moteur de base..... 21
9.1. Bas moteur et chemin des efforts..... 21
9.2. Cylindres et culasses indépendants..... 21
9.3. Matériaux et procédés M0..... 22
9.4. Indicateurs de positionnement de la mécanique de base..... 23
10. Combustion, culasses et trajectoire vers l'injection directe heavy-fuel 24
10.1. Chambre deux soupapes et deux bougies latérales..... 24
10.2. Interface d'injection directe anticipée..... 24
10.3. Intérêt défense du heavy-fuel..... 24
10.4. Hypothèses de combustion..... 25
10.5. Indicateurs de positionnement combustion..... 25
11. Admission, carburateur, EFI et architecture ECU en briques..... 27
11.1. Version carburateur : simplicité volontaire..... 27
11.2. Conversion EFI PFI..... 27

11.3. ECU Part 1, Part 2 et Part 3 27
11.4. Flex-fuel (Ethanol) 28
11.5. Indicateurs de positionnement d'architecture carburant 29
12. Allumage, injection et niveaux de redondance configurables 30
12.1. Indicateurs de positionnement d'architecture allumage 31
13. Échappement, instrumentation et diagnostic 32
13.1. Interfaces d'échappement prévues dès l'origine 32
13.2. Capteurs essentiels et capteurs de développement 32
13.3. Indicateurs de positionnement d'architecture allumage 33
14. Refroidissement liquide intégral 34
14.1. Indicateurs de positionnement du refroidissement 35
15. Lubrification à carter sec 36
15.1. Indicateurs de positionnement lubrification 37
16. Volant alternato-démarreur et architecture électrique 48V 38
16.1. Machine arrière mutualisée 38
16.2. Réserves essentielles 38
16.3. Indicateurs de positionnement architecture électrique 39
17. Réducteurs PSRU et interfaces d'intégration motopropulsive 40
17.1. Périmètre fonctionnel et interface commune 40
17.2. Comparaison des architectures de PSRU 41
17.3. PSRU de référence à courroie synchrone 41
17.4. PSRU-P épicycloïdal coaxial 42
17.5. Autres topologies envisagées 42
17.6. Convention de sens de rotation 43
17.7. Architecture crossflow et orientation des côtés froid et chaud 44
17.8. Objectif commercial de retrofit Rotax 582 45
17.9. Indicateurs de positionnement PSRU et interfaces d'intégration 46
18. Dynamique torsionnelle, vibrations et interface hélice 48
18.1. Indicateurs de positionnement torsionnel et vibratoire 49
19. Sécurité, modes dégradés et prévention incendie 50
19.1. Philosophie de sécurité 50
19.2. Feu et fuites 50
19.3. Modes dégradés à caractériser 50
19.4. Indicateurs de positionnement sécurité 51
20. Maintenance, réparabilité et durée de vie 52
20.1. Indicateurs de positionnement maintenance 52
21. Architecture produit et configurations commerciales 53
21.1. Indicateurs de positionnement maintenance 54
22. Double marché civil et défense : logique de traction et de scalabilité. 55
22.1. Marché civil ULM et aviation légère 55
22.2. Marché des drones de défense 55
22.3. Scalabilité 55
22.4. Modèle économique envisagé 56
23. Gouvernance OpenAE, propriété intellectuelle et industrialisation 57
23.1. Contribution ouverte et responsabilité 57
23.2. Propriété intellectuelle 57

23.3. Industrialisation..... 57
23.4. Indicateurs de positionnement de gouvernance..... 58
24. Programme de développement et validation..... 59
24.1. Essais obligatoires identifiés..... 60
24.2. Indicateurs de positionnement des essais..... 60
25. Risques principaux et mesures de réduction..... 61
26. Décisions proposées au premier comité technique..... 62
27. Annexe A - Baseline technique consolidée M0..... 63
28. Annexe B - Documents d'interface à créer en M1..... 64
29. Annexe C - Points ouverts à traiter à partir de la phase M1..... 65
30. Annexe D - Références externes..... 66
31. Conclusion..... 67

1. Légende de maturité

Indicateur	Signification
RETENU	Décision d'architecture retenue comme baseline du document.
M0	Hypothèse chiffrée de départ, à confirmer par calcul, simulation ou essai.
OPTION	Module ou niveau de redondance configurable selon le client et la mission.
COMITÉ	Décision explicitement réservée au premier comité technique.

2. Glossaire

Terme	Définition dans le document
M0	Première baseline d'architecture, non démontrée et soumise au comité.
ECP	Engineering Change Proposal / document de proposition de modification
TBO	Time Between Overhauls / intervalle entre révisions générales.
ECU	Electronic Control Unit / calculateur électronique.
EGT	Exhaust Gas Temperature / température de gaz d'échappement.
EFI	Electronic Fuel Injection / injection électronique.
PFI	Port Fuel Injection / injection indirecte dans le conduit d'admission.
FHA	Functional Hazard Assessment / analyse fonctionnelle des dangers.
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis / analyse des modes de défaillance.
Heavy-fuel	Carburant peu volatil de type kérosène/Jet-A/JP-8 selon programme de validation.
ICD	Interface Control Document / document de contrôle d'interface.
OHV	Overhead Valve / soupapes en tête commandées par tiges et culbuteurs.
PSRU	Propeller Speed Reduction Unit / réducteur de vitesse d'hélice.

3. Résumé exécutif

OpenAE-905 est une proposition de plateforme motopropulsive aéronautique de nouvelle génération, développée par Aerolism Engineering dans le cadre d'OpenAE. Son point de départ est volontairement précis : un moteur trois cylindres en ligne, quatre temps, atmosphérique, de 905 cm³, visant 65 CV à 5 800 tr/min et environ 55 à 58 CV continus, associé à un réducteur d'hélice modulaire. Son ambition dépasse cependant la création d'un moteur isolé. OpenAE 905 est conçu comme un noyau d'architecture commun, capable d'évoluer d'une version ULM carburée, simple et accessible vers une version EFI redondante, puis vers une version dual-fuel à injection directe adaptée aux besoins des drones de défense.

Le programme répond à un intervalle de marché devenu particulièrement lisible. Le Rotax 582 a longtemps représenté une référence de 65 hp légère, mais à cycle deux temps ; BRP-Rotax en a arrêté la production fin 2021 en expliquant que le marché de l'aviation légère avait presque entièrement basculé vers les moteurs quatre temps [Référence 2]. À l'autre extrémité, le Rotax 912 UL fournit 80 hp dans une architecture quatre cylindres éprouvée, mais son moteur avec réducteur est donné à 55,4 kg, avant plusieurs équipements d'installation [Référence 3]. OpenAE 905 vise l'espace situé entre ces deux bornes : conserver une puissance de classe 582, mais avec une combustion quatre temps, une gestion thermique robuste, une consommation et une endurance compatibles avec les attentes modernes, tout en restant sensiblement plus compact, plus modulaire et potentiellement plus léger qu'un 912.

Le choix d'un trois-cylindres n'est pas un compromis arbitraire. Pour 905 cm³, il divise la cylindrée unitaire à environ 302 cm³, contre environ 453 cm³ pour un bicylindre de même cylindrée. Les événements de combustion se succèdent tous les 240° de vilebrequin, au lieu de 360° pour un bicylindre à allumage régulièrement espacé. Cette répartition réduit l'amplitude des impulsions de couple, facilite le dimensionnement du volant, de l'amortisseur et du PSRU, améliore le fonctionnement sur un cylindre dégradé et offre un équilibre industriel intermédiaire : nettement moins complexe qu'un quatre cylindres, mais plus doux et plus aéronautiquement exploitable qu'un gros bicylindre adapté depuis la motoneige ou un autre véhicule de loisirs.

L'architecture repose sur des modules et des interfaces contrôlés : trois cylindres et trois culasses indépendants, refroidissement liquide intégral, distribution OHV à arbre à cames bas, carter sec, volant arrière mutualisant inertie, roue phonique, alternateur et démarreur, ECU Part 1 dédié à l'allumage dès la version carburateur, ECU Part 2 ajouté pour l'EFI, puis ECU Part 3 envisagé pour l'injection directe heavy-fuel. Les niveaux de redondance sont configurables : Basic, Dual Ignition ou Full Redundancy. Le client ne paie donc pas systématiquement la masse et la complexité d'une redondance dont sa mission n'a pas besoin, mais le moteur est pré-équipé pour évoluer sans redessiner ses pièces fondamentales.

Le caractère ouvert d'OpenAE ne doit pas être confondu avec une absence de discipline de configuration. Le principe proposé est celui d'une plateforme documentée, dont chaque module possède un document d'interface, une nomenclature contrôlée, une version et une enveloppe d'emploi. Les contributeurs peuvent accélérer l'innovation ; le comité technique conserve la responsabilité de figer les combinaisons testées, les exigences de sécurité et les versions diffusables. Cette gouvernance est un actif technique et commercial : elle permet de capitaliser sur une communauté sans sacrifier la traçabilité nécessaire à l'aéronautique.

PROPOSITION DE VALEUR EN UNE PHRASE

OpenAE 905 vise à devenir le moteur quatre temps de 65 CV que le marché léger n'a pas encore standardisé : plus moderne qu'un deux temps de classe 582, plus léger et plus accessible qu'un 912, et nativement évolutif vers les architectures numériques, redondantes et heavy-fuel exigées par le marché des drones.

3.1. Caractéristiques de la baseline M0

Paramètre	Baseline M0
Architecture	3 cylindres en ligne, 4 temps, atmosphérique, refroidissement liquide intégral
Cylindrée / géométrie	Environ 905 cm³ ; alésage 80 mm ; course 60 mm
Puissance maximale	65 CV/47,8 kW à 5 800 tr/min, durée provisoire 5 min
Puissance continue	55 à 58 CV, à confirmer au banc
Couple à la puissance maximale	Environ 79 N·m
Couple maximal visé	85 à 90 N·m entre 3 500 et 4 500 tr/min
Réducteur de référence	Courroie synchrone sèche, rapport environ 2,42:1
Régime hélice	Environ 2 400 tr/min à 5 800 tr/min moteur
Masse cible moteur + PSRU	40 à 44 kg, périmètre sec à figer formellement
Énergie électrique	Bus 48 V ; démarreur 4 à 5 kW pointe ; génération 1,5 à 2 kW continue
Carburant initial	Essence via carburateur central unique ; conversion EFI plug-and-play
Trajectoire défense	Flex-fuel puis injection directe centrale pour carburants lourds, sous programme distinct

3.2. Indicateurs de positionnement de la baseline M0

BASE-001	Le programme doit être géré comme une plateforme motopropulsive modulaire et non comme une définition moteur unique.	**RETENU**
BASE-002	Les performances et masses citées en révision M0 doivent être explicitement classées comme objectifs ou hypothèses tant qu'elles ne sont pas démontrées.	**RETENU**
BASE-003	La conception doit préserver une trajectoire technique crédible vers l'EFI redondante et l'injection directe heavy-fuel sans pénaliser excessivement la version civile initiale.	**RETENU**

4. Vision, contexte et positionnement stratégique

4.1. Un moteur conçu pour l'aéronautique dès la première esquisse

Le marché de l'aviation légère a souvent compensé l'absence d'un moteur adapté par la conversion de groupes motopropulseurs terrestres. Cette approche peut réduire le coût d'acquisition d'un prototype, mais elle transfère l'essentiel du risque vers l'intégrateur : réducteur ajouté, dynamique torsionnelle non prévue, lubrification modifiée, refroidissement reconfiguré, cartographie dépendante, accessoires redondants et masse installée parfois éloignée de la promesse initiale. OpenAE adopte la démarche inverse. Les efforts d'hélice, le régime continu, les modes dégradés, le carter sec, l'instrumentation et l'interface cellule sont des exigences d'origine, pas des adaptations tardives.

Cette orientation est également une réponse industrielle. Une conversion repose souvent sur la disponibilité future d'un moteur donneur, d'un calculateur propriétaire et de pièces dont la référence peut changer avec un millésime de véhicule. Une architecture OpenAE doit au contraire pouvoir stabiliser ses interfaces, publier ses versions, qualifier des fournisseurs alternatifs et assurer une continuité documentaire. Pour les constructeurs d'ULM comme pour les intégrateurs de drones, cette maîtrise du cycle de vie vaut autant que quelques kilogrammes gagnés au prototype.

4.2. Une plateforme ouverte, mais gouvernée

L'ouverture vise trois accélérations : attirer des compétences spécialisées, multiplier les options de fabrication et raccourcir les cycles d'apprentissage. Elle ne signifie ni que chaque modification est automatiquement compatible, ni que toutes les combinaisons peuvent voler. Le mécanisme central est le document d'interface : chaque PSRU, culasse, ECU, collecteur ou pompe est défini par ses attaches, ses charges, ses signaux, ses fluides, sa version et son domaine d'emploi. Les contributions deviennent alors comparables et vérifiables.

Cette discipline est attractive pour le capital. Elle transforme les dépenses de développement en briques réutilisables : un travail sur le capteur vilebrequin, le banc de refroidissement ou l'algorithme de diagnostic bénéficie à plusieurs configurations. Elle facilite également les partenariats industriels, car un fournisseur peut prendre en charge un module sans obtenir ou perturber la totalité de la définition moteur.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 1

Vue générale du moteur OpenAE-905 et cartographie des modules

Vue isométrique éclatée ou semi-éclatée : noyau moteur, trois culasses, collecteur, volant alternato-démarreur arrière, interfaces PSRU avant, circuit huile et circuit liquide.

Figure 1 - Vue générale du moteur OpenAE-905 et cartographie des modules

4.3. Un double marché qui partage le même noyau technologique

Le marché civil apporte une exigence de coût, de simplicité, de maintenabilité et d'usage réel. Le marché des drones de défense apporte des exigences de redondance, de carburant logistique, de capteurs, de traçabilité et de production à plus grande échelle. Ces marchés ne demandent pas le même produit fini, mais ils peuvent partager une part élevée du noyau : carter, vilebrequin, cylindres, culasses brutes, refroidissement, lubrification, capteurs de position, architecture ECU et interfaces PSRU.

La stratégie européenne renforce cette pertinence. La Commission européenne a identifié les drones et systèmes antidrones parmi les domaines prioritaires de capacité et promeut des instruments destinés à accroître rapidement l'investissement et la capacité industrielle [Référence 6]. L'Agence européenne de défense indiquait en 2025 avoir constitué un catalogue de plus de 300 systèmes UAS issus de plus de 200 fabricants afin de rapprocher besoins opérationnels et capacités disponibles [Référence 7]. Ces chiffres ne constituent pas une estimation directe du marché des moteurs OpenAE ; ils démontrent toutefois la fragmentation des plateformes et le besoin de sous-systèmes modulaires, interopérables et industrialisables.

Dans le domaine civil, la stratégie européenne sur les drones estime que le marché des services pourrait atteindre 14,5 milliards d'euros et 145 000 emplois en Europe à l'horizon 2030 [Référence 5]. Là encore, OpenAE ne revendique pas ce marché comme marché directement adressable. L'indicateur confirme néanmoins que les compétences, les chaînes d'approvisionnement et les applications autour des aéronefs sans pilote vont croître, au bénéfice d'une plateforme de propulsion capable de franchir la frontière entre usages civils et défense.

5. Le corridor de marché entre Rotax 582 et 912

5.1. La limite basse : la classe Rotax 582

Le Rotax 582 a constitué pendant plusieurs décennies une référence de fait pour les aéronefs légers recherchant environ 65 hp. Son manuel décrit un bicylindre en ligne deux temps de 580,7 cm³, refroidi par liquide, à double allumage et deux carburateurs [R1]. La masse moteur nue est indiquée à 29,1 kg ; les masses catalogue du démarreur, du réducteur B, des deux carburateurs et de l'échappement portent l'addition des principaux sous-ensembles à environ 44 kg, avant radiateur et fluides [R1]. Cette légèreté explique sa longévité commerciale.

La limite du 582 n'est donc pas l'absence de pertinence historique, mais l'évolution des attentes. BRP-Rotax a arrêté sa production fin 2021 en indiquant que le marché léger et ultraléger avait presque entièrement migré vers les moteurs quatre temps [R2]. Cette évolution traduit des attentes de consommation, d'endurance, de bruit, de facilité d'exploitation et de perception de fiabilité. Elle laisse cependant de nombreux aéronefs et projets avec un besoin de puissance proche de 48 kW, sans solution quatre temps naturellement équivalente en masse, prix et encombrement.

5.2. La limite haute : la classe Rotax 912

Le Rotax 912 UL représente la référence moderne de l'entrée de gamme quatre temps : quatre cylindres opposés, refroidissement mixte liquide/air, carter sec, double allumage, deux carburateurs, démarreur et réducteur intégrés. La version 80 hp est donnée à 55,4 kg avec son réducteur, hors échappement, bâti, alternateur externe, airbox et plusieurs équipements [R3]. Son TBO annoncé de 2 000 heures illustre la maturité attendue par le marché [R3].

OpenAE 905 n'a pas pour objectif de reproduire un 912 avec un cylindre en moins. Il vise une mission différente : puissance de classe 582, régime maximal identique à la famille 912, masse et coût réduits, encombrement longitudinal compatible avec des cellules légères, maintenance modulaire et architecture électronique progressive. Le 912 demeure une borne de crédibilité technique et de service ; OpenAE doit offrir une raison claire de ne pas monter directement dans cette classe de puissance et de masse.

5.3. Tableau de positionnement

Critère	Rotax 582 UL	OpenAE-905 M0	Rotax 912 UL
Cycle / cylindres	2T, 2 en ligne	4T, 3 en ligne	4T, 4 opposés
Cylindrée	580,7 cm³	Environ 905 cm³	1 211,2 cm³
Puissance maximale	48 kW / 65 hp	47,8 kW / 65 CV	59,6 kW / 80 hp
Régime de puissance	6 500 tr/min	5 800 tr/min	5 800 tr/min
Masse publiée / cible	29,1 kg moteur nu ; env. 44 kg avec principaux accessoires B	40 à 44 kg moteur sec avec PSRU de référence, périmètre à figer	55,4 kg moteur avec PSRU
Alimentation initiale	2 carburateurs	1 carburateur central	2 carburateurs
Allumage	Double CDI	Simple à double, smart coils, ECU Part 1	Double électronique
Évolution EFI	Non structurée	ECU Part 2 plug-and-play	Version 912 iS distincte
Trajectoire heavy-fuel	Non native	Interface DI centrale et ECU Part 3 prévus	Non objet de la version UL
Position stratégique	Borne de masse et puissance	Corridor cible	Borne de maturité 4T

Note de comparaison : les périmètres de masse publiés ne sont pas strictement identiques. Le comité devra approuver une convention de masse OpenAE unique, avec liste explicite des accessoires inclus et exclus.

LE BESOIN

Une solution quatre temps de 48 kW ne sera attractive que si elle ne dérive pas vers la masse, le coût et la complexité d'un moteur de 60 à 75 kW. La discipline de masse et la simplicité de la version carburateur sont donc des exigences commerciales, pas seulement techniques.

5.4. Indicateurs de positionnement du besoin marché

BES-001	La plateforme doit se positionner comme remplacement quatre temps de la classe de puissance du Rotax 582, sans prétendre remplacer la totalité des missions du Rotax 912	**RETENU**

BES-002	Toute comparaison commerciale doit présenter des périmètres de masse homogènes et distinguer objectif, donnée publiée et performance démontrée.	**RETENU**

6. Choix fondamental du trois-cylindres face au bicylindre 4T adapté

6.1. Pourquoi le bicylindre quatre temps paraît séduisant

Le bicylindre en ligne dérivé d'un moteur de motoneige ou de loisir présente des avantages immédiats : faible nombre de cylindres, bloc court, production de série, disponibilité de composants et image de simplicité. Pour un démonstrateur unique, ces atouts peuvent être décisifs. Ils ne suffisent toutefois pas à définir la meilleure architecture d'une plateforme aéronautique destinée à durer, à accepter plusieurs PSRU et à devenir heavy-fuel.

Un moteur donneur est optimisé autour de son véhicule d'origine : cycles de charge, refroidissement dynamique, lubrification, orientation, échappement, électronique, normes et maintenance. L'avionnage remplace ou modifie précisément les fonctions qui font la cohérence du produit d'origine. Le projet se retrouve alors dépendant d'un assemblage moteur plus adaptateur, plus PSRU, plus ECU modifié, dont les interfaces critiques n'ont pas été conçues ensemble.

6.2. Avantage torsionnel du trois-cylindres

À cylindrée totale égale, le passage de deux à trois cylindres réduit la cylindrée unitaire d'environ un tiers : 452,5 cm^3 par cylindre pour un bicylindre de 905 cm^3, contre 301,7 cm^3 pour OpenAE 905. À pression de combustion comparable, l'ordre de grandeur de l'impulsion élémentaire transmise au vilebrequin diminue en proportion. Dans le même temps, le trois-cylindres quatre temps à vilebrequin 120° produit un événement moteur tous les 240° de rotation, contre 360° pour un bicylindre à séquence régulière. Le couple moyen est identique pour une puissance donnée, mais sa délivrance est plus fractionnée.

Cette différence se propage à toute l'installation : volant moins lourd à agrément égal, amortisseur moins sollicité, courroie ou engrenages soumis à des pics plus faibles, ralenti plus exploitable et transitions de combustion plus faciles à diagnostiquer. Elle est particulièrement importante lorsqu'une grande hélice apporte une inertie élevée et lorsque plusieurs familles de PSRU doivent partager la même interface moteur.

6.3. Équilibrage et vibration

Aucune architecture n'est exempte de vibration. Le trois-cylindres 120° équilibre favorablement les forces alternatives globales mais génère un couple de basculement longitudinal, dont la maîtrise dépend des contrepoids, des supports et éventuellement d'un arbre d'équilibrage. Un bicylindre doit choisir entre différentes architectures de vilebrequin, chacune associant à sa manière déséquilibre primaire, couple de basculement ou irrégularité d'allumage. La baseline OpenAE retient le trois-cylindres sans arbre d'équilibrage, tout en prédisposant le carter pour un module futur si les essais le justifient.

6.4. Continuité de puissance en mode dégradé

La perte complète d'un cylindre ne doit jamais être banalisée, mais l'architecture trois cylindres offre une meilleure dégradation fonctionnelle qu'un bicylindre. Un bicylindre perd théoriquement la moitié de ses événements moteurs et subit une asymétrie très sévère ; un trois-cylindres conserve deux tiers de ses cylindres, avec des possibilités de limitation de régime et de puissance plus réalistes. Pour un ULM, cela peut améliorer la capacité à rejoindre un terrain. Pour un drone, cela peut préserver une phase de récupération ou de retour.

6.5. Bilan comparatif

Critère	Bicylindre 4T adapté	Trois-cylindres OpenAE-905
Cylindrée unitaire à 905 cm³	Environ 453 cm³	Environ 302 cm³
Intervalle de combustion régulier	360°	240°
Impulsions de couple	Plus fortes et espacées	Plus faibles et mieux réparties
PSRU / amortissement	Dimensionnement plus exigeant	Charge pulsatoire plus favorable
Mode un cylindre perdu	Perte de 50 % des cylindres	Perte de 33 % des cylindres
Longueur	Plus courte	Plus longue, mais encore compacte
Nombre de pièces	Minimal	Intermédiaire entre L2 et flat-4
Dépendance au moteur donneur	Forte si conversion	Nulle : architecture dédiée

Scalabilité de plateforme	Limitée par le bloc donneur	Modules cylindre/culasse/ECU réutilisables

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 2

Comparaison cinématique I2 / I3 et séquences de combustion

Schéma de vilebrequins et chronologie angulaire : événements moteur, couples instantanés, couple de basculement et influence sur le PSRU.

Figure 2 - Comparaison cinématique I2 / I3 et séquences de combustion

6.6. Indicateurs de positionnement architecture

ARCH-001	Le moteur de référence doit conserver une architecture trois cylindres en ligne à vilebrequin 120°.	**RETENU**

ARCH-002	Une éventuelle famille bicylindre ultérieure doit être traitée comme un dérivé distinct et ne doit pas modifier la référence OpenAE-905 de première génération.	**RETENU**

7. Mission, objectifs et enveloppe de performances

7.1. Mission de référence

La mission de référence est la propulsion d'aéronefs légers et de systèmes aériens sans pilote nécessitant environ 40 à 50 kW mécaniques, avec régime d'hélice voisin de 2 400 tr/min, fonctionnement continu significatif et besoin d'une installation plus légère et plus configurable qu'un moteur quatre cylindres de 80 à 100 hp. La même base doit accepter des missions très différentes sans imposer une définition unique : école, loisir, voyage ULM, groupe auxiliaire, drone d'endurance ou plateforme de défense.

Le point de puissance de 65 CV à 5 800 tr/min correspond à environ 79 N·m et à une pression moyenne effective au frein proche de 10,9 bar. Avec une course de 60 mm, la vitesse moyenne de piston atteint environ 11,6 m/s à ce régime. Ces valeurs sont ambitieuses mais non extrêmes pour un quatre temps atmosphérique moderne. La difficulté ne réside pas dans un record de puissance spécifique ; elle réside dans la combinaison masse, durée de vie, stabilité thermique, bruit, consommation et modularité.

7.2. Enveloppe M0

Paramètre	Valeur M0	Statut de validation
Puissance maximale	65 CV / 47,8 kW à 5 800 tr/min, 5 min	Essai à confirmer
Puissance continue	55 à 58 CV vers 5 200 à 5 500 tr/min	Essai à confirmer
Couple maximal	85 à 90 N·m entre 3 500 et 4 500 tr/min	Calcul + essai
Ralenti nominal	950 à 1 050 tr/min	Essai installation
Régime maximal normal	5 800 tr/min	Décision baseline
Survitesse transitoire	6 200 tr/min	Essai à définir
Limite structurelle	Démonstration visée 6 800 à 7 000 tr/min	Calcul + essai
Taux de compression essence	9,5:1 à 10,0:1	Décision combustion
Carburant civil initial	Essence automobile (SP95-98)/ aviation compatible(UL91), spécification à figer	essais

Rapport PSRU référence	Environ 2,42:1	Calcul torsionnel

7.3. Convention de masse

La maîtrise de la masse exige une convention avant tout engagement commercial. La proposition M0 est de publier au minimum trois masses : masse du noyau moteur nu ; masse du moteur sec prêt à entraîner l'hélice avec PSRU, alternato-démarreur, admission et allumage ; masse du groupe installé avec échappement, radiateurs, réservoir d'huile, fluides, faisceau et bâti. Le chiffre de 40 à 44 kg doit être rattaché au deuxième périmètre, avec une liste fermée des inclusions et exclusions.

Sous-ensemble	Devis de masse cible
Carter supérieur, chapeaux, couvercles	7,5 à 8,5 kg
Vilebrequin, bielles, pistons et volant mécanique interne	7,0 à 8,0 kg
Trois cylindres, trois culasses et distribution	9,5 à 11,0 kg
Pompes huile/eau, filtres et collecteurs internes	3,0 à 4,0 kg
Alternato-démarreur arrière complet	5,0 à 6,0 kg
Admission carburateur + allumage simple/double selon version	2,0 à 3,0 kg
PSRU à courroie de référence	4,5 à 5,8 kg
Total visé après optimisation	**40 à 44 kg**

7.4. Indicateurs de positionnement performance et masse

PERF-001	Le moteur doit viser 65 CV à 5 800 tr/min sans dépasser une vitesse moyenne de piston de l'ordre de 12 m/s.	**M0**
PERF-002	La puissance continue minimale visée doit être au moins 55 CV dans les conditions de référence à définir.	**M0**
MASS-003	La masse publiée doit être associée à une convention de périmètre approuvée par le comité et contrôlée à chaque revue de conception.	**COMITÉ**

8. Principes directeurs de modularité OpenAE

La modularité n'est pas une accumulation d'options. Elle est la capacité à remplacer une fonction par une autre sans redessiner les interfaces fondamentales, tout en conservant la maîtrise de la configuration. Dans OpenAE-905, cinq axes de modularité structurent la plateforme : PSRU, alimentation carburant, niveau de redondance, génération électrique et évolution heavy-fuel.

Axe	Version initiale	Évolution prévue
Carburation	Carburateur central unique	EFI PFI via ECU Part 2
Allumage	Simple ou double	Deux voies indépendantes selon mission
Injection	Aucune ou 3 injecteurs PFI	6 injecteurs et deux circuits A/B
Carburant	Essence	Flex-fuel puis DI heavy-fuel
Réducteur	Courroie synchrone décalée	Engrenages ou planétaire coaxial
Énergie	Alternato-démarreur 48V	Bus essentiels et redondance selon mission
Instrumentation	Capteurs essentiels	Instrumentation cylindre par cylindre

Chaque axe doit disposer d'un ICD, d'un identifiant de module, d'une nomenclature et d'une matrice de compatibilité. Un moteur ne sera pas décrit seulement par son numéro de série, mais par une configuration complète : noyau, culasses, pistons, ECU, alimentation, PSRU, volant, logiciels et hélice approuvée.

RÈGLE OPENAE

Modulaire ne signifie pas universel. Une interface peut être standardisée ; chaque combinaison doit néanmoins être calculée, configurée et testée dans son domaine d'emploi.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 3

Arbre produit et interfaces modulaires OpenAE

Diagramme montrant le noyau commun et les branches Basic, Dual Ignition, Full Redundancy, PSRU-Belt, PSRU-Gear et PSRU-P coaxial.

Figure 3 - Arbre produit et interfaces modulaires OpenAE

8.1. Indicateurs de positionnement de modularité

MODU-001	Chaque module remplaçable doit disposer d'un document de contrôle d'interface approuvé.	**RETENU**
MODU-002	Une configuration diffusée doit être identifiable sans ambiguïté par ses références matérielles et logicielles.	**RETENU**
MODU-003	Les combinaisons non validées doivent être explicitement exclues de la documentation d'installation.	**RETENU**

9. Architecture mécanique du moteur de base

9.1. Bas moteur et chemin des efforts

Le carter supérieur en aluminium constitue la pièce structurelle centrale. Il doit reprendre les charges de combustion, les efforts des quatre paliers principaux, les réactions du PSRU, les points de montage cellule et les interfaces de cylindres. Le couvercle inférieur en aluminium formé ne participe pas au chemin primaire des charges ; il ferme le volume d'huile, intègre les cloisons de récupération et reste démontable sans perturber l'alignement des paliers.

Le vilebrequin repose sur quatre paliers, une solution cohérente avec un trois-cylindres à manetons 120°. Les chapeaux de paliers en aluminium sont individuels, avec renforcement des paliers avant et arrière ; un mini-ladder très ajouré peut être ajouté si l'analyse de rigidité démontre un gain favorable. Le carter et les chapeaux sont usinés et alésés en ligne comme un ensemble apparié.

9.2. Cylindres et culasses indépendants

Les trois cylindres indépendants et les trois culasses indépendantes sont au cœur de la proposition OpenAE. Ils permettent de limiter le rebut, de remplacer un seul module, d'ajuster les variantes de piston ou de culasse, et de mieux maîtriser les dilatations. La baseline robuste retient des cylindres aluminium avec chemise sèche mince en fonte ductile remplaçable. Une variante de traitement de surface de type NiSiC (Nikasil) pourra être étudiée lorsque la masse, la dissipation et le coût auront été comparés sur des pièces réelles.

La distribution OHV conserve un arbre à cames bas commun, des poussoirs mécaniques, des tiges creuses lubrifiées sous pression et des culbuteurs réglables. À 5 800 tr/min et avec deux soupapes par cylindre, cette architecture réduit la hauteur et la complexité des culasses, facilite l'accès et offre une base favorable aux variations de combustion. Elle impose en contrepartie une étude rigoureuse de la masse alternative de distribution, de la raideur des tiges et de la stabilité à survitesse.

9.3. Matériaux et procédés M0

Composant	Hypothèse M0	Justification
Carter supérieur	Alliage aluminium coulé ou moulé basse pression, usiné	Rigidité spécifique, intégration des circuits, réparabilité
Chapeaux de paliers	Aluminium haute résistance	Compatibilité thermique avec le carter, masse
Vilebrequin	Acier haute résistance ~~forgé~~ ou usiné, nitruré	Fatigue, usure des portées, tenue torsionnelle
Bielles	Acier ~~forgé ou~~ usinée	Robustesse initiale et marge de fatigue
Pistons	Aluminium ~~forgé ou~~ usiné	Tenue thermique et possibilité de variantes
Chemises	Fonte ductile mince, sèche et remplaçable	Risque industriel réduit pour la première génération
Culasses	Aluminium coulé, sièges rapportés	Refroidissement et usinage de la chambre
Couvercle inférieur	Aluminium formé/embouti	Faible masse, absence de fonction structurelle

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 4

Coupe longitudinale du carter, quatre paliers et carter sec

Montrer le chemin des charges, les chapeaux de paliers, le couvercle inférieur non structurel, les étages de récupération et les interfaces avant/arrière.

Figure 4 - Coupe longitudinale du carter, quatre paliers et carter sec

9.4. Indicateurs de positionnement de la mécanique de base

MECA-001	Le carter supérieur doit constituer l'unique chemin structurel primaire du moteur et des points de montage.	**RETENU**
MECA-002	Le vilebrequin doit être supporté par quatre paliers principaux et dimensionné avec le volant d'inertie ainsi que les PSRU dans l'analyse torsionnelle.	**RETENU**
MECA-003	Les cylindres et culasses doivent rester individuellement remplaçables sans remplacement systématique du carter.	**RETENU**
MECA-004	Le carter inférieur ne doit pas modifier la précharge ou l'alignement des paliers lors de sa dépose.	**RETENU**

10. Combustion, culasses et trajectoire vers l'injection directe heavy-fuel

10.1. Chambre deux soupapes et deux bougies latérales

La chambre de combustion de référence comporte deux soupapes, une admission et une échappement, avec zones de squish importantes et trajet de flamme court. Les deux bougies sont implantées sur des côtés opposés de la culasse, avec un angle azimutal cible de 90 à 120°. Cette disposition sert deux objectifs : améliorer la tolérance aux pannes et réserver l'axe central de la chambre pour une future injection directe.

La seconde bougie ne doit pas seulement dupliquer la première. Son implantation doit créer deux fronts de flamme réellement complémentaires, limiter la distance maximale de propagation et rester compatible avec le circuit d'eau autour du siège d'échappement. L'espace central est traité dès la pièce brute comme une zone structurelle : réserve de matière, refroidissement annulaire, possibilité de douille d'injecteur et chemin de raccordement haute pression.

10.2. Interface d'injection directe anticipée

Sur les versions carburateur et PFI, l'interface centrale sera fermée par un insert aveugle reproduisant l'enveloppe extérieure de la future douille d'injecteur. Cette stratégie permet de valider dès les premiers moteurs la tenue mécanique, l'étanchéité et la température de la zone. Elle évite qu'un programme heavy-fuel ultérieur découvre trop tard un conflit entre injecteurs, soupapes, culbuteurs et circuit de refroidissement.

L'injection directe heavy-fuel ne sera pas présentée comme une simple option logicielle. En allumage commandé, les carburants de type Jet-A/JP-8 imposent une atomisation, un chauffage, un démarrage et une stratégie de dépôts spécifiques. La baseline réserve une pompe haute pression mécanique, une rampe, des canalisations protégées, un capteur de pression, une alimentation de drivers DI et un ECU Part 3. Le démarrage sur essence suivi d'une transition vers le carburant lourd reste une stratégie crédible à étudier, en cohérence avec les difficultés reconnues de démarrage à froid des carburants peu volatils.

10.3. Intérêt défense du heavy-fuel

La valeur du heavy-fuel est d'abord logistique. La politique OTAN de carburant unique vise l'interopérabilité et la simplification de la chaîne d'approvisionnement autour du F-34 pour les équipements déployés [Référence 8]. Un moteur de drone capable d'utiliser un carburant logistique réduit les

besoins de stockage et de distribution d'essence spécialisée. OpenAE-905 ne revendique pas encore cette capacité ; il transforme cette exigence future en contrainte géométrique et système dès la première culasse.

10.4. Hypothèses de combustion

Paramètre	Hypothèse M0
Soupapes	2 par cylindre
Diamètre admission	34 à 36 mm, à optimiser
Diamètre échappement	29 à 31 mm, à optimiser
Taux de compression essence/flex-fuel	9,5:1 à 10,0:1
Bougies	1 ou 2 selon configuration ; emplacements toujours présents
Angle entre bougies	Cible 90 à 120°
Interface centrale	Insert obturateur puis injecteur DI
Détection cliquetis	Deux capteurs à étudier, stratégie logicielle à définir
Pistons	Variantes essence, flex-fuel et heavy-fuel possibles

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 5

Culasse OpenAE : deux bougies latérales et injecteur DI central

Vue de dessous de chambre, coupe du circuit d'eau et vue supérieure des interfaces bougies/injecteur/culbuteurs.

Figure 5 - Culasse OpenAE : deux bougies latérales et injecteur DI central

10.5. Indicateurs de positionnement combustion

COMB-001	La culasse doit réserver une interface centrale structurelle et refroidie pour un injecteur direct futur.	**RETENU**
COMB-002	Les deux emplacements de bougie doivent être intégrés à toutes les culasses, même lorsqu'une seule bougie est équipée.	**RETENU**

COMB-003	La capacité heavy-fuel doit être traitée comme un programme de validation distinct et ne doit pas être revendiquée avant démonstration.	**RETENU**

11. Admission, carburateur, EFI et architecture ECU en briques

11.1. Version carburateur : simplicité volontaire

La première version vise un carburateur central unique à dépression constante, d'environ 38 mm comme point de départ. Le choix réduit la masse, le nombre de commandes, les opérations de synchronisation et le coût. Il est cohérent avec la puissance visée, à condition de maîtriser la répartition d'un mélange humide entre les trois cylindres.

Le collecteur carburé est court, compact et symétrique. Son plancher peut recevoir un réchauffage liquide calibré pour limiter givrage et condensation, sans transformer le collecteur en échangeur chaud permanent. Les trois branches doivent offrir des longueurs, sections et températures comparables. La mise au point utilisera trois EGT et, lorsque nécessaire, trois sondes lambda individuelles.

11.2. Conversion EFI PFI

La conversion EFI remplace le collecteur humide et le carburateur par un collecteur sec, un papillon central, une rampe et des injecteurs placés près des soupapes d'admission. Les culasses ou pipes reçoivent dès l'origine deux bossages d'injecteurs par cylindre, obturables. La version simple utilise un injecteur par cylindre ; la version totalement redondante utilise deux injecteurs, deux rampes et deux circuits carburant.

Il est préférable de standardiser les interfaces plutôt que de forcer le même collecteur à fonctionner en mélange humide et en air sec. Cette séparation permet d'optimiser la version carburateur pour l'évaporation et l'EFI pour le remplissage, tout en conservant les mêmes brides de culasse, points de fixation, commande des gaz et enveloppes d'installation.

11.3. ECU Part 1, Part 2 et Part 3

Brique	Fonction	Dépendances et principe de sûreté
ECU Part 1 (allumage)	Position moteur, allumage cartographié, smart coils, protections, journalisation	Présent dès le carburateur ; doit rester indépendant des extensions non essentielles
ECU Part 2 (EFI)	Injection PFI, pompes, pression carburant, flex-fuel, lambda et corrections	Ajout plug-and-play; simple ou A/B selon configuration (redondance)

ECU Part 3 (heavy-fuel)	Injection directe heavy-fuel, pression rail, chauffage et stratégie de transition	Programme futur ; ne doit pas imposer sa masse à la version civile initiale

Le Part 1 est le cœur temporel de la plateforme. Il exploite la roue phonique du vilebrequin et le capteur de phase, puis fournit au Part 2 et au Part 3 le régime, l'angle, l'identification cylindre et les états de sécurité. Une panne d'une extension ne doit pas supprimer les voies d'allumage qui ne dépendent pas de cette extension. En revanche, une version EFI ne peut évidemment continuer à produire de la puissance si toutes ses voies d'injection sont perdues ; la redondance de l'alimentation carburant reste donc une option système complète.

11.4. Flex-fuel (Ethanol)

La version EFI reçoit un capteur de composition carburant et de température. La version Full Redundancy peut en recevoir deux, un par circuit A/B. L'information corrige le débit d'injection, le démarrage, la richesse, l'avance et les protections. Elle ne doit pas être utilisée comme permission automatique d'accepter tout carburant : une matrice de compositions autorisées et de puissance disponible doit être validée par essais.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 6

Modules d'admission carburateur et EFI interchangeables

Présenter les brides communes, le collecteur humide, le collecteur sec, les bossages d'injecteurs et les connecteurs Part 2.

Figure 6 - Modules d'admission carburateur et EFI interchangeables

11.5. Indicateurs de positionnement d'architecture carburant

CARB-001	La version initiale doit utiliser un carburateur central unique, sous réserve de validation de la distribution de richesse.	**RETENU**
CARB-002	Les interfaces de PFI doivent être présentes et obturables dès la version carburateur.	**RETENU**
ECU-001	L'ECU Part 1 assume uniquement l'allumage (smart coils) de la version carburateur sans ECU Part 2 (EFI).	**RETENU**
ECU-002	L'ECU Part 2 doit être ajoutable sans remplacement des capteurs fondamentaux de position moteur (ECU part 1).	**RETENU**
EFI-001	La stratégie flex-fuel doit appliquer des limites de fonctionnement lorsque la composition mesurée est hors du domaine validé.	**M0**

12. Allumage, injection et niveaux de redondance configurables

La redondance est traitée comme une architecture produit configurable. Imposer la version maximale à tous les clients alourdirait la version civile et réduirait son avantage face aux solutions existantes. À l'inverse, ne prévoir aucune interface de redondance dès l'origine rendrait la version défense coûteuse à redévelopper. OpenAE adopte donc une mécanique commune et des niveaux d'équipement différenciés.

Configuration	Allumage	Injection	Circuit carburant	Mission type
Basic	3 bougies 3 smart coils 1 voie	Carburateur ou 3 injecteurs	1	Développement, expérimental, simplicité maximale
Dual Ignition	6 bougies 6 coils 2 voies	Carburateur ou 3 injecteurs	1	Standard civil recommandé
Full Redundancy	6 bougies 6 coils 2 voies	6 injecteurs 2 voies	2 rampes et 2 pompes	Mission critique, drone, intégration client

Les smart coils sont retenues même en version carburateur, car elles permettent une énergie d'étincelle et un dwell contrôlés, un démarrage retardé, une cartographie en fonction du régime et de la charge, ainsi qu'un diagnostic individuel. Le fonctionnement normal peut être séquentiel; la perte du capteur de phase doit permettre un repli en étincelle perdue à partir du seul signal vilebrequin (capteur effet hall).

La redondance totale de l'injection doit inclure les causes communes : processeur, alimentation, drivers, pompe, filtre, régulateur et rampe. Deux injecteurs branchés sur une unique pression et un unique calculateur ne constituent pas une voie B indépendante. En fonctionnement normal, le partage 50/50 entre injecteurs A et B maintient les deux voies actives ; un autre mode primaire/secours pourra être étudié selon les exigences de durée de vie et de diagnostic.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 7

Architecture électrique et carburant A/B

Schéma fonctionnel des deux voies d'allumage, des deux voies EFI, des bus essentiels et des deux circuits hydrauliques.

Figure 7 - Architecture électrique et carburant A/B

12.1. Indicateurs de positionnement d'architecture allumage

ALLU-001	La plateforme doit permettre une configuration à une ou deux bougies par cylindre sans modification de culasse.	**RETENU**
ALLU-002	La configuration Dual doit disposer de deux voies: capteur, calculateur, alimentation et bobines indépendantes.	**RETENU**
INJ-001	La configuration Full Redundancy doit permettre l'isolement d'une rampe et la poursuite du fonctionnement sur l'autre.	**M0**
INJ-002	Chaque injecteur d'une voie redondante doit être dimensionné pour reprendre seul le débit complet de son cylindre, flexfuel inclus (éthanol).	**M0**

13. Échappement, instrumentation et diagnostic

13.1. Interfaces d'échappement prévues dès l'origine

Le collecteur d'échappement doit être un outil de mise au point autant qu'un composant de série. Chaque primaire comporte une interface EGT et une interface lambda M18 x 1,5. Une quatrième interface lambda est implantée après la convergence des trois branches. Toutes les prises sont accessibles, orientées pour limiter la condensation et livrées avec des obturateurs haute température.

Cette instrumentation permet de répondre à deux questions différentes. Les mesures individuelles révèlent la distribution de richesse, les écarts de combustion et les anomalies cylindre par cylindre. La mesure commune fournit une information globale plus simple pour l'exploitation courante et la régulation EFI. La présence de quatre bossages lambda ne signifie pas que quatre sondes doivent être installées en permanence.

13.2. Capteurs essentiels et capteurs de développement

Catégorie	Capteurs
Essentiels en exploitation	Régime/position, MAP, IAT, pression barométrique, température liquide, pression et température d'huile, pression carburant, tension/courant, états ECU
Selon configuration	EGT individuelles, lambda commune, flex-fuel, pression de rampes A/B, température carburant
Développement	3 lambda individuelles, températures culasses, vibrations carter/PSRU, températures de paliers et courroie, pression cylindre temporaire

Les données doivent être historisées avec les dépassements, les heures par plage de puissance, les défauts capteurs et les changements de configuration. Pour un projet ouvert, le format des données est un actif majeur : il permet aux contributeurs de comparer des essais reproductibles et au comité de distinguer une amélioration démontrée d'une impression subjective.

13.3. Indicateurs de positionnement d'architecture allumage

ECHA-001	Le collecteur doit comporter trois prises EGT, trois prises lambda primaires et une prise lambda commune, toutes obturables.	**RETENU**
DATA-001	Le système doit journaliser les dépassements et les défauts avec référence de configuration matérielle et logicielle.	**M0**
DATA-002	Une interface avionique normalisée doit être définie sans exposer les bus internes de sûreté à des commandes non autorisées.	**COMITÉ**

14. Refroidissement liquide intégral

Le refroidissement liquide intégral des cylindres et des culasses est retenu comme solution de référence. À environ 72 CV par litre et avec une forte exigence de puissance continue, il apporte une stabilité thermique indépendante de l'installation, réduit les gradients dans les culasses et prépare la zone d'injection directe. La légère pénalité de masse est compensée en partie par l'absence de grandes ailettes, de déflecteurs complexes et de compromis entre installations tractrices et propulsives.

Le circuit utilise une rampe froide commune alimentant trois branches parallèles identiques. Dans chaque branche, le liquide entre bas dans le cylindre, monte autour de l'alésage, traverse vers la culasse et refroidit en priorité le siège d'échappement, la zone entre soupapes, les bougies et l'interface DI. Il ressort au point haut de la culasse vers une rampe chaude en retour inverse (Boucle de Tichelmann). Cette architecture évite six branches indépendantes difficiles à équilibrer.

Paramètre	Hypothèse M0
Pompe principale	Mécanique
Pompe auxiliaire	Électrique, 15 à 20 L/min, purge / post-refroidissement / mode dégradé
Débit maximal circuit	35 à 45 L/min
Thermostat	88 à 92 °C avec bypass
Température normale sortie	90 à 105 °C
Alerte / limite provisoire	108 °C / 115 °C
Pression relative	1,2 à 1,5 bar
Purge	Point haut de chaque culasse + vase d'expansion

La pompe auxiliaire n'est pas présumée capable de maintenir la pleine puissance. Son rôle est de faciliter la purge, d'éviter les points chauds après arrêt et de fournir une durée limitée de refroidissement en cas de panne partielle. La performance dégradée devra être caractérisée, pas supposée.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 8

Circuit de refroidissement à trois branches équilibrées

Schéma hydraulique froid/chaud, passage cylindre puis culasse, purges, thermostat, bypass, pompe mécanique, pompe auxiliaire et radiateur cellule.

Figure 8 - Circuit de refroidissement à trois branches équilibrées

14.1. Indicateurs de positionnement du refroidissement

REFR-001	Les trois cylindres et les trois culasses doivent être refroidis par liquide dans la définition de référence.	**RETENU**
REFR-002	Les trois branches doivent être géométriquement équilibrées et instrumentales individuellement pendant le développement.	**RETENU**
REFR-003	Aucun passage de liquide ne doit traverser le carter d'huile ou créer un chemin direct vers le cylindre en cas de défaut d'étanchéité.	**RETENU**

15. Lubrification à carter sec

Le carter sec est retenu pour la stabilité de lubrification, la liberté d'installation et la réduction des pertes par brassage. Une pompe mécanique combinée comporte un étage de pression et, comme hypothèse initiale, deux étages de récupération. Le réservoir externe assure désaération, réserve et séparation entre l'huile chaude et l'huile aspirée.

Paramètre	Hypothèse M0
Volume utile réservoir	4 à 5 L
Volume total système	5 à 6 L
Pression chaude nominale	3,5 à 5 bar
Soupape de décharge	5,5 à 6 bar
Pression froide transitoire	Limiter vers 7 à 8 bar
Température nominale	95 à 115 °C
Alerte / limite provisoire	125 °C / 130 °C
Filtration	Plein débit 20 à 30 microns, bypass et pression différentielle
Surveillance	Pression, température, niveau, bouchon magnétique, détecteur de particules optionnel

Les PSRU lubrifiés peuvent recevoir de l'huile depuis le circuit moteur via des ports normalisés ; le PSRU à courroie reste sec et utilise des ports obturés. Cette mutualisation doit être analysée avec prudence : un défaut du réducteur ne doit pas contaminer immédiatement les paliers moteur sans détection. Le comité devra décider si le planétaire coaxial utilise un filtre ou un détecteur de particules dédié.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 9

Architecture de lubrification carter sec et interfaces PSRU

Pompe pression, deux récupérations, réservoir, thermostat, échangeur, filtre, reniflard, ports PSRU et points de mesure.

Figure 9 - Architecture de lubrification carter sec et interfaces PSRU

15.1. Indicateurs de positionnement lubrification

LUBR-001	Le moteur doit utiliser un carter sec avec réservoir externe et récupération active.	**RETENU**
LUBR-002	La perte de pression, la saturation du filtre et la présence de particules doivent être détectables ou inspectables.	**M0**
LUBR-003	Le partage d'huile avec un PSRU à engrenages doit faire l'objet d'une analyse de contamination et de modes communs.	**COMITÉ**

16. Volant alternato-démarreur et architecture électrique 48V

16.1. Machine arrière mutualisée

Le volant placé à l'arrière, à l'opposé du PSRU, mutualise quatre fonctions : inertie, roue phonique, rotor d'alternateur et rotor de démarreur. La topologie privilégiée est une machine synchrone triphasée à aimants permanents, rotor extérieur radial. Cette géométrie offre un grand rayon de couple, évite une forte attraction axiale sur le dernier palier et permet au retour de flux de contribuer à la masse périphérique du volant.

Paramètre	Hypothèse M0
Bus principal	48V
Masse rotor-volant	3,0 à 3,5 kg
Inertie polaire cible	0,025 à 0,040 kg.m²
Aimants	0,5 à 0,8 kg, grade thermique SH/UH
Démarrage	4 à 5 kW électriques en pointe ; 50 à 60 N.m
Régime de lancement	250 à 350 tr/min
Génération continue	1,5 à 2 kW
Position rotor	Capteurs dédiés à vitesse nulle ; la roue phonique moteur ne suffit pas seule

Le bus 48V limite les courants de batterie, la masse de câblage et les pertes pendant le démarrage. Les équipements avioniques et les bobines 12/14 V sont alimentés par des convertisseurs DC/DC. La machine à aimants permanents impose une stratégie de surtension et de délestage : elle continue à générer lorsque le moteur tourne, même après la perte d'une commande d'excitation qui n'existe pas.

16.2. Réserves essentielles

La configuration Dual doit alimenter ses deux voies d'allumage par des chemins séparés. La configuration EFI redondante doit maintenir au moins une voie complète comprenant allumage, injection et pompe. L'objectif M0 est 45 minutes d'autonomie minimale après perte totale de génération, avec un objectif de conception de 60 minutes. Cette autonomie doit être calculée à température froide, batterie vieillie et charge réaliste, puis démontrée.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA - FIGURE 10

Alternato-démarreur arrière et distribution électrique

Coupe rotor extérieur/stator, roue phonique, capteurs, bus 48 V, batterie, onduleur bidirectionnel (ESC), convertisseurs 14 V et bus essentiels A/B.

Figure 10 - Alternato-démarreur arrière et distribution électrique

16.3. Indicateurs de positionnement architecture électrique

ELEC-001	Le réseau principal doit être nominalement 48 V et alimenter une distribution 14 V par conversion.	**RETENU**
ELEC-002	Le système doit disposer d'un chemin contrôlé d'absorption d'énergie en cas de déconnexion de la batterie ou de délestage.	**RETENU**
ELEC-003	Une voie essentielle doit conserver au minimum 45 minutes d'autonomie après perte totale de génération dans la configuration concernée.	**M0**

17. Réducteurs PSRU et interfaces d'intégration motopropulsive

Le PSRU est un module stratégique de la plateforme OpenAE-905 et ne doit pas être traité comme un simple accessoire. Il réduit le régime destiné à l'hélice, reprend les efforts propulsifs, participe à l'isolation des excitations torsionnelles et définit une part importante de l'interface avec la cellule. Dans une logique de retrofit, il détermine également la ligne de poussée, le sens de rotation de l'hélice, l'encombrement frontal et la compatibilité avec les hélices disponibles.

Le présent chapitre consolide quatre décisions qui doivent être traitées comme un ensemble : l'interface mécanique commune des PSRU, la comparaison des architectures et de leurs masses, la convention de rotation moteur-PSRU-hélice, et l'orientation des côtés froid et chaud du moteur. Ces choix seront traduits dans les documents de contrôle d'interface (ICD) et dans les kits d'installation firewall-forward.

17.1. Périmètre fonctionnel et interface commune

Chaque PSRU doit constituer un module mécanique autonome. Ses propres roulements doivent reprendre la poussée axiale de l'hélice, les efforts radiaux, les moments gyroscopiques et les efforts issus d'un déséquilibre admissible. Aucun effort axial significatif d'hélice ne doit être transmis au vilebrequin. Celui-ci transmet principalement le couple moteur au travers de la cannelure à développante avant et de l'accouplement torsionnel.

L'interface moteur-PSRU doit rester commune aux principales variantes. Elle comprend au minimum :

- ★ Un plan de fixation et un diamètre de centrage géométriquement définis;
- ★ Une cannelure à développante d'entrée, un centrage cylindrique indépendant et un épaulement axial;
- ★ Un accouplement torsionnel remplaçable et identifié par configuration;
- ★ Des ports d'huile d'alimentation et de retour obturables pour les PSRU lubrifiés;
- ★ Les interfaces capteurs nécessaires à la surveillance du régime, de la température et, selon la variante, de la contamination;
- ★ Une bride d'hélice et une enveloppe de montage documentées dans l'ICD du module.

Le périmètre commun de masse retenu dans les comparaisons comprend le carter du PSRU, la transmission, l'accouplement torsionnel requis, l'arbre et le flasque d'hélice, les roulements de poussée et l'huile de service lorsqu'elle existe. Il exclut le volant alternato-démarreur arrière et l'hélice.

17.2. Comparaison des architectures de PSRU

La modularité du PSRU permet d'adapter l'OpenAE-905 à des priorités différentes : masse minimale, ligne de poussée coaxiale, compacité, robustesse perçue, coût ou adaptation à une cellule existante. Les masses ci-dessous sont des estimations d'architecture M0. Elles devront être consolidées par des valeurs issus de la CAO détaillée, des calculs de dentures, des roulements et du modèle torsionnel.

Architecture	Disposition	Masse M0	Rendement M0	Rôle produit
Courroie synchrone sèche	Axes décalés	4,5 à 5,8kg	97 à 98,5%	Référence légère, économique et inspectable
Chaîne silencieuse / Hy-Vo	Axes décalés	5,5 à 7kg	96 à 98%	Variante non prioritaire
Deux engrenages, un engrènement	Axes décalés	6,0 à 7,5kg	97,5 à 98,5%	Robuste et compact ; sens inversé
PSRU-P épicycloïdal coaxial	Axes confondus	6,5 à 8kg	96,5 à 98%	Variante premium à ligne de poussée coaxiale
Trois engrenages avec intermédiaire	Axes configurables	8,0 à 10kg	95,5 à 97,5%	Implantation et sens de rotation adaptables

17.3. PSRU de référence à courroie synchrone

La courroie synchrone sèche constitue la référence de première génération. Elle offre la masse minimale, une inspection visuelle directe, un coût compatible avec les faibles et moyennes séries et une compliance torsionnelle favorable. Le rapport nominal est voisin de 2,42:1 afin d'obtenir environ 2 400 tr/min à l'hélice pour 5 800 tr/min au vilebrequin.

La transmission ouverte à deux poulies conserve le sens de rotation du vilebrequin. La courroie doit rester isolée du circuit d'huile, protégée contre les corps étrangers et accessible pour le contrôle de tension, l'examen des dents et le remplacement périodique. Le dimensionnement final devra tenir compte des charges pulsatoires du trois-cylindres, de la température sous capot et des transitoires associés au démarrage, à l'arrêt et aux variations rapides de puissance.

17.4. PSRU-P épicycloïdal coaxial

Le PSRU-P (planetary) place l'axe d'hélice exactement sur l'axe du vilebrequin. La topologie M0 utilise le soleil en entrée, la couronne fixe dans le carter et le porte-satellites en sortie. Elle conserve le sens de rotation du moteur et offre une ligne de poussée coaxiale particulièrement attractive pour les cellules nouvelles, les installations compactes et les versions d'hélice à pas variable.

Une combinaison géométrique candidate comporte 81 dents au soleil, quatre satellites de 17 dents et une couronne de 115 dents, soit un rapport théorique de 2,41975:1. Cette combinaison ne constitue pas une définition figée. Elle doit être vérifiée pour le module, la largeur de denture, les corrections de profil, la vitesse périphérique, l'interférence, la durée de vie et le partage de charge entre satellites.

Le planétaire ajoute provisoirement environ 1,5 à 2 kg par rapport au PSRU à courroie. Son succès dépendra d'un dispositif de partage de charge, par exemple un soleil ou une couronne légèrement flottants, d'une lubrification sous pression des dentures et des axes de satellites, ainsi que d'une surveillance des particules et de la température. Un accouplement torsionnel reste obligatoire en amont du train épicycloïdal.

17.5. Autres topologies envisagées

La chaîne silencieuse ou Hy-Vo reste une solution intermédiaire mais non prioritaire en raison de sa lubrification, de son bruit et de son avantage limité face à la courroie. Le PSRU à deux engrenages extérieurs est robuste et efficace, mais il inverse le sens de sortie. Le train à trois engrenages ajoute un pignon intermédiaire, conserve le sens du vilebrequin et permet de déplacer l'axe d'hélice, au prix d'une masse, d'un coût et de pertes supplémentaires.

Ces variantes ne doivent pas modifier le cœur moteur. Elles seront proposées uniquement si leur avantage d'installation ou de mission compense les coûts de développement, de qualification et de maintien de configuration.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA

Vue avant et coupe longitudinale comparant les surfaces de centrage, la cannelure d'entrée, l'accouplement torsionnel, les roulements d'hélice, les ports d'huile et les enveloppes des variantes à courroie, à engrenages et épicycloïdale.

Figure 11 - Interface PSRU commune et variantes courroie/engrenages/planétaire

17.6. Convention de sens de rotation

CONVENTION OPENAE

Sauf mention contraire, le moteur est observé depuis l'avant, face au PSRU. Dans cette vue, le vilebrequin tourne dans le sens antihoraire. L'hélice nominale tourne également dans le sens antihoraire lorsqu'elle est observée depuis l'avant de l'aéronef, face à sa bride.

Un seul sens de rotation du cœur moteur est retenu afin d'éviter deux définitions de distribution, de pompes, de roue phonique, de commande électronique et d'arbre d'équilibrage. Les besoins de rotation opposée, notamment pour les drones bimoteurs à hélices contrarotatives ou certaines installations propulsives, doivent être traités au niveau du PSRU et de l'hélice, sans inverser le sens de fonctionnement du moteur de base.

Le tableau suivant fixe le comportement cinématique des architectures envisagées :

Architecture du PSRU	Inversions	Sortie / vilebrequin	Hélice vue de l'avant	Compatibilité OpenAE
Courroie synchrone ouverte à deux poulies	0	Identique	Antihoraire	Directe
Chaîne silencieuse / Hy-Vo ouverte	0	Identique	Antihoraire	Directe
Deux engrenages extérieurs, un engrènement	1	Opposée	Horaire	Hélice opposée ou adaptation
Trois engrenages extérieurs avec intermédiaire	2	Identique	Antihoraire	Directe
Épicycloïdal coaxial : soleil en entrée, couronne fixe, porte-satellites en sortie	0 utile	Identique	Antihoraire	Directe
PSRU spécifique à sortie inversée	1 fonctionnelle	Opposée	Horaire	Applications contrarotatives

Toute documentation d'interface doit indiquer le point d'observation, le sens d'entrée, le sens de sortie, le rapport, le sens de poussée et la référence d'hélice compatible. Les expressions « rotation à droite », « rotation à gauche », « sens normal » ou « sens inverse » sont proscrites lorsqu'elles ne sont pas accompagnées d'une convention explicite.

17.7. Architecture crossflow et orientation des côtés froid et chaud

Les trois culasses adoptent une architecture crossflow : l'admission et l'échappement débouchent sur des côtés opposés. La séparation fonctionnelle entre un côté froid et un côté chaud est une exigence d'installation et de sécurité. Elle éloigne le carburant, les faisceaux et les équipements sensibles des surfaces chaudes, réduit le réchauffement de l'air admis, simplifie les écrans thermiques et réserve une enveloppe cohérente pour une future suralimentation.

En convention OpenAE, vue depuis l'avant face au PSRU, l'admission est placée à gauche et l'échappement à droite. Les trois culasses doivent être identiques et montées dans la même orientation. Aucune culasse miroir n'est retenue dans la baseline, afin de limiter les références, les outillages, les stocks de pièces détachées et les validations.

Zone - vue face au PSRU	Fonctions principales	Exigences d'intégration
Côté gauche - côté froid	Admission, carburateur ou papillon EFI, injecteurs PFI, rampe carburant, commandes et faisceaux	Température maîtrisée, accessibilité, protection contre les fuites et éloignement des surfaces chaudes
Côté droit - côté chaud	Collecteur 3-en-1, interfaces EGT et lambda, écrans thermiques, futur turbocompresseur	Drainage, rayonnement contenu, accès aux sondes et évacuation sûre des fuites
Partie supérieure centrale	Deux bougies latérales, interface centrale réservée à l'injection directe, future rampe DI	Accessibilité et refroidissement renforcé autour de l'injecteur direct
Partie inférieure	Arbre à cames et poussoirs côté froid ; réservation d'arbre d'équilibrage dans le quadrant opposé	Séparation thermique, retours d'huile maîtrisés et maintien du carter inférieur non structurel

Les collecteurs externes restent configurables. La boîte à air peut recevoir différentes orientations d'entrée, le collecteur d'échappement peut descendre vers l'avant, l'arrière ou sous le moteur selon la cellule, et les écrans thermiques sont définis dans le kit d'installation. Cette modularité externe ne doit pas remettre en cause les brides fixes des culasses ni la séparation chaud/froid.

EMPLACEMENT VUE CAO / SCHÉMA

Vue frontale face au PSRU montrant le sens antihoraire du vilebrequin, l'admission à gauche, l'échappement à droite, les interfaces supérieures de bougies et d'injection directe, ainsi que les enveloppes des collecteurs et du futur turbocompresseur.

Figure 12 - Convention d'installation OpenAE 905 : sens de rotation et côtés chaud/froid

17.8. Objectif commercial de retrofit Rotax 582

L'orientation admission à gauche et échappement à droite est retenue également pour faciliter les remotorisations d'aéronefs historiquement équipés de Rotax 582. Reprendre la même organisation générale peut réduire l'ampleur des modifications de prise d'air, de commandes de gaz, de conduites carburant, d'écrans thermiques et de sortie d'échappement. Ce choix soutient le positionnement commercial de l'OpenAE-905 dans le corridor entre la légèreté du 582 et la maturité du 912.

Cette compatibilité d'orientation ne constitue pas une interchangeabilité dimensionnelle complète. Le passage d'un bicylindre deux-temps à un trois-cylindres quatre-temps entraîne des différences de longueur, de masse, de centre de gravité, de refroidissement, de lubrification, de fixation et d'échappement. La proposition commerciale doit donc être celle d'un kit firewall-forward documenté, et non celle d'un moteur universellement drop-in.

Un document ICD-RETROFIT-582 devra être établi avant le gel définitif des enveloppes externes. Il comparera au minimum :

- ★ La ligne d'axe de l'hélice, le plan de bride et le sens de rotation;
- ★ Les points de fixation, les charges dans les six axes et le centre de gravité;
- ★ L'enveloppe du moteur, du PSRU, de la boîte à air et de l'échappement;

- ★ Les raccordements carburant, refroidissement, huile, électricité et commandes;
- ★ Les zones chaudes, les drains, les écrans thermiques et les distances de sécurité ;
- ★ Les opérations de maintenance et l'accès aux filtres, bougies, injecteurs, courroie et sondes.

La validation commerciale du retrofit devra s'appuyer sur plusieurs cellules représentatives, en installations tractives et, lorsque pertinent, propulsives. L'objectif est de définir une famille de kits documentés tout en conservant un moteur, des culasses et des interfaces principales communs.

17.9. Indicateurs de positionnement PSRU et interfaces d'intégration

PSRU-001	Le module PSRU doit reprendre intégralement la poussée, les charges radiales et les moments d'hélice.	**RETENU**
PSRU-002	Aucun effort axial significatif d'hélice ne doit être transmis au vilebrequin.	**RETENU**
PSRU-003	Le rapport de référence doit être proche de 2,42:1, avec validation pour chaque hélice.	**M0**
PSRU-004	Le PSRU-P coaxial doit étudier un dispositif de partage de charge entre satellites et une surveillance de contamination.	**M0**
ROTA-001	Le vilebrequin doit tourner dans le sens antihoraire lorsqu'il est observé depuis l'avant, face au PSRU.	**RETENU**
ROTA-002	Le sens nominal de l'hélice doit être antihoraire lorsqu'elle est observée depuis l'avant de l'aéronef.	**RETENU**
ROTA-003	Les PSRU à courroie et épicycloïdal coaxial doivent conserver le sens nominal du vilebrequin en configuration de référence.	**RETENU**
ROTA-004	Toute combinaison moteur-volant-accouplement-PSRU-rapport-hélice doit faire l'objet d'une validation cinématique et torsionnelle.	**RETENU**

THER-001	Vu depuis l'avant face au PSRU, le côté gauche doit être le côté admission/froid et le côté droit le côté échappement/chaud.	**RETENU**
THER-002	Les trois culasses doivent être identiques et montées dans la même orientation; aucune culasse miroir n'est retenue en baseline.	**RETENU**
THER-003	Les trois culasses doivent être identiques et montées dans la même orientation; aucune culasse miroir n'est retenue en baseline.	**RETENU**
RETR-001	L'architecture doit rechercher une compatibilité d'orientation avec les installations Rotax 582 sans revendiquer une interchangeabilité drop-in.	**RETENU**

Les validations associées comprennent au minimum : le calcul des charges et des roulements de chaque PSRU, le pré-dimensionnement ISO/AGMA des dentures, l'analyse thermique et de lubrification, l'étude torsionnelle du système complet, la vérification des sens de rotation, la revue d'enveloppe sur cellules représentatives, l'analyse de sécurité incendie et la validation des accès de maintenance.

EXIGENCES OPENAE

La modularité de la plateforme ne signifie pas qu'un PSRU, une hélice ou un kit d'installation puisse être combiné librement. Chaque configuration approuvée doit identifier le moteur, le volant, l'accouplement, le PSRU, le rapport, le sens de rotation, la bride, l'hélice et le kit cellule associés.

18. Dynamique torsionnelle, vibrations et interface hélice

La dynamique torsionnelle constitue le principal risque transversal du programme. Le moteur, le volant arrière, l'accouplement, le PSRU, l'arbre d'hélice et l'hélice forment un seul système oscillant. Aucun sous-ensemble ne peut être déclaré acceptable en isolation. La multiplication des PSRU renforce cette exigence : chaque rapport et chaque hélice modifient les inerties réfléchies et les fréquences propres.

La baseline prévoit un accouplement torsionnel élastomère ou équivalent entre le vilebrequin et l'entrée du PSRU. La courroie ajoute une seconde compliance ; le planétaire en ajoute beaucoup moins et exigera une caractérisation plus fine de l'amortisseur. Les essais doivent mesurer vitesse instantanée, couple, accélération angulaire et vibration sur toute la plage, y compris démarrage, ralenti, transition, fonctionnement sur deux cylindres et coupure d'allumage.

Élément à intégrer au modèle	Paramètres principaux
Vilebrequin	Raideur torsionnelle, inerties, amortissement, modes de flexion
Volant alternato-démarreur	Inertie, couple électromagnétique, roue phonique
Combustion	Harmoniques, dispersion cylindre, ratés et coupures
Accouplement	Courbe couple-angle, hystérésis, température, butées
PSRU	Raideur, jeux, pertes, géométrie, rapport
Hélice	Inertie, modes propres, nombre de pales, pas fixe/variable

Le résultat de l'étude peut imposer des plages de régime interdites, des limites de changement de puissance, un volant différent ou une liste d'hélices approuvées. Une interface standard ne doit jamais être interprétée comme une compatibilité universelle avec toute hélice disponible sur le marché.

18.1. Indicateurs de positionnement torsionnel et vibratoire

TORS-001	Une analyse torsionnelle couplée moteur-PSRU-hélice est obligatoire avant toute autorisation de vol.	**RETENU**
TORS-002	Chaque combinaison approuvée doit identifier le volant, l'amortisseur, le rapport, le PSRU et l'hélice.	**RETENU**
VIBR-001	La baseline reste sans arbre d'équilibrage; le carter doit préserver une possibilité d'évolution si les essais le justifient.	**M0**

19. Sécurité, modes dégradés et prévention incendie

19.1. Philosophie de sécurité

OpenAE-905 est destiné à plusieurs cadres d'emploi, du moteur expérimental au système critique. Le document ne présume pas d'un niveau de certification unique. Il impose toutefois une méthode commune : identifier les fonctions, analyser les défaillances, distinguer les options de redondance et démontrer les modes dégradés. Une redondance visible ne doit pas masquer une cause commune électrique, hydraulique, logicielle ou mécanique.

Une FHA préliminaire doit définir les effets au niveau aéronef : perte totale de puissance, perte partielle, survitesse, incendie, vibration excessive, perte de génération, erreur de composition carburant et commande intempestive. La FMEA descend ensuite jusqu'aux composants et interfaces. Les décisions de redondance sont prises en fonction de la mission, pas par simple duplication systématique.

19.2. Feu et fuites

La CAO doit réserver les chemins de drainage avant de réserver les carénages. Les zones sous carburateur, injecteurs, rampes, pompes et filtres doivent évacuer les fuites hors des surfaces chaudes. Les conduites carburant sont séparées de l'échappement, protégées au feu et inspectables. Les connecteurs ne doivent pas être placés dans des zones où une fuite d'huile ou de carburant peut les imbiber.

La version EFI prévoit une coupure indépendante des pompes et, en version A/B, l'isolement de chaque rampe. Le moteur offre une interface pour détection incendie, mais la décision d'installation appartient à l'intégrateur cellule. Les évents, reniflards et retours doivent éviter l'entrée de vapeurs ou liquides dans l'admission.

19.3. Modes dégradés à caractériser

- ★ Perte d'une voie d'allumage ;
- ★ Perte d'un injecteur ou d'une rampe ;
- ★ Perte du capteur de phase avec repli en étincelle perdue ;
- ★ Perte de génération et fonctionnement sur réserve essentielle ;
- ★ Perte de pompe auxiliaire ou dégradation du refroidissement ;
- ★ Fonctionnement sur deux cylindres ;
- ★ Pression carburant faible ou composition hors domaine ;
- ★ Surchauffe, perte de pression d'huile, survitesse et choc d'hélice.

19.4. Indicateurs de positionnement sécurité

SÉCU-001	Une FHA et une FMEA doivent être maintenues comme documents vivants dès la phase A0.	**RETENU**
SÉCU-002	Une fuite simple prévisible ne doit pas être dirigée vers une surface chaude, l'admission ou un volume non drainé.	**RETENU**
SÉCU-003	Les modes dégradés annoncés commercialement doivent être démontrés dans une configuration représentative.	**RETENU**

20. Maintenance, réparabilité et durée de vie

La maintenance est un élément de différenciation majeur face aux conversions. La plateforme est conçue pour remplacer individuellement un cylindre, une culasse, un module d'admission, un PSRU, une pompe ou un ECU. Les points de contrôle doivent être accessibles sans dépose complète du moteur : bougies, jeu aux soupapes, filtre, courroie, vidanges, capteurs et prises de diagnostic.

Les objectifs de durée de vie sont progressifs. La première campagne doit démontrer 500 heures cumulées sur des configurations instrumentées. Un objectif commercial initial de 1 000 heures pourra être proposé lorsque les inspections et la dispersion de production le permettent. Toute extension vers 1 500 ou 2 000 heures doit résulter de données de flotte et d'analyses de pièces, pas d'un objectif marketing fixé à l'avance.

Action	Intervalle A0 provisoire
Vidange après rodage	À définir par campagne initiale
Vidange courante	Cible 50 h
Contrôle jeu soupapes	100 h
Inspection courroie	50 h
Remplacement courroie	500 h ou 5 ans
Bougies	100 à 200 h selon type et carburant
Filtres carburant	100 h
Inspection après survitesse / surchauffe / choc hélice	Procédure dédiée obligatoire

20.1. Indicateurs de positionnement maintenance

MAIN-001	Les cylindres, culasses, PSRU et modules ECU doivent être remplaçables individuellement.	**RETENU**
MAIN-002	L'objectif TBO initial ne doit pas dépasser la durée démontrée et justifiée par inspection.	**RETENU**
MAIN-003	Chaque dépassement majeur doit déclencher une procédure d'inspection documentée.	**RETENU**

21. Architecture produit et configurations commerciales

La gamme doit être compréhensible pour un client non spécialiste sans masquer la complexité technique. Trois niveaux principaux sont proposés, auxquels s'ajoutent le choix du PSRU et du système carburant. La mécanique commune réduit les coûts de développement; les options permettent d'aligner masse, prix et sûreté sur la mission.

Niveau	Contenu principal	Valeur client
OpenAE 905 Basic	Carburateur ou EFI simple, allumage simple, PSRU au choix	Coût et masse minimaux, expérimental et développement
OpenAE 905 Dual	Double allumage indépendant, carburateur ou EFI simple	Compromis civil recommandé, tolérance aux pannes d'allumage
OpenAE 905 Full	Double allumage, injection A/B, pompes/rampes redondantes, bus essentiels	Mission critique et intégrations professionnelles
OpenAE 905 HF-futur	DI centrale, ECU Part 3, pompe HP, stratégies dual-fuel	Carburant logistique et marché défense

Le choix de PSRU se superpose à ces niveaux : courroie légère, engrenages robustes ou planétaire coaxial. Une cellule ULM peut privilégier la masse et l'inspection ; un drone à fuselage étroit peut valoriser la ligne d'arbres coaxiale. Cette matrice augmente le marché adressable sans multiplier les moteurs de base.

Exemple de référence configuration envisagées	Description
OAE905-CARB-BASIC-BELT-R242	Carburateur, simple allumage, PSRU courroie 2,42
OAE905-CARB-DUAL-BELT-R242	Carburateur, double allumage, PSRU courroie 2,42
OAE905-CARB-BASIC-GEAR-R242	Carburateur, simple allumage, PSRU deux engrenages
OAE905-CARB-DUAL-GEAR-R242	Carburateur, double allumage, PSRU deux engrenages
OAE905-EFI-BASIC-GEAR-R242	EFI simple, allumage simple, PSRU deux engrenages
OAE905-EFI-FULL-PLAN-R242	EFI A/B, double allumage, planétaire coaxial
OAE905-HF-DUAL-PLAN-R242	Future DI heavy-fuel, architecture duale, planétaire coaxial

21.1. Indicateurs de positionnement maintenance

PROD-001	Les options doivent être regroupées dans une nomenclature commerciale lisible et une référence de configuration non ambiguë.	**RETENU**

PROD-002	La configuration Dual Ignition doit constituer la recommandation civile de référence, sans être imposée aux autres missions.	**M0**

22. Double marché civil et défense : logique de traction et de scalabilité

22.1. Marché civil ULM et aviation légère

Le marché civil constitue le terrain de validation le plus exigeant au quotidien : démarrages répétés, diversité des installations, attentes de maintenance, sensibilité au prix et exposition directe du produit aux utilisateurs. La disparition du 582 neuf crée une opportunité qualitative pour une solution quatre temps autour de 65 CV. OpenAE doit répondre aux constructeurs de cellules neuves, aux projets expérimentaux et, lorsque l'intégration est possible, aux remotorisations (retrofit flotte historique).

L'argument commercial civil ne peut pas reposer uniquement sur la puissance. Il doit combiner masse installée, consommation, bruit, maintenance, disponibilité des pièces, transparence des données, choix de PSRU et possibilité d'évoluer du carburateur à l'EFI. Le carburateur central ouvre une entrée de gamme crédible ; l'EFI et le double allumage permettent une montée en valeur sans changer le noyau moteur.

22.2. Marché des drones de défense

Le marché défense valorise des caractéristiques différentes : disponibilité en volume, souveraineté de la chaîne d'approvisionnement, carburants logistiques, redondance configurable, télémétrie, fonctionnement sans pilote et intégration dans des fuselages optimisés. L'Union européenne a placé les drones et systèmes antidrones parmi ses domaines prioritaires et cherche à accélérer la capacité de production européenne [Référence 6]. L'EDA souligne à la fois la diversité des plateformes et le besoin de résilience, d'interopérabilité et de financement de l'industrie [Référence 7].

OpenAE-905 peut se positionner comme sous-système souverain plutôt que comme aéronef complet. La valeur proposée est un moteur documenté, adaptable à plusieurs intégrateurs, dont les interfaces mécaniques, électriques et numériques sont disponibles sous gouvernance Européenne. La version heavy-fuel ajoute une réponse au besoin logistique, mais la traction peut commencer avant sa maturité grâce aux versions essence/EFI destinées aux démonstrateurs et aux systèmes non soumis au carburant unique.

22.3. Scalabilité

La scalabilité ne signifie pas qu'un même moteur couvre toutes les puissances. Elle repose sur la réutilisation de briques : unité cylindre/culasse d'environ 300 cm^3, architecture ECU, pompes, capteurs, alternato-démarreur, méthodologie PSRU et bancs d'essais. Après validation du trois-cylindres, des dérivés à deux, quatre ou davantage de cylindres peuvent être étudiés pour d'autres classes de puissance. Chaque dérivé exigera un nouveau vilebrequin, un nouveau carter et une analyse torsionnelle ; il

bénéficiera néanmoins d'une base de combustion, de fournisseurs et de logiciels déjà capitalisée.

Pour les investisseurs, cette logique transforme un programme moteur en plateforme technologique. Le premier produit limite le risque et fournit les données. Les marchés adjacents permettent ensuite d'amortir les mêmes briques sur davantage de volumes. La priorité reste toutefois de réussir le 905 : une famille théorique n'a de valeur que si son premier membre est fiable, maintenable et industrialisable.

22.4. Modèle économique envisagé

★ **Vente de modules validés** : moteurs, PSRU, ECU, faisceaux, kits EFI et pièces de maintenance.

★ **Services d'intégration** : installation cellule, refroidissement, hélice, calibration et essais.

★ **Support et cycle de vie** : formation, documentation, pièces, diagnostic et gestion de configuration.

★ **Partenariats industriels** : fabrication sous licence ou sous contrôle de configuration, selon les marchés.

★ **Programmes défense** : adaptations mission, heavy-fuel, redondance, cybersécurité et production en série.

DISCIPLINE COMMERCIALE

Les projections de marché, prix, marge et besoin de financement devront faire l'objet d'un business plan séparé. Le présent document démontre la cohérence de la plateforme et les leviers de traction ; il ne remplace pas une étude de marché indépendante.

23. Gouvernance OpenAE, propriété intellectuelle et industrialisation

23.1. Contribution ouverte et responsabilité

Le projet doit attirer des contributeurs sans diluer la responsabilité de conception. La proposition est un modèle à deux niveaux : un espace de travail ouvert où sont publiés les problèmes, hypothèses, modèles et interfaces ; des releases contrôlées approuvées par le comité, avec nomenclature, calculs, résultats d'essais et statut de diffusion. Une contribution peut être excellente sans être immédiatement intégrée à une configuration de vol.

Chaque modification significative doit prendre la forme d'une proposition de changement d'ingénierie : objectif, interfaces affectées, justification, analyse de risques, calculs, plan d'essai et impact sur la masse/coût. Le comité arbitre selon des critères publiés. Cette transparence favorise la confiance des contributeurs et fournit aux investisseurs une vision mesurable de la progression.

23.2. Propriété intellectuelle

Le choix de licence open-hardware reste une décision du comité et de la gouvernance Aerolism Engineering. Il devra distinguer les éléments réellement ouverts, les marques et références de configuration, les logiciels de sûreté, les données d'essai, les composants tiers et les adaptations client. L'objectif est de permettre la contribution et la fabrication distribuée sans perdre la capacité à garantir l'origine, la conformité d'une release et la qualité des produits portant la marque OpenAE.

23.3. Industrialisation

L'industrialisation doit être préparée dès M0 : caractéristiques critiques, plans de contrôle, traçabilité matière, appariement carter/chapeaux, équilibrage du volant, contrôle des conduites et calibration des capteurs. Les procédés doivent être choisis non seulement pour un prototype performant, mais pour une dispersion maîtrisée. Les interfaces ouvertes permettent plusieurs fournisseurs ; les caractéristiques critiques restent sous contrôle de définition et de validation.

Objet de gouvernance	Document associé
Architecture	Spécification générale d'architecture
Interface	ICD par module
Modification	Engineering Change Proposal / ECP
Configuration	Nomenclature et matrice de compatibilité
Sécurité	FHA, FMEA et registre des risques
Validation	Plan, procédure, rapport et données brutes
Release	Dossier de définition et statut de diffusion

23.4. Indicateurs de positionnement de gouvernance

GOUV-001	Aucune release de vol ne doit être constituée uniquement de fichiers CAO sans dossier de configuration et de validation associé.	**RETENU**
GOUV-002	Le comité doit approuver la licence, les règles de marque et la séparation entre contenus ouverts, tiers et contrôlés.	**COMITÉ**
GOUV-003	Les caractéristiques critiques de fabrication (KC) doivent être identifiées avant le gel des plans de prototype de vol.	**M0**

24. Programme de développement et validation

Le programme doit réduire le risque dans l'ordre où il apparaît, sans attendre un moteur complet pour découvrir les problèmes fondamentaux. Les bancs composants et les maquettes fonctionnelles sont des accélérateurs, pas des dépenses périphériques. Le plan proposé progresse de la validation géométrique vers l'endurance et l'intégration aéronef.

Phase	Objectif	Livrables de sortie
M0/M1-Architecture	Approuver mission, interfaces et hypothèses	SGA approuvée, registre de risques, work packages
M2-Pré-dimensionnement	Calculs moteur, PSRU, thermique, torsion et masse	Modèles, masses, ICD préliminaires, choix fournisseurs
M3/M4/M5/M6/M7-Bancs composants, définitions et analyses	Pompes, culasse eau, distribution, alternato-démarreur…	Rapports composants, plans de définitions, rapports d'analyses, chiffrages indus.
M8-Premier moteur entraîné	Lubrification, frottements, démarrage électrique, étanchéité	Acceptation mécanique avant combustion
M8.1-Premier feu	Carburateur, allumage, refroidissement et premières cartographies	Courbes puissance/couple et anomalies
M8.2-Intégration PSRU/hélice	Torsion, vibrations, températures et hélices candidates	Combinaisons approuvables
M8.3-Endurance 50/150h	Usure initiale et maturation	Inspections, modifications et baseline pré-série
M8.4-Endurance 500h	Démonstration de robustesse initiale	Base pour objectif TBO 1 000h
M8.5-Vol/drone	Validation d'installation et mission	Dossier de configuration par cellule

24.1. Essais obligatoires identifiés

★ Entraînement à froid sans combustion et mesure du couple résistant;

★ Cartographies carburateur (allumage ECU part 1) puis EFI (ECU part 2, avec richesse cylindre par cylindre ;

★ Validation huile et refroidissement en attitudes (orientations) et transitoires représentatifs;

★ Analyse torsionnelle avec plusieurs inerties et hélices ;

★ Démarrage chaud/froid et perte de capteurs ;

★ Survitesse, surchauffe, pression d'huile faible et perte de génération;

★ Fonctionnement sur deux cylindres et défaillance d'une voie A/B ;

★ Compatibilité carburants, élastomères et matériaux ;

★ EMI/EMC, vibrations, étanchéité, feu et drainage ;

★ Endurance par paliers 50 h, 150 h puis 500 h avec démontages métrologiques.

24.2. Indicateurs de positionnement des essais

TEST-001	Toute valeur limite M0 doit être reliée à une méthode de confirmation : calcul, essai ou décision du comité.	**RETENU**
TEST-002	Les données brutes et la configuration d'essai doivent être archivées avec chaque rapport.	**RETENU**
TEST-003	Le passage au vol doit être conditionné par une revue indépendante des risques et des résultats moteur-PSRU-hélice.	**M0**

25. Risques principaux et mesures de réduction

Risque	Effet potentiel	Mesure de réduction A0
Dérive de masse	Perte de l'avantage face au Rotax 912	Valeurs par sous-système, revue masse à chaque gate, options non imposées
Résonance torsionnelle	Rupture vilebrequin/PSRU/hélice	Modèle couplé, instrumentation instantanée, amortisseur et liste d'hélices
Distribution carburateur	Cylindre pauvre et surchauffe	Collecteur humide optimisé, 3 EGT et 3 lambda de développement
Déséquilibre refroidissement	Culasse chaude, cliquetis	Trois branches identiques, purge haute, mesures individuelles
Alternato-démarreur sur mesure	Retard, échauffement, panne de démarrage	Banc frameless/FOC, marge thermique, architecture de secours
Partage de charge planétaire	Fatigue satellite/porte-satellites	Élément flottant, précision, mesure de température et particules
Heavy-fuel prématuré	Dispersion des ressources	Réserver les interfaces, différer le programme de combustion DI
Complexité ouverte	Versions incompatibles et perte de confiance	ICD, ECP, releases contrôlées, marque et traçabilité
Chaîne d'approvisionnement	Indisponibilité de pièces critiques	Double sourcing, pièces standard, documentation de substitution
Financement discontinu	Prototype incomplet sans données	Phases courtes avec livrables valorisables et démonstrateurs composants

Le risque le plus important n'est pas nécessairement un composant. C'est la perte de cohérence entre sous-systèmes développés en parallèle. La fonction du comité technique et de cette spécification est précisément de maintenir les interfaces, la masse, les modes dégradés et la mission dans une même décision d'architecture.

26. Décisions proposées au premier comité technique

Le comité n'est pas invité à approuver chaque côte ou chaque fournisseur. Il doit approuver la direction commune qui permettra aux groupes de travail de produire des résultats compatibles. Les décisions suivantes constituent le noyau de la revue M0.

1. **Approuver** la mission de 65 CV à 5 800 tr/min et la puissance continue M0 de 55 à 58 CV.
2. **Approuver** le trois-cylindres en ligne 905cm³ comme architecture de référence, devant toute variante bicylindre.
3. **Approuver** les trois cylindres et culasses indépendants, deux soupapes et distribution OHV.
4. **Approuver** le refroidissement liquide intégral et la lubrification à carter sec.
5. **Approuver** les deux interfaces de bougie et l'interface DI centrale refroidie.
6. **Approuver** la séquence ECU Part 1, Part 2 et futur Part 3.
7. **Approuver** les niveaux Basic, Dual Ignition et Full Redundancy.
8. **Approuver** le volant alternato-démarreur 48V et les objectifs d'énergie.
9. **Approuver** le PSRU à courroie comme référence et le planétaire coaxial comme alternative stratégique.
10. **Approuver** la convention de masse et le budget 40 à 44 kg pour le périmètre sec défini.
11. **Approuver** la gouvernance par ICD, configuration et ECP.
12. **Approuver** le plan de validation progressif et la condition de revue indépendante avant vol.
13. **Mandater** les groupes de travail et responsables de lots/systèmes pour la phase M1.

RÉSULTAT ATTENDU DE LA REVUE

Une architecture M0 approuvée, un registre de décisions, des responsables de work packages, un calendrier de pré-dimensionnement et une liste explicite des sujets laissés ouverts.

27. Annexe A - Baseline technique consolidée M0

Domaine	Décision / hypothèse consolidée
Moteur	L3 4T, 905 cm³, 80 x 60 mm, atmosphérique
Performance	65 CV à 5 800 tr/min ; 55 à 58 CV continus
Bas moteur	Carter supérieur structurel, 4 paliers, couvercle inférieur non structurel
Cylindres	3 modules aluminium, liquide, chemises sèches fonte ductile M0
Culasses	3 modules liquide, 2 soupapes, 2 bougies latérales, interface DI centrale
Distribution	OHV, arbre à cames bas, poussoirs mécaniques, tiges creuses
Carburation	Carburateur central environ 38 mm, collecteur humide réchauffé
EFI	PFI 3 ou 6 injecteurs, ECU Part 2, flex-fuel 1 ou 2 capteurs
Heavy-fuel	ECU Part 3, DI centrale, pompe HP mécanique, programme futur
Allumage	Smart coils, simple ou double, séquentiel avec repli wasted spark
Refroidissement	Liquide intégral, pompe mécanique, 3 branches, auxiliaire électrique
Huile	Carter sec, 1 pression + 2 récupérations, 5 à 6 L total
Électricité	48 V, alternato-démarreur 4 à 5 kW, génération 1,5 à 2 kW
PSRU	Courroie référence ; engrenages et planétaire coaxial options
Instrumentation	3 EGT, 3 lambda primaires, 1 lambda commune, interfaces obturables
Maintenance	Modules remplaçables, 500h démonstration, TBO initial visé 1000h

28. Annexe B - Documents d'interface à créer en M1

Code proposé	Interface	Contenu minimal
ICD-001	Noyau moteur / PSRU	Centrages, fixation, arbre, couple, charges, huile, capteurs
ICD-002	Carter / cylindres	Plans de joint, goujons, huile, eau, tolérances
ICD-003	Cylindres / culasses	Fixation, étanchéité gaz/huile/eau, transfert liquide
ICD-004	Admission	Brides, injecteurs, papillon, carburateur, réchauffage
ICD-005	Échappement	Brides, charges, EGT, lambda, enveloppes thermiques
ICD-006	Circuit huile	Débits, pressions, ports, filtre, réservoir, PSRU
ICD-007	Circuit liquide	Débits, ports, purge, thermostat, pompe, cellule
ICD-008	ECU Part 1	Signaux, alimentation, coils, CAN, diagnostics
ICD-009	ECU Part 2	Injecteurs, pompes, flex-fuel, lambda, pression
ICD-010	ECU Part 3	DI, drivers, pression rail, chauffage, transition
ICD-011	Alternato-démarreur	Rotor, stator, capteurs, onduleur, refroidissement
ICD-012	Montage cellule	Points, charges 6 axes, CG, zones chaudes, drains

Les documents d'interface systèmes sont la condition sinequanone à une collaboration ouverte et efficiente. Ils relèvent de la responsabilité technique de gouvernance et du gestionnaire de configuration. Généralement, trois niveaux de convergence subsistent, dépendant de la profondeur de définition. Les contributeurs sont les premiers demandeurs de l'évolution de maturité des documents d'interface.

29. Annexe C - Points ouverts à traiter à partir de la phase M1

Sujet	Question M1	Méthode
Masse	Périmètre exact et devis détaillé	CAO + nomenclature paramétrique
Vilebrequin	Diamètres, contrepoids, matériau et fatigue	Calcul dynamique + FEA
Combustion	Chambre, soupapes, compression, avance	CFD/1D + culasse d'essai
Carburateur	Diamètre et géométrie du plénum	Banc débit + moteur mono / tricylindre
Refroidissement	Débit par branche et pertes de charge	CFD + banc eau
Huile	Débit pression / récupération et désaération	Banc pompe + moteur entraîné
Starter-generator	Stator, bobinage, onduleur et thermique	Banc électrique
Courroie	Profil, largeur, tension, durée	Calcul fournisseur + banc torsion
Planétaire	Denture, satellites, partage et lubrification	ISO/AGMA + FEA + banc
Vibrations	Besoin d'un arbre d'équilibrage	Modèle multicorps + essai
Heavy-fuel	Stratégie de démarrage et pression DI	Programme technologique distinct
Licence	Modèle open-hardware et contrôle de marque	Décision gouvernance/juridique

30. Annexe D - Références externes

Réf.	Source
R1	BRP-Rotax, Operator's Manual for ROTAX Engine Type 582 UL Series, Edition 3 / Revision 0, 1 January 2018. Données techniques, masses, architecture et consommation. https://www.rotax-owner.com/pdf/OM_582_UL_Series_Ed3_R0.pdf
R2	BRP-Rotax, "Stop of production of 2-stroke ROTAX 582 UL Aircraft Engine by the end of 2021", 22 July 2021. https://www.flyrotax.com/n/582-ul-production-stop
R3	BRP-Rotax, ROTAX 912 UL | A | F 80 HP - product data and datasheet. Masse 55,4 kg avec réducteur, 59,6 kW à 5 800 tr/min, TBO 2 000 h. https://www.flyrotax.com/products/912-ul-a-f
R4	BRP-Rotax, portfolio moteurs et 912 iS Sport - architecture d'injection et allumage redondants. https://www.flyrotax.com/products/912-is-sport-isc-sport
R5	Commission européenne, Drone Strategy 2.0 - Creating a large-scale European drone market, 29 November 2022. Projection de 14,5 Md€ et 145 000 emplois pour les services drones européens en 2030. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/drone-strategy-creating-large-scale-european-drone-market-2022-11-29_en
R6	Commission européenne, White Paper for European Defence - Readiness 2030, 19 March 2025 et page de synthèse mise à jour. Priorités drones, capacité industrielle, financement et coopération. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-defence-industry/white-paper-european-defence-readiness-2030_en
R7	European Defence Agency, Annual Report 2025, publié en 2026. UAS, interopérabilité, résilience et financement industriel. https://eda.europa.eu/docs/default-source/applicants/eda-2026-annual-report-2025_web.pdf
R8	NATO, Logistics Handbook, chapitre Military Fuels and the Single Fuel Policy. Objectif d'interopérabilité et de simplification de la chaîne logistique autour du F-34. https://www.nato.int/content/dam/nato/legacy-wcm/media_pdf/pdf_2016_03/20160303_2012-logistics_hndbk-en.pdf
R9	EASA, Light Sport Aircraft - FAQ et cadre ELA/LSA. https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/faqs/light-sport-aircraft
R10	BRP-Rotax, Certifications and approvals - référence ASTM F2339 pour moteurs d'avions légers. https://www.flyrotax.com/p/about-rotax/certificates

Les références sont fournies pour cadrer le positionnement et les comparaisons. Les données de concurrents restent la propriété de leurs auteurs et les marques citées appartiennent à leurs titulaires. Accès vérifié le 29 juillet 2026.

31. Conclusion

OpenAE-905 est suffisamment mature pour passer d'une accumulation d'idées à une architecture gouvernée. Le projet possède une mission identifiable, une place entre deux références de marché, un choix moteur argumenté, une modularité structurée et une trajectoire de développement. Sa réussite dépendra maintenant moins de l'ajout de fonctions que de la capacité à tenir les interfaces, la masse, le programme d'essais et la discipline de configuration.

Le premier comité technique est invité à transformer cette baseline M0 en mandat de travail. L'objectif immédiat n'est pas de figer toutes les solutions, mais de rendre les décisions compatibles, les hypothèses vérifiables et les contributions cumulatives. C'est cette méthode qui peut faire d'OpenAE-905 à la fois un moteur crédible pour l'aviation légère, une base souveraine pour les drones et un actif industriel capable d'attirer des partenaires et des capitaux.

DÉCISION ATTENDUE

Approuver la baseline M0 comme référence de phase M1, sous réserve des commentaires consignés par le comité et de la mise à jour du registre des décisions.

OPEN AE
OPEN AIRCRAFT ENGINE

Concevoir Ensemble - Documenter Rigoureusement - Fabriquer Réellement - Tester Méthodiquement - Transmettre Durablement.