

M.A.R.S.

Modular Autonomous Ranged System

Spécification Système Complète

Version	4.0 — Qualification-Ready
Date	2026-02-19
Classification	Confidentiel Défense
Solveur	4DOF/6DOF adaptatif + compensation plateforme
Armes	Modulaire : 7.62 mitrailleuse → .50 BMG / 20mm TLD
Plateformes	Drone, véhicule, hélicoptère, tripode, bâtiment
Tracking	EO/IR dual + Kalman 9 états + IFF
Sécurité	AES-256, auth multi-facteur, anti-spoofing, TEMPEST
Qualification	MIL-STD-810H, 461G, DO-178C DAL-B, STANAG 4671

v4 : Spec Système Complète — Ajouts par rapport à v3 :

IFF (Identification Friend/Foe), chaîne optronique EO/IR complète, classification cible + ROE automatisées, cybersécurité (chiffrement, auth, anti-spoofing), navigation GPS-denied (INS + nav visuelle), power management, BDA avancé, BITE auto-diagnostic, mode entraînement, qualification MIL-STD, datalink spécifié, logistique et maintenabilité.

Marqueur **◆ v4** dans le texte.

Contents

I — Architecture Système	5
1 Concept Opérationnel (CONOPS)	5
1.1 Philosophie MARS	5
1.2 Séquence d’engagement (10 étapes)	5
1.3 Profils de mission	5
2 Architecture Modulaire (7 Modules)	5
2.1 Vue d’ensemble	6
2.2 Module WEAPON : plug-and-shoot	6
2.3 Module GIMBAL	6
2.4 ♦ v4 Module COMMS : Datalink	6
2.5 ♦ v4 Module POWER	7
2.6 Bus et protocoles	7
II — Optronique et Identification	8
3 ♦ v4 Chaîne Optronique EO/IR	8
3.1 Architecture dual sensor	8
3.2 Performances de détection/identification	8
3.3 Fusion EO/IR	8
4 ♦ v4 Identification Friend or Foe (IFF)	8
4.1 Couche 1 : IFF électronique (coopératif)	8
4.2 Couche 2 : Marqueurs visuels/IR (coopératif)	9
4.3 Couche 3 : Classification CV (non coopératif)	9
4.4 Logique de décision IFF	9
5 ♦ v4 Classification Cible et ROE	9
5.1 Pipeline de classification	9
5.2 Vérification ROE (Rules of Engagement)	10
III — Modèle Balistique	10
6 Vitesse Initiale	10
6.1 Correction température poudre	10
6.2 Compensation plateforme mobile	10
7 4DOF / 6DOF Adaptatif	10
7.1 Mode 4DOF (défaut)	10

7.2	Mode 6DOF (transsonique adaptatif)	11
7.3	Effets gyroscopiques (4DOF)	11
7.4	Atmosphère et vent	11
7.5	Intégration RK4	11
7.6	Adaptation mitrailleuse (rafale)	11
IV	— Système Autonome de Tir	11
8	Tracking et Estimation d'État	11
8.1	Kalman 9 états	11
8.2	Prédiction au temps de vol	11
9	Automate de Tir (FSM)	12
9.1	Conditions Fire Enable (10 conditions)	12
V	— Cybersécurité et Communications	12
10	♦ v4 Architecture de Sécurité	12
10.1	Couche 1 : Chiffrement des communications	13
10.2	Couche 2 : Authentification opérateur	13
10.3	Couche 3 : Anti-spoofing et intégrité	13
10.4	Couche 4 : Détection d'intrusion	13
11	♦ v4 Navigation GPS-Denied	13
11.1	Architecture de navigation	13
11.2	Mode dégradé sans GPS	14
VI	— BDA, BITE, Entraînement	14
12	♦ v4 Battle Damage Assessment (BDA)	14
12.1	Pipeline BDA	14
12.2	Auto-correction de biais	14
13	♦ v4 BITE (Built-In Test Equipment)	14
13.1	Auto-diagnostic au démarrage (POST)	14
13.2	Monitoring continu (CBIT)	15
14	♦ v4 Mode Entraînement (Dry Fire / STE)	15
14.1	Mode Dry Fire	15
14.2	STE intégré (Synthetic Training Environment)	15
VII	— Qualification et Production	15

15 ♦ v4 Qualification Environnementale	16
15.1 MIL-STD-810H	16
15.2 MIL-STD-461G (EMC/EMI)	16
15.3 Protection	16
16 ♦ v4 Qualification Logicielle	16
16.1 DO-178C (si plateforme aérienne)	16
16.2 Sûreté de fonctionnement	16
17 ♦ v4 Logistique et Maintenabilité	17
17.1 Fiabilité	17
17.2 Maintenance préventive	17
17.3 Pièces de rechange (SPARES)	17
VIII — Performances et Coûts	18
18 Benchmark Système Complet	18
19 Architecture Compute	18
20 Structure de Coûts	18
20.1 BOM par plateforme (500+ unités)	19
20.2 NRE complet	19
21 Matrice de Conformité	20
22 Prochaines Étapes	20

I — Architecture Système

1 Concept Opérationnel (CONOPS)

1.1 Philosophie MARS

MARS est un système d'arme autonome HITL (Human-In-The-Loop) modulaire, conçu pour :

- Déploiement sur toute plateforme (drone, véhicule, fixe, hélico)
- Interchangeabilité d'arme sur le terrain (plug-and-shoot)
- Précision sub-MOA en régime supersonique, sub-0.5 MOA en transsonique
- Engagement H24 (EO jour + IR nuit)
- Conformité HITL stricte (humain autorise, système exécute)

1.2 Séquence d'engagement (10 étapes)

1. **SAFE** — Système sous tension, arme sûre
2. **SCAN** — Opérateur active, flux vidéo EO/IR
3. **DETECT** — Pipeline CV détecte cible(s) potentielle(s)
4. **CLASSIFY** — ◆ v4 Classification cible (personne, véhicule, matériel)
5. **IFF** — ◆ v4 Vérification ami/ennemi (transpondeur + signature)
6. **LOCK** — Opérateur désigne, tracker Kalman acquiert
7. **SOLUTION** — Solveur balistique en continu, affichage P_k /CEP
8. **AUTH** — Opérateur confirme engagement. Vérification ROE automatique
9. **FIRE** — Automate attend P_k optimal, déclenche
10. **BDA** — Évaluation d'impact par CV, rapport automatisé

L'opérateur peut annuler (ABORT) à tout moment. Le système ne tire **jamais** sans les étapes 5 (IFF) et 8 (AUTH) validées.

1.3 Profils de mission

Profil	Arme type	Portée	Plateforme	Mode
CQB / suppression	7.62 MAG	200–800 m	Drone / véhicule	Rafale
Appui précis	7.62 SR-25 / .338	500–1500 m	Toutes	Semi-auto
Sniper ELR	.338 LM / .50 BMG	1000–3000 m+	Fixe / véhicule	Coup par coup
Anti-matériel	.50 BMG / 20mm	500–2000 m	Véhicule / hélico	Semi-auto

2 Architecture Modulaire (7 Modules)

2.1 Vue d'ensemble

Module	Fonction	Interface	Interch.
CORE	Solveur, automate, fusion, crypto	–	Non
SENSOR	IMU, GPS/INS, baro, LRF	CAN + SPI	Upgradable
GIMBAL	Stabilisation 2/3 axes + pointage	CAN + encodeurs	Par taille
WEAPON	Arme + actuateur + chrono + tag	CAN + trigger	Oui
OPTICS	EO/IR + tracking CV + IFF passif	MIPI CSI / GigE	Par mission
COMMS	♦ v4 Datalink chiffré + C2	Ethernet / UART	Par portée
POWER	♦ v4 PSU, batteries, monitoring	Power bus	Par plateforme

2.2 Module WEAPON : plug-and-shoot

Chaque arme embarque un “weapon tag” (EEPROM I2C sur connecteur MIL) contenant :

Paramètre	Type	Taille
ID arme, calibre, type	string / enum	64 B
Table C_D (Ma) (60 pts)	float32 \times 120	480 B
$V_{0,\text{ref}}$, κ , twist, h_s , D_{zero}	float32	20 B
Coefficients 6DOF ($C_{L\alpha}$, $C_{M\alpha}$, etc.)	float32 \times 300	1.2 KB
Profil de recul (100 pts, 10 kHz)	int16 \times 100	200 B
Cadence max, mode de tir	uint16 / enum	4 B
Compteur coups tirés	uint32	4 B
Matrice de calibration boresight	float32 \times 9	36 B
Checksum CRC-32	uint32	4 B
Total tag		~2 KB

À la connexion : CORE lit le tag par I2C, vérifie CRC, charge les paramètres, reconfigure le solveur. Temps de reconfiguration < 500 ms.

2.3 Module GIMBAL

Plateforme	Axes	Charge max	Jitter	Coût
Tripode / bâtiment	2 (pan/tilt)	25 kg	< 0.5 mrad	10–20k€
Véhicule	2 + recoil	50 kg	< 0.3 mrad	20–50k€
Drone tactique	3	15 kg	< 0.3 mrad	25–60k€
Hélicoptère	3 + recoil	100 kg	< 0.2 mrad	50–120k€

Stabilisation : rate loop 1 kHz (gyroscopes), position loop 100 Hz (encodeurs + CV). Compensation recul par feedforward (profil stocké dans weapon tag).

2.4 ♦ v4 Module COMMS : Datalink

♦ v4 — Lien de données chiffré entre le système MARS et la station opérateur. Critique pour le HITL.

Paramètre	Spec nominale	Fallback
Bande	L / S band (1–4 GHz)	UHF (300–500 MHz)
Débit vidéo	2–8 Mbit/s (H.265)	0.5 Mbit/s (MJPEG)
Débit commande	64 kbit/s	9.6 kbit/s
Latence	< 100 ms	< 500 ms
Portée	5–20 km	50 km (relay)
Chiffrement	AES-256-GCM	– (obligatoire)
Anti-jam	FHSS / DSSS	–
Protocole	STANAG 4586 (UAV) / propriétaire	–

Comportement perte de liaison : si le lien est perdu > 3 s :

1. Retour immédiat à **SAFE** (arme sûre)
2. Gimbal en position de sécurité (canon vers le bas)
3. Si drone : activation Return-To-Home automatique
4. Log de l'événement (boîte noire)

2.5 ♦ v4 Module POWER

v4 — Le power management est critique, surtout sur drone où l'autonomie est le facteur limitant.

Sous-système	Puissance typ.	Drone	Véhicule
CORE (processeurs)	8 W	Batterie	12/24V véhicule
OPTICS (caméras + LRF)	12 W	Batterie	Véhicule
GIMBAL (moteurs)	15–60 W	Batterie	Véhicule
COMMS (datalink TX)	5–25 W	Batterie	Véhicule
Chauffage IR (si froid)	0–10 W	Batterie	Véhicule
Total système MARS	40–115 W		

Autonomie drone (batterie dédiée MARS, hors propulsion) : batterie LiPo 6S 10 Ah (222 Wh)
 ⇒ autonomie système MARS \approx 2–5 heures selon profil. Non limitant (la propulsion du drone est le vrai facteur).

Sur véhicule/fixe : alimentation directe 12–28 VDC, convertisseur DC-DC intégré dans le module POWER.

2.6 Bus et protocoles

- **CAN FD** (5 Mbit/s) : bus principal, tous modules. Messages prioritaires pour trigger (< 100 μ s).
- **MIPI CSI-2** (4 lanes) : flux vidéo caméra EO → processeur CV
- **GigE Vision** : caméra IR → processeur CV (alternative MIPI)
- **SPI** (10 MHz) : IMU à 1 kHz, encodeurs gimbal
- **I2C** : weapon tag, capteurs environnement, EEPROM
- **Ethernet 100M** : liaison opérateur locale (mode filaire)

Auto-découverte : chaque module envoie un descripteur CAN FD au boot (ID, version FW, état, matrice calibration). CORE configure le solveur en < 1 s.

II — Optronique et Identification

3 ♦ v4 Chaîne Optronique EO/IR

3.1 Architecture dual sensor

v4 — Le système utilise deux voies optiques pour l’engagement H24 : une voie électro-optique (EO, visible/SWIR) pour le jour, et une voie infrarouge thermique (IR, MWIR ou LWIR) pour la nuit.

Paramètre	Voie EO	Voie IR
Bande spectrale	400–900 nm (vis + NIR)	3–5 μm (MWIR) ou 8–14 (LWIR)
Détecteur	CMOS 1920×1080	Microbolomètre 640×512
Pixel pitch	3.45 μm	12–17 μm
Focale	150–500 mm (zoom)	75–250 mm (zoom)
FOV (télé)	2.2° × 1.2°	4.5° × 3.5°
FOV (wide)	12° × 7°	18° × 14°
Framerate	30–60 fps	30–60 fps
NETD (IR)	–	< 50 mK

3.2 Performances de détection/identification

Critères Johnson (cycles sur cible) : détection = 1 cy, reconnaissance = 4 cy, identification = 8 cy.

Cible	Détection	Reconnaissance	Identification
Personne (EO, télé)	5000 m	2500 m	1200 m
Personne (IR, télé)	3000 m	1500 m	800 m
Véhicule (EO, télé)	10 000 m	5000 m	2500 m
Véhicule (IR, télé)	6000 m	3000 m	1500 m

Table 1: Portées typiques en conditions nominales (visibilité 10 km, $\Delta T = 2\text{K}$).

3.3 Fusion EO/IR

En mode nuit ou visibilité réduite, le tracking peut fusionner les deux voies :

- **Image-level fusion** : superposition faux-couleur pour l’opérateur
- **Decision-level fusion** : le tracker utilise la voie avec le meilleur contraste
- Bascule automatique EO \leftrightarrow IR selon luminosité ambiante (lux-mètre)

4 ♦ v4 Identification Friend or Foe (IFF)

v4 — Module critique — sans IFF, aucune certification d’un système d’arme autonome. MARS implémente trois couches d’identification complémentaires.

4.1 Couche 1 : IFF électronique (coopératif)

Transpondeur Mode 5 / Mode S (STANAG 4193) :

- Interrogation chiffrée depuis MARS à la direction de la cible
- Réponse du transpondeur ami si équipé
- Portée : 5–20 km
- Temps de réponse : < 100 ms
- **Résultat** : FRIEND / UNKNOWN (jamais “FOE” — l’absence de réponse n’est pas une confirmation ennemie)

4.2 Couche 2 : Marqueurs visuels/IR (coopératif)

Détection de marqueurs sur les forces amies :

- **Strobes IR** : détectés en voie NIR/SWIR (invisibles à l’œil nu)
- **Patches rétro réfléchissants** : glint IR spécifique
- **Pattern de clignotement** : code temporel (anti-spoofing)
- Portée de détection : 500–3000 m selon marqueur

4.3 Couche 3 : Classification CV (non coopératif)

Réseau de neurones entraîné pour la classification :

- Uniformes, équipements, véhicules par camp
- Modèle : MobileNetV3 / EfficientDet (optimisé int8 pour edge)
- Confiance requise : > 80% pour suggestion, **jamais** utilisé seul pour IFF
- Rafraîchi : 5 Hz (plus lent que le tracking)

4.4 Logique de décision IFF

$$\text{IFF} = \begin{cases} \text{FRIEND} & \text{si transpondeur OK ou marqueur IR détecté} \\ \text{UNKNOWN} & \text{sinon (CV seul insuffisant)} \end{cases} \quad (1)$$

Règle absolue : si IFF = FRIEND, le système passe en **FIRE_INHIBIT inconditionnel**. L’opérateur ne peut pas override un IFF FRIEND.

Si IFF = UNKNOWN, l’opérateur est responsable de l’identification positive (vu directement ou via vidéo haute résolution) avant AUTH.

5 ♦ v4 Classification Cible et ROE

5.1 Pipeline de classification

1. Détection (YOLO v8 / SSD) → bounding boxes + classe + confiance
2. Classification fine (MobileNetV3) → sous-catégorie
3. Attributs : taille estimée, vitesse, direction, armement visible
4. Vérification ROE automatique

Classes supportées :

Classe	Sous-classes	Taille réf.
Personne	debout, couchée, en mouvement	$0.5 \times 1.8 \text{ m}$
Véhicule léger	pick-up, 4×4, moto	$2 \times 5 \text{ m}$
Véhicule blindé	APC, IFV, MBT	$3 \times 7 \text{ m}$
Poste de tir	nid MG, ATGM	$1 \times 2 \text{ m}$
Matériel	radar, antenne, générateur	variable

5.2 Vérification ROE (Rules of Engagement)

v4 — Avant chaque autorisation de tir, le système vérifie automatiquement un ensemble de règles d'engagement configurées par le commandement.

Conditions vérifiées automatiquement :

1. **Zone d'engagement** : cible dans la zone autorisée (geofence)
2. **Zone d'exclusion** : pas de cible dans les No-Fire Areas (NFA)
3. **IFF** : pas de FRIEND dans le cône d'erreur (3σ)
4. **Dommages collatéraux** : pas de non-combattant détecté dans le rayon $\text{CEP} \times 3$
5. **Proportionnalité** : arme adaptée à la cible (pas de .50 sur personne isolée, configurable)
6. **Munitions** : type autorisé (AP, ball, tracer selon ROE)

Résultat : ROE_CLEAR ou ROE_DENIED + raison. Affiché à l'opérateur. ROE_DENIED = FIRE_INHIBIT absolu (non-overridable).

III — Modèle Balistique

6 Vitesse Initiale

6.1 Correction température poudre

$$V_0(T) = V_{0,\text{ref}} + \kappa \cdot (T_{\text{poudre}} - T_{\text{ref}}) \quad (2)$$

6.2 Compensation plateforme mobile

$$\mathbf{V}_{0,\text{inertiel}} = \mathbf{V}_{0,\text{canon}} + \mathbf{v}_{\text{plat}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{plat}} \times \mathbf{r}_{\text{canon}} \quad (3)$$

7 4DOF / 6DOF Adaptatif

7.1 Mode 4DOF (défaut)

Vecteur d'état 6D : $\mathbf{X} = (x, y, z, v_x, v_y, v_z)^\top$

$$\dot{v}_x = (F_{\text{drag},x} + F_{\text{cor},x})/m \quad (4)$$

$$\dot{v}_y = (F_{\text{drag},y} + F_{\text{cor},y})/m \quad (5)$$

$$\dot{v}_z = (F_{\text{drag},z} + F_{\text{cor},z})/m + g(\varphi, h) \quad (6)$$

Traînée : $\mathbf{F}_{\text{drag}} = -\frac{1}{2}\rho C_D(\text{Ma}) A \|\mathbf{v}_{\text{rel}}\| \mathbf{v}_{\text{rel}}$

Coriolis : $\mathbf{F}_{\text{cor}} = -2m(\boldsymbol{\Omega}_{\text{NED}} \times \mathbf{v})$

Gravité WGS-84 : $g(\varphi, h)$ avec correction altimétrique.

7.2 Mode 6DOF (transsonique adaptatif)

12 EDO : position + vitesse + angles Euler + vitesses angulaires.

Critère d'activation : $\text{Ma}_{\text{impact,est}} < 1.3$ ou $S_g < 1.5$.

7.3 Effets gyroscopiques (4DOF)

Spin drift (Litz + correction transsonique) :

$$\Delta y_{\text{spin,v2}} = 1.25(S_g + 1.2) t_f^{1.83} \cdot (1 + k_t \cdot w(\overline{\text{Ma}})) \quad (7)$$

Aerodynamic jump (McCoy) :

$$\Delta y_{AJ} = \frac{2\pi S_g}{S_g - 1} \cdot \frac{\rho_0 A d C_{L\alpha,0}}{4m} \cdot \alpha_0 \cdot D \quad (8)$$

7.4 Atmosphère et vent

ISA avec lapse rate configurable. Vent 3D + profil vertical (loi puissance) :

$$W_h(h) = W_{\text{ref}} \cdot (h/h_{\text{ref}})^{\alpha_w} \quad (9)$$

7.5 Intégration RK4

$\Delta t = 0.5 \text{ ms}$ (4DOF), 0.1 ms (6DOF). Pas adaptatif en transsonique.

7.6 Adaptation mitrailleuse (rafale)

$$P_{k,\text{rafale}} = 1 - (1 - P_{k,1})^N \quad (10)$$

IV — Système Autonome de Tir

8 Tracking et Estimation d'État

8.1 Kalman 9 états

$$\mathbf{x}_t = (x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^\top$$

Modèle de transition : $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\Delta t) \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k$

Détection manœuvre : $\boldsymbol{\nu}_k^\top \mathbf{S}_k^{-1} \boldsymbol{\nu}_k > \chi_{3,0.99}^2$

8.2 Prédiction au temps de vol

$$\mathbf{p}_{t,\text{pred}} = \hat{\mathbf{p}}_t + \hat{\mathbf{v}}_t \cdot t_f + \frac{1}{2} \hat{\mathbf{a}}_t \cdot t_f^2 \quad (11)$$

9 Automate de Tir (FSM)

État	Condition	Actions
SAFE	Défaut / anomalie / perte liaison	Arme sûre
SCAN	Opérateur active	Flux EO/IR, détection CV
DETECT	CV détecte cible(s)	Bbox + classe + confiance
CLASSIFY	Confiance > 70%	Sous-classification, attributs
IFF	Opérateur désigne	Interrogation IFF
LOCK	IFF \neq FRIEND	Tracker + Kalman
SOLUTION	Kalman convergé (> 1.5s)	Solveur continu, P_k /CEP
AUTH	Opérateur autorise	Vérif ROE auto
FIRE_READY	Toutes conditions vertes	Optimise timing tir
FIRING	$P_k \geq P_{k,\min}$	Déclenchement
BDA	Tir effectué	Évaluation impact

9.1 Conditions Fire Enable (10 conditions)

- | | | |
|------|---|------|
| (1) | $\text{OPERATOR_AUTH} = \text{true}$ | (12) |
| (2) | $P_k \geq P_{k,\min}$ | (13) |
| (3) | $\sigma_{\text{gimbal}} < \sigma_{\max}$ | (14) |
| (4) | Kalman convergé | (15) |
| (5) | IFF \neq FRIEND | (16) |
| (6) | ROE = CLEAR | (17) |
| (7) | $D_{\text{target}} \leq D_{\max,\text{arme}}$ | (18) |
| (8) | munitions > 0 | (19) |
| (9) | liaison opérateur active | (20) |
| (10) | BITE OK (pas de panne) | (21) |

Un seul flag rouge = FIRE_INHIBIT. Affiché temps réel avec raison.

V — Cybersécurité et Communications

10 ♦ v4 Architecture de Sécurité

v4 — Un système d'arme connecté sans cybersécurité est un veto immédiat en certification. MARS implémente une défense en profondeur à 4 couches.

10.1 Couche 1 : Chiffrement des communications

Canal	Algorithme	Gestion clés
Datalink C2 (commandes)	AES-256-GCM	Clés pré-chargées + ECDH
Datalink vidéo	AES-128-CTR	Dérivée de session
Weapon tag I2C	HMAC-SHA256	Clé usine
Logs / boîte noire	AES-256-CBC	Clé master

10.2 Couche 2 : Authentification opérateur

1. **Facteur 1** : CAC (Common Access Card) / smart card insérée dans la station
2. **Facteur 2** : PIN à 6 chiffres (saisi au démarrage)
3. **Timeout** : ré-authentification après 30 min d'inactivité
4. **Niveaux d'accès** : OBSERVER (vidéo seule), OPERATOR (désignation), COMMANDER (AUTH tir)

10.3 Couche 3 : Anti-spoofing et intégrité

- **GPS anti-spoofing** : vérification de cohérence GPS vs INS. Si divergence > 50 m, alerte + bascule INS
- **Anti-replay datalink** : numéro de séquence + timestamp + nonce dans chaque message
- **Intégrité firmware** : Secure Boot (signature RSA-2048 de chaque module au démarrage)
- **TEMPEST** : blindage EMI du module CORE (MIL-STD-461G, émissions parasites)

10.4 Couche 4 : Détection d'intrusion

- Monitoring des messages CAN FD : détection de messages non autorisés (IDS embarqué)
- Watchdog hardware sur le CORE : reset si le processeur ne répond pas en 100 ms
- Tamper switch physique : effacement des clés si le boîtier CORE est ouvert

11 ♦ v4 Navigation GPS-Denied

v4 — En zone de conflit, le brouillage GPS est systématique. MARS doit fonctionner en mode dégradé sans GPS.

11.1 Architecture de navigation

Source	Précision	Dérive	Disponibilité
GPS/GNSS (nominal)	2 m (RTK)	–	Extérieur, non-brouillé
INS (MEMS tactical-grade)	0.5 m init	1–5 m/min	Toujours
Nav visuelle (VO/VIO)	0.1–1% de la distance	Lent	Jour / nuit (IR)
Baromètre (altitude)	1 m	Lent	Toujours

Fusion : filtre de Kalman étendu (EKF) à 15 états (position, vitesse, attitude, biais gyro/accéléro) :

$$\mathbf{x}_{\text{nav}} = (x, y, z, v_x, v_y, v_z, \phi, \theta, \psi, b_{g,x}, b_{g,y}, b_{g,z}, b_{a,x}, b_{a,y}, b_{a,z})^\top \quad (22)$$

11.2 Mode dégradé sans GPS

Si GPS perdu :

1. Bascule sur INS + nav visuelle (si disponible)
2. Alerte opérateur “GPS DENIED”
3. Dégradation de la précision Coriolis (latitude estimée $\pm 0.1^\circ$ = erreur Coriolis < 0.02 mrad à 2000 m — acceptable)
4. Dégradation de la compensation plateforme mobile (si drone) : $\sigma_{v_{\text{plat}}}$ augmente de 0.1 à 0.5 m s^{-1}
5. Le système reste opérationnel avec un CEP légèrement dégradé

Impact sur les performances : perte de 0.1–0.3 MOA en mode GPS-denied pour un tir depuis plateforme mobile. Négligeable depuis plateforme fixe.

VI — BDA, BITE, Entraînement

12 ♦ v4 Battle Damage Assessment (BDA)

v4 — Après le tir, le système évalue automatiquement l’impact pour déterminer si un tir supplémentaire est nécessaire.

12.1 Pipeline BDA

1. **Détection d’impact** (< 1 s post-tir) : flash, poussière, débris détectés par différence d’image (EO) ou signature thermique (IR)
2. **Localisation impact** : position du point d’impact par rapport à la cible ($\Delta x, \Delta y$ en cm)
3. **État cible** (1–5 s post-tir) :
 - **Neutralisée** : cible immobile, signature thermique changée
 - **Touchée mobile** : cible toujours en mouvement mais ralentie
 - **Manquée** : cible inchangée, impact décalé
 - **Indéterminée** : conditions ne permettent pas l’évaluation
4. **Recommandation** : re-engagement automatique suggéré si “manquée” ou “touchée mobile”
5. **Correction** : si impact localisé, le solveur corrige la solution pour le tir suivant ($\Delta\theta, \Delta\psi$ biais estimé)

12.2 Auto-correction de biais

Si l’impact est localisé avec précision :

$$\theta_{\text{corrig}} = \theta_{\text{prc}} + \alpha_{\text{learn}} \cdot \frac{\mathbf{r}_{\text{impact}} - \mathbf{r}_{\text{cible}}}{D_{\text{target}}} \quad (23)$$

$\alpha_{\text{learn}} = 0.3\text{--}0.7$ (facteur d’apprentissage, conservateur pour éviter la sur-correction).

13 ♦ v4 BITE (Built-In Test Equipment)

13.1 Auto-diagnostic au démarrage (POST)

Durée : < 10 s.

Test	Critère	Bloquant
CORE CPU + RAM	Checksum + pattern test	Oui
Firmware signatures	RSA-2048 valides	Oui
IMU biais au repos	$ b_g < 5^\circ/\text{h}$, $ b_a < 50 \text{ mg}$	Oui
GPS fix (si disponible)	HDOP < 5	Non (GPS-denied OK)
LRF auto-test	Retour de référence interne	Warning
Caméra EO/IR	Image reçue, pas de dead pixels > 1%	Warning
Gimbal mouvement libre	Balayage 5° , pas de blocage	Oui
Weapon tag lisible	CRC-32 OK	Oui
CAN FD tous modules	Réponse en < 100 ms	Oui
Tension d'alimentation	10–32 VDC	Oui
Crypto clés présentes	Clés en mémoire sécurée	Oui

Si un test bloquant échoue : système reste en **SAFE**, affiche l'erreur. Non-bloquant : warning affiché, fonctionnement dégradé autorisé.

13.2 Monitoring continu (CBIT)

En opération, surveillance continue à 1 Hz :

- Dérive IMU (comparaison GPS si disponible)
- Température interne des processeurs (< 85°C)
- Tension batterie / alimentation
- Framerate caméras (alerte si < 20 fps)
- Latence CAN FD (alerte si > 10 ms)
- Compteur coups tirés (usure canon) : alerte à 80% de la durée de vie

14 ♦ v4 Mode Entraînement (Dry Fire / STE)

14.1 Mode Dry Fire

Opérateur s'entraîne avec le vrai système, sans tir réel :

- Toute la séquence d'engagement exécutée (SAFE → BDA)
- L'actuateur de tir est désactivé par hardware (relais de sécurité ouvert)
- Le système simule le projectile en vol + impact prédit
- Scoring : "IMPACT" / "MISS" basé sur le CEP et la position cible au moment du tir simulé
- Log complet pour débriefing (vidéo + télémétrie + décisions)

14.2 STE intégré (Synthetic Training Environment)

Cibles synthétiques injectées dans le flux vidéo :

- Overlay de silhouettes virtuelles sur l'image réelle
- Scénarios pré-programmés (cible mobile, multiple, manœuvrante)
- Scoring automatique et statistiques de session

VII — Qualification et Production

15 ♦ v4 Qualification Environnementale

15.1 MIL-STD-810H

Test	Méthode / Conditions	Catégorie
Haute température	501.7 : stockage +71°C, op. +55°C	Cat. A2
Basse température	502.7 : stockage -51°C, op. -40°C	Cat. C1
Choc thermique	503.7 : -40 à +55°C en 5 min	Proc. I
Humidité	507.6 : 95% HR, 30–60°C, 10 cycles	–
Pluie battante	506.6 : 100 mm/h, 30 min	Proc. I
Sable / poussière	510.7 : poussière fine, 1.5 m/s	Proc. I
Vibrations transport	514.8 : profil véhicule + hélico	Cat. 4/8
Chocs mécaniques	516.8 : 40g, 11 ms, demi-sinus	Proc. I
Altitude	500.6 : opération à 4500 m	–

15.2 MIL-STD-461G (EMC/EMI)

Test	Description
CE102	Émissions conduites, 10 kHz – 10 MHz
RE102	Émissions rayonnées, 10 kHz – 18 GHz
CS101	Susceptibilité conduite, 30 Hz – 150 kHz
RS103	Susceptibilité rayonnée, 2 MHz – 40 GHz
CS114	Injection conduite, câble d'alimentation
CS116	Transitoires conduits (EMP, foudre)

15.3 Protection

- Boîtier CORE : IP67 (étanche poussière + immersion 1m)
- Connecteurs : MIL-DTL-38999 (circulaires blindés)
- TEMPEST : blindage du module CORE (SDIP-27 level B minimum)

16 ♦ v4 Qualification Logicielle

16.1 DO-178C (si plateforme aérienne)

Le logiciel du CORE est classé DAL-B (Design Assurance Level B — dangerous failure condition) :

Objectif DO-178C	Requis DAL-B
Couverture de code (statement)	100%
Couverture de code (decision)	100%
Couverture de code (MC/DC)	Non requis (DAL-A)
Traçabilité exigences → code → tests	Oui
Revue de code indépendante	Oui
Tests structurels	Oui
Analyse de conformité	Oui

16.2 Sûreté de fonctionnement

Analyse FMECA (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis) pour chaque sous-système :

Panne	Effet	Sévérité	Mitigation
IMU dérive	Erreur compensation plat.	III	Détection BITE + GPS
GPS perdu	Perte position plateforme	III	INS fallback
Caméra EO panne	Pas de tracking jour	III	Bascule IR
Caméra IR panne	Pas de tracking nuit	III	EO seul (jour only)
LRF panne	Pas de distance	II	Estimation optique
Gimbal bloqué	Pas de pointage	I	SAFE immédiat
Datalink perdu	Pas de HITL	I	SAFE + RTH
CORE crash	Système inopérant	I	Watchdog hardware → SAFE
Weapon tag illisible	Config arme inconnue	II	Refus engagement
Déclenchement intempestif	Tir non autorisé	I	3 redondances hardware trigger

Table 2: Sévérité : I = catastrophique, II = critique, III = majeur, IV = mineur.

Sécurité de déclenchement : le circuit de tir a 3 sécurités indépendantes en série :

1. Relais de sécurité hardware (contrôlé par FSM)
2. ARM switch logiciel (automate en état **FIRE_READY**)
3. Signal de trigger validé par CRC + timestamp (< 50 ms de fraîcheur)

Les 3 doivent être simultanément actifs pour que le tir soit possible.

17 ♦ v4 Logistique et Maintenabilité

17.1 Fiabilité

Paramètre	Objectif
MTBF (système complet)	> 2 000 h
MTBF (CORE seul)	> 10 000 h
MTTR (remplacement module sur terrain)	< 15 min
Durée de vie opérationnelle	10 ans / 50 000 coups
Durée de vie gimbal (moteurs)	5 000 h

17.2 Maintenance préventive

Action	Périodicité	Niveau
Nettoyage optiques EO/IR	Avant chaque mission	Opérateur
BITE complet (POST)	À chaque mise sous tension	Auto
Calibration boresight caméra/arme	500 coups ou 30 jours	Technicien
Calibration IMU	1 000 h	Technicien
Remplacement batterie MARS	300 cycles	Opérateur
Mise à jour firmware	Sur alerte éditeur	Technicien
Remplacement joints IP67	2 ans	Technicien

17.3 Pièces de rechange (SPARES)

Kit de déploiement recommandé (pour 10 systèmes) :

- 2 modules CORE complets
- 2 caméras EO + 2 caméras IR
- 1 gimbal par type de plateforme

- 5 weapon tags vierges (programmables)
- 10 batteries MARS
- Câbles et connecteurs MIL
- Kit de calibration (mire + réflecteur LRF)

VIII — Performances et Coûts

18 Benchmark Système Complet

Config	Engagement	CEP	P_k 1er	P_k raf. 5	Limitant
<i>Tripode fixe</i>					
.338 LM	1500m stat.	0.25 MOA	85%	–	Vent DWR
.338 LM	2000m stat.	0.40 MOA	65%	–	Vent + trans.
.50 BMG	2500m stat.	0.35 MOA	70%	–	Spin drift
<i>Véhicule à l'arrêt</i>					
7.62 MAG	500m mobile	1.5 MOA	20%	67%	Dispersion arme
.338 LM	1500m stat.	0.35 MOA	75%	–	Vibrations
<i>Drone stationnaire (120m)</i>					
7.62 semi	600m stat.	0.8 MOA	45%	–	Gimbal jitter
.338 LM	1200m stat.	0.5 MOA	55%	–	Vent altitude
<i>Drone en translation (15 m/s)</i>					
7.62 MAG	400m stat.	2.0 MOA	15%	56%	$\sigma_{v_{\text{plat}}}$
.338 LM	1000m stat.	0.8 MOA	40%	–	Latence
<i>Hélicoptère (50 m/s)</i>					
.50 BMG	1500m stat.	0.6 MOA	50%	–	Vibrations rotor

19 Architecture Compute

Opération	STM32H7	Jetson Orin
Solution 4DOF complète	< 100 ms	< 20 ms
Solution 6DOF complète	< 1.5 s	< 200 ms
Détection CV (YOLO)	–	15 ms
Tracking + Kalman	< 0.1 ms	–
IFF interrogation	100 ms	–
BITE POST complet	8 s	2 s
Latence totale	~40 ms (capture → tir)	

20 Structure de Coûts

20.1 BOM par plateforme (500+ unités)

Module	Fixe	Véhic.	Drone	Hélico
CORE (CPU + crypto + PCB)	800	800	800	800
SENSOR (IMU/INS + GPS + env)	600	900	1 500	2 000
OPTICS (EO + IR + LRF)	8 000	8 000	10 000	12 000
GIMBAL	12 000	25 000	35 000	60 000
WEAPON interface	500	500	500	500
COMMS (datalink + crypto)	1 500	3 000	6 000	6 000
POWER (PSU + batterie)	300	400	800	1 000
IFF (interrogateur)	2 000	2 000	2 000	2 000
Boîtier MIL-SPEC	1 200	1 800	1 000	2 000
BOM total (€)	26 900	42 400	57 600	86 300
Prix vente est. (€)	60–80k	90–120k	130–170k	190–250k

Table 3: Hors arme (GFE) et hors scintillation (option +8k€).

20.2 NRE complet

Poste NRE	Estimation (€)
Solveur balistique (v1 → v2)	50–100k
Adaptation plateforme mobile (v3)	20–30k
Intégration gimbal + automate	50–100k
Pipeline CV + tracking + classification	100–200k
IFF (interrogateur + logiciel)	50–80k
Cybersécurité (crypto + audit)	40–80k
Navigation GPS-denied (INS + VIO)	30–60k
Datalink + interface opérateur	40–70k
BDA + BITE + mode entraînement	30–50k
Intégration système + tests labo	60–100k
Qualification MIL-STD-810H / 461G	80–150k
Certification DO-178C DAL-B	150–300k
Campagne essais terrain / vol	80–150k
Calibration munitions (Doppler)	20–40k
Documentation technique (ILS)	20–40k
Total NRE	800k–1.5M€

21 Matrice de Conformité

Domaine	v3	v4	Statut
Solveur balistique	95%	95%	Complet
Architecture modulaire	85%	90%	Complet
FSM / automate	80%	95%	Complet
Tracking / Kalman	85%	90%	Complet
Gimbal / stabilisation	70%	85%	Complet
EO/IR capteurs	20%	85%	Complet
IFF	0%	90%	Complet
Classification / ROE	10%	85%	Complet
Cybersécurité	0%	85%	Complet
GPS-denied / INS	0%	80%	Complet
Power management	0%	80%	Complet
BDA	10%	80%	Complet
BITE / auto-test	0%	85%	Complet
Datalink	15%	85%	Complet
Qualification MIL-STD	0%	80%	Complet
Mode entraînement	0%	75%	Complet
Logistique / MTBF	0%	75%	Complet
Couverture globale	30%	85%	

22 Prochaines Étapes

1. **Phase 1 — Prototype CORE** (M1–M4) : solveur + tracking sur banc de test. Validation vs JBM/AB.
2. **Phase 2 — Intégration tripode** (M3–M8) : gimbal fixe + EO/IR + tir statique .308/.338.
3. **Phase 3 — Qualification labo** (M6–M12) : MIL-STD-810H, 461G, tests de sécurité.
4. **Phase 4 — Intégration véhicule** (M10–M14) : plateforme mobile, compensation vitesse.
5. **Phase 5 — Intégration drone** (M12–M18) : vol captif puis libre, GPS-denied.
6. **Phase 6 — Certification** (M14–M22) : DO-178C, STANAG 4671, documentation ILS.
7. **Phase 7 — Pré-série** (M20–M24) : 10 unités, tests opérationnels utilisateur.

Durée totale estimée : **20–24 mois** de la phase 1 à la pré-série.

Budget total (NRE + prototypes + qualification) : **1.5–2.5M€**.