

Bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État

Rapport d'enquête de sécurité



M-2022-23-A

Date de l'évènement :	3 novembre 2022
Lieu :	Golfe de Guinée
Type d'appareil :	Schiebel S100
Organisme	Marine nationale

AVERTISSEMENT

UTILISATION DU RAPPORT

Conformément à l'article L.1621-3 du code des transports, l'unique objectif de l'enquête de sécurité est la prévention des accidents et incidents sans détermination des fautes ou des responsabilités.

L'établissement des causes n'implique pas la détermination d'une responsabilité administrative civile ou pénale.

Dès lors, toute utilisation totale ou partielle du présent rapport à d'autres fins que son but de sécurité est contraire aux engagements internationaux de la France, à l'esprit des lois et des règlements et relève de la seule responsabilité de son utilisateur.

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'évènement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'identification et l'analyse des causes de l'évènement font l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes retenues.

Le BEA-É formule ses recommandations de sécurité dans le quatrième et dernier chapitre.

Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heure UTC.

CRÉDITS

Figure 1	Marine nationale BEA-É et <i>Google Earth</i>	Page de garde 7
Figures 2 et 3	Marine nationale	9 et 11
Figure 4	BEA-É	12
Figures 5 à 9	BEA-É et Gendarmerie de l'air	13 à 18
Figure 10	DGA	24

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS.....	5
1. RENSEIGNEMENTS DE BASE.....	6
1.1. Déroulement du vol.....	6
1.2. Dommages corporels.....	7
1.3. Dommages à l'aéronef	7
1.4. Autres dommages	7
1.5. Renseignements sur l'équipage.....	7
1.6. Renseignements sur l'aéronef.....	8
1.7. Conditions météorologiques	9
1.8. Aides à la navigation	9
1.9. Télécommunications	9
1.10. Renseignements sur le PHA Tonnerre	9
1.11. Enregistreurs de bord.....	9
1.12. Constatations sur l'aéronef	9
1.13. Renseignements médicaux.....	10
1.14. Incendie.....	10
1.15. Questions relatives à la récupération du drone	10
1.16. Essais et recherches	10
1.17. Renseignements sur les organismes.....	10
1.18. Renseignements supplémentaires	10
2. ANALYSE.....	15
2.1. Expertises techniques.....	15
2.2. Séquence de l'évènement.....	18
2.3. Recherche des causes de l'évènement.....	19
2.4. Facteurs n'ayant pas trait avec l'évènement.....	19
3. CONCLUSION	21
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	21
3.2. Causes de l'évènement	21
4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ	23
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	23
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement	23
ANNEXE.....	24

GLOSSAIRE

CEPA	Centre d'expérimentations pratiques et de réception de l'aéronautique navale
DGA - EV	Direction générale de l'armement - essais en vol
ECU	<i>Engine control unit</i> - module de contrôle du moteur
ft	<i>Feet</i> , pieds (1 pied vaut environ 30,48 cm)
GPS	<i>Global positioning system</i> – système de géolocalisation par satellites
kt	<i>Knots</i> , nœuds (1 nœud vaut 1,852 km/h)
MPCW	<i>Mission Planning and Control Module</i> – module de contrôle et de planification de mission
Nm	<i>Nautical miles</i> – milles nautiques (1 Nm vaut 1 852 m)
OCS	Opérateur de contrôle station
OCU	Opérateur charge utile
PCU	<i>Pilot control unit</i> - unité de contrôle et de pilotage
PHA	Porte-hélicoptère amphibie

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 3 novembre 2022 à 16h20 UTC

Lieu de l'évènement : Golfe de Guinée

Organisme : Marine nationale

Commandement organique : Centre d'expérimentations pratiques et de réception de l'aéronautique navale (CEPA)

Unité : Détachement drone S100 du CEPA/10S (DET CEPA) sur PHA¹ Tonnerre

Aéronef : Drone Schiebel S100 immatriculé F-ZABF

Nature du vol : Mission d'entraînement

Nombre de téléopérateurs : 3

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Le jeudi 3 novembre 2022, un drone Schiebel S100 du CEPA décolle vers 14h00 du PHA Tonnerre pour un vol d'entraînement de 3 heures permettant de requalifier l'équipage et de travailler l'interaction du drone avec le PHA. Après environ 2h30 de vol, les objectifs étant atteints, le téléopérateur fait revenir le drone en direction du PHA. Durant le trajet retour, une alarme *ECU RESET*² est émise par le système alors que l'aéronef est encore à 8 Nm³ du bord. Environ 3 minutes après, les paramètres moteurs s'effondrent instantanément et le drone s'abîme en mer dans la minute suivante.

Sans système de flottabilité, le drone sombre et ne peut être récupéré.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État (BEA-É) ;
- un enquêteur technique (BEA-É) ;
- un télépilote ayant une expertise sur Schiebel S100 ;
- un mécanicien ayant une expertise sur Schiebel S100.

Autres experts consultés

- Direction générale de l'armement – Essais propulseurs/ division évaluation des systèmes aéropropulsifs/ restitution des enregistreurs d'accidents (DGA EP/DESA/RESEDA) ;
- Direction générale de l'armement – Essais en vol (DGA EV);
- Société Schiebel.

¹ Porte-hélicoptère amphibie.

² ECU : *engine control unit* - module de contrôle du moteur.

³ *Nautical miles* – milles nautiques (1 Nm vaut 1 852 m).

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : CAM T⁴

Type de mission : entraînement

Dernier point de départ : PHA Tonnerre

Heure de départ : 14h

Point d'atterrissage prévu : PHA Tonnerre

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Contexte et préparation du vol

Le mercredi 2 novembre 2022, un drone Schiebel S100 embarqué sur le PHA Tonnerre effectue un vol technique pour valider la repose d'une *electronics box* (E-box) qui revient de réparation suite à un problème d'alimentation. Cet équipement est le cœur du système et intègre le module de contrôle de vol. Le vol technique se passe nominalement et l'analyse des paramètres faite par le constructeur lui permet d'autoriser les vols suivants.

1.1.2.2. Description du vol et des éléments qui ont conduit à l'évènement

Le lendemain, jeudi 3 novembre 2022, le détachement CEPA (DET CEPA) organise la requalification de ses téléopérateurs de drones ainsi que du système. Ce vol d'entraînement, nécessaire à l'issue d'une période d'inactivité, se décompose en deux phases. La première phase permet aux trois téléopérateurs du DET CEPA de s'exercer à l'approche et à l'appontage sur deux spots du PHA. La seconde requalifie le système Schiebel S100 vis-à-vis de son intégration avec le PHA.

L'équipage se compose d'un opérateur de contrôle station (OCS) qui est le commandant d'aéronef (CA) responsable de la mission, d'un opérateur charge utile (OCU) qui gère les capteurs optroniques du drone et d'un opérateur qui en assure le pilotage via le *pilot control unit*⁵ (PCU). Tous les trois sont des télépilotes qualifiés sur le drone S100. Durant 1h20, ils se relayent sur le pont, en alternant les phases d'approche à vue et les appontages sur les deux spots du PHA principalement en pilotage manuel.

À 15h20, le dernier télépilote reste aux commandes et débute la phase de calibration. Pour cela, il quitte le pont et rejoint le centre des opérations. De cette place, il pilote le drone S100 hors vue à une altitude de 1 000 ft⁶ et jusqu'à une distance de 11 Nm afin de calibrer les performances du radar d'appontage. Puis le drone est dirigé sur une zone située à l'avant et à bâbord du PHA pour évaluer les radars de navigation. En dernière partie du vol, le drone est éloigné à 9 Nm pour tester le *medium range radar* (MRR) en puissance réduite.

1.1.2.3. Reconstitution de la partie significative de la trajectoire du vol

La calibration des performances du couple drone-radar étant terminée, le télépilote donne l'ordre au drone de prendre un cap en direction du PHA. Il remonte ensuite sur le pont pour piloter à vue l'approche du drone dès son retour aux abords du PHA.

À 16h16, alors que le drone est encore situé à environ 8 Nm du PHA à une altitude de 1 700 ft et qu'il vole en mode automatique en direction du navire, le nombre de tours moteur baisse momentanément de 7 100 tr/min à 5 600 tr/min. Les alarmes *Free Wheel Opened* et *ECU reset* retentissent et informent l'équipage d'un dysfonctionnement. Toutefois, le régime moteur revient rapidement à une valeur nominale de 7 100tr/min et les alarmes s'effacent. L'équipage décide de ramener le drone sur le PHA et de le poser.

À 16h20, les tours moteur chutent définitivement et le moteur se coupe. De nombreuses alarmes s'allument, le pilote reprend le drone en mode manuel et essaie de maintenir une trajectoire d'autorotation pilotée. Le vol du drone S100 se termine en mer en moins d'une minute.

⁴ Circulation aérienne militaire tactique.

⁵ Unité de contrôle et de pilotage.

⁶ Feet – pieds (1 ft vaut environ 30,48 cm).



Figure 1 : trajectoire

1.1.3. Localisation

- Lieu : Golfe de Guinée (eaux internationales)
 - coordonnées géographiques : N 004° 53' 40"/ O 004° 07' 30"
 - altitude du lieu de l'évènement : 1 700 ft
- Moment : jour
- Plateforme la plus proche au moment de l'évènement : PHA Tonnerre

1.2. Dommages corporels

Sans objet.

1.3. Dommages à l'aéronef

Le drone s'est abîmé en mer et a sombré.

1.4. Autres dommages

Sans objet.

1.5. Renseignements sur l'équipage

1.5.1. Commandant d'aéronef

- Âge : 48 ans
- Unité d'affectation : détachement drone S100 du CEPA/10S sur PHA Tonnerre
- Formations :
 - qualification : commandant d'aéronef, OPUAV⁷ confirmé, licence Schiebel en octobre 2011
- Heures de vol comme télépilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100
Total (h)	930	634	14	14	1	1

- Date du précédent vol : 2 novembre 2022

⁷ OPUAV : Opérateur *Unmanned Aerial Vehicle*.

1.5.2. Opérateur charge utile (OCU)

- Âge : 46 ans
- Unité d'affectation : détachement drone S100 du CEPA/10S sur PHA Tonnerre
- Formations :
 - qualification : OPUAV opérationnel, licence Schiebel en décembre 2019
- Heures de vol comme télépilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100
Total (h)	148	148	13	13	1	1

- Date du précédent vol : 2 novembre 2022

1.5.3. Opérateur *pilot control unit* (PCU)

- Âge : 41 ans
- Unité d'affectation : détachement drone S100 du CEPA/10S sur PHA Tonnerre
- Formations :
 - qualification : OPUAV opérationnel, licence Schiebel en décembre 2019
- Heures de vol comme télépilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100	sur tout type	Dont Schiebel S100
Total (h)	213	195	56	56	1	1

- Date du précédent vol : 2 novembre 2022

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : Marine nationale
- Organisme de maintenance : Schiebel *Aircraft*
- Aérodrome de stationnement : PHA Tonnerre
- Unité d'affectation : CEPA/10S
- Type d'aéronef :

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales
Cellule	Drone Schiebel S100	477	10
moteur	Schiebel <i>Engine Module</i> MT6072/01/001	000151	13

L'ECU de l'évènement est le n°228.

1.6.1. Maintenance

L'examen de la documentation témoigne d'un entretien de l'appareil conforme au programme de maintenance recommandé par l'industriel et à celui défini dans l'autorisation de vol de la DGA.

1.6.2. Performance

L'aéronef est exploité dans son domaine de vol tout au long de la mission.

1.6.3. Masse et centrage

La masse et le centrage sont dans les normes d'emploi de l'aéronef pendant tout le vol de la mission.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : 100 LL (F18)
- Quantité de carburant au décollage : 41 kg
- Quantité de carburant au moment de l'évènement : 22 kg

1.6.5. Autres fluides

Huile moteur SILKOLENE Classic 2T.

1.7. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques sont compatibles avec la mission prévue. La visibilité est supérieure à 6 000 m, la température de 29 °C pour un vent de 10 à 15 kt⁸.

1.8. Aides à la navigation

Le système drone Schiebel est équipé d'un système de navigation autonome par satellite qui s'appuie sur deux puces GPS⁹.

1.9. Télécommunications

Le drone est équipé de liaisons de données permettant à l'opérateur de contrôler à distance la trajectoire et les charges utiles.

1.10. Renseignements sur le porte hélicoptères amphibie Tonnerre

Le Tonnerre est un navire de guerre de la classe Mistral de la Marine nationale française. Doté d'une capacité de transport de personnel et de matériels, ce porte-hélicoptères amphibie présente 6 spots d'appontage.



Figure 2 : PHA Tonnerre

1.11. Enregistreur de bord

L'appareil n'est pas équipé d'un système d'enregistrement de données de vol. Cependant la station sol enregistre tous les paramètres de vol transmis en permanence par le drone durant la mission.

1.12. Constatations sur l'aéronef

Le drone n'a pas été récupéré.

⁸ *Knots* – noeuds (1 kt vaut 1,852 km/h).

⁹ *Global positioning system* – système de positionnement par satellites.

1.13. Renseignements médicaux

1.13.1. Commandant d'aéronef

- Dernier examen médical :
 - type : visite en centre d'expertise médicale du personnel navigant (CEMPN)¹⁰ le 2 septembre 2022
 - résultat : apte
- Examens biologiques toxicologiques : effectués
- Blessures : aucune

1.13.2. Opérateur charge utile

- Dernier examen médical :
 - type : visite semestrielle à l'unité du 31 août 2022 en référence à la visite au CEMPN du 10 mars 2022
 - résultat : apte
- Examens biologiques toxicologiques : effectués
- Blessures : aucune

1.13.3. Opérateur *pilot control unit*

- Dernier examen médical :
 - type : visite au CEMPN du 25 septembre 2022
 - résultat : apte
- Examens biologiques toxicologiques : effectués
- Blessures : aucune

1.14. Incendie

Sans objet.

1.15. Questions relatives à la récupération du drone

Une recherche en mer utilisant les moyens du PHA Tonnerre n'a pas permis de récupérer le drone. Ce dernier n'était pas équipé de dispositif de flottabilité de secours et a coulé immédiatement.

1.16. Essais et recherches

Les expertises des données du S100 sont réalisées avec le concours de DGA EV et de la société Schiebel.

1.17. Renseignements sur les organismes

Depuis 2016, deux exemplaires de drones S100 au standard « v1 » étaient mis en œuvre à partir de la terre ou depuis les Porte-hélicoptères amphibie (PHA) au sein de la Marine nationale par le CEPA/10S. Après une première démonstration de leur plus-value opérationnelle, quatre autres S100 au standard « v2 » ont été livrés à la Marine nationale fin 2020 pour poursuivre l'évaluation opérationnelle de ces systèmes. Pour homogénéiser le parc de drones S100 de la Marine et pour lui permettre de poursuivre l'emploi de ses vecteurs plus anciens à bord des PHA, l'industriel et les techniciens du détachement drones du CEPA/10S sont intervenus sur ces deux drones pour les passer au standard « v2 » dans le cadre d'un contrat passé par la Direction générale de l'armement. La « v2 » du S100 permet de résister au brouillage GPS et dispose de nouvelles charges utiles.

1.18. Renseignements supplémentaires

1.18.1. Vecteur drone

Le drone Schiebel est un hélicoptère léger monomoteur autonome avec un rotor principal à deux pales.

¹⁰ Référence : Arrêté du 10 septembre 2021 fixant les conditions médicales et physiques d'aptitude exigées pour le personnel militaire de la Marine nationale.

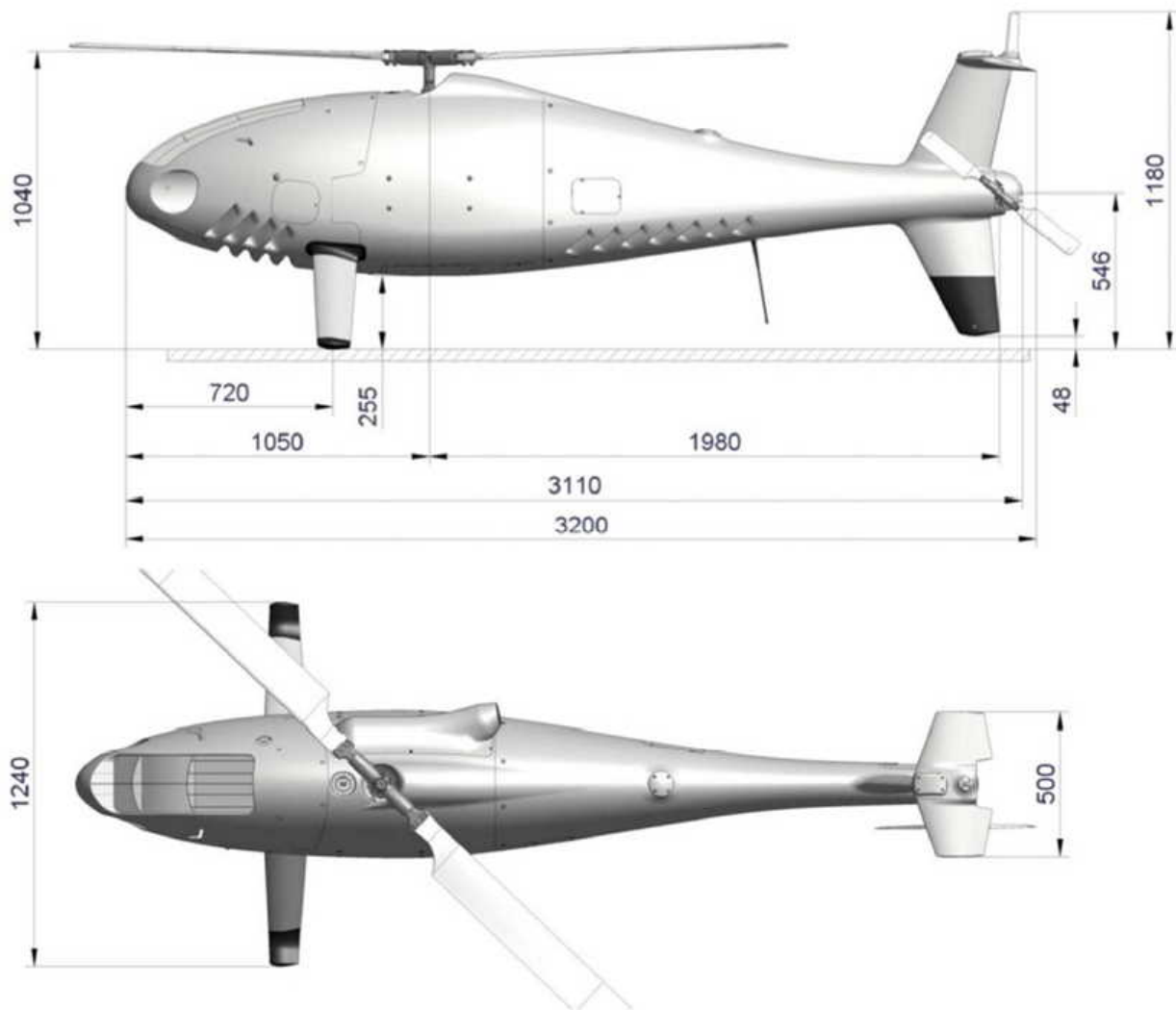


Figure 3: schéma du drone Schiebel S100

1.18.2. Télépilotage et équipage

Le système du drone Schiebel est télépiloté depuis le centre des opérations du PHA en mode automatique ou depuis le pont en mode manuel. Le centre des opérations intègre (de gauche à droite sur la figure):

- une station de planification et de contrôle nommée *Mission Planning and Control Module* (MPCW);
- une station de gestion des charges utiles ;
- une unité de contrôle et de pilotage appelée *pilot control unit* (PCU);
- un ensemble de consoles qui assurent l'interface avec le système de combat et le suivi tactique avec un écran dédié à la restitution des informations en temps réel destiné au chef de mission.



Figure 4 : centre des opérations

La station de planification et de contrôle est constituée d'un ordinateur portable qui utilise un logiciel dédié pour planifier les missions, configurer l'ensemble du système, contrôler et ajuster les paramètres du vecteur aérien pendant le vol.

La station de gestion des charges utiles est conçue pour visualiser et enregistrer les différentes vidéos issues des caméras embarquées sur le vecteur aérien.

Le PCU est l'unité de commande destinée à l'opérateur pilote qui permet notamment de diriger le vecteur aérien en mode manuel et de reprendre la commande du vecteur aérien en mode urgence.

La présence d'un opérateur PCU est requise pendant toute la durée du vol, soit sur le pont pour les phases de décollage et d'appontage, soit dans le centre des opérations pour le suivi du vol à distance et la reprise en mode manuel en cas d'avarie.

1.18.3. Boîtier électronique (E-box)

L'équipement électronique nommé E-box représente l'élément central du système du drone. Il est situé à l'intérieur du fuselage principal et se compose de trois modules distincts. Le *Flight Control Modul* (FCM) est chargé de la navigation, du contrôle et de la surveillance des divers paramètres de vol. Il collecte les informations issues des deux systèmes GPS, des centrales inertielles, de la centrale aérodynamique ainsi que du magnétomètre. Le *Link Control Modul* (LCM) assure la gestion des communications entre le module FCM, les charges utiles et la station de contrôle. Il s'acquitte de cette tâche en utilisant les liaisons de données. Le *Power Supply Modul* (PSM) est, quant à lui, responsable de la gestion de l'alimentation électrique du vecteur aérien.

Le FCM de l'E-Box est directement connecté à l'ECU par un harnais électrique pour le pilotage de la régulation du moteur.

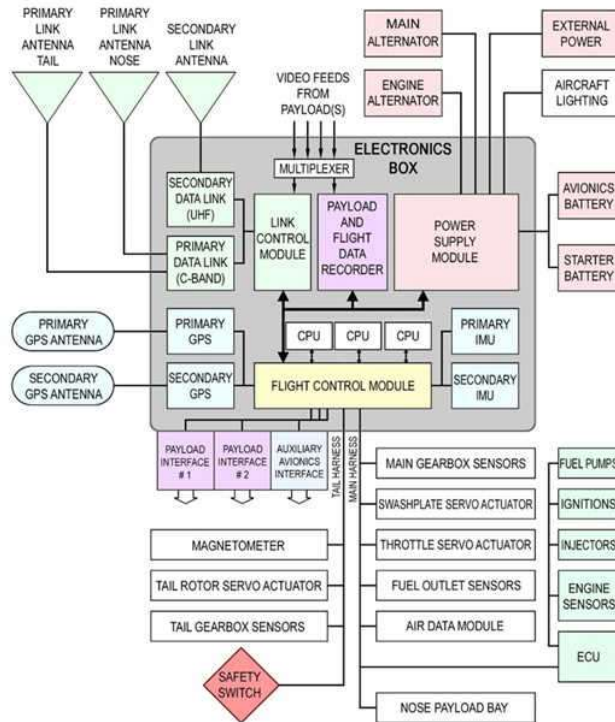
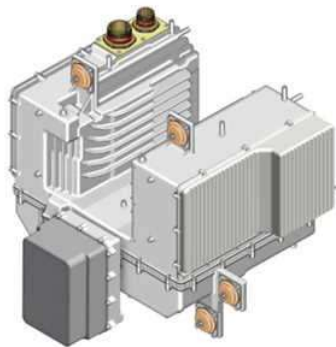


Figure 5 : E-Box

1.18.4. Moteur

Le drone est équipé d'un moteur de type Wankel d'une puissance d'environ 55 chevaux au décollage. La vitesse de rotation du moteur est de 3 500 tr/min au ralenti, tandis qu'elle atteint 7 100 tr/min en régime nominal. Le système de refroidissement du moteur est assuré par de l'air, tandis que la chambre de combustion bénéficie d'un système de refroidissement par liquide et sa lubrification est de type « à perte » avec un réservoir d'huile dédié.

1.18.5. ECU



Figure 6 : ECU

L'ECU est un module électronique de contrôle destiné à la gestion du moteur. Il traite en temps réel les données à partir de différents capteurs installés sur le moteur et dans son environnement immédiat. L'ECU gère l'injection de carburant, l'allumage et le régime moteur.

En cas de détection d'une panne ou d'un dysfonctionnement, l'ECU est en mesure de déclencher des alertes. Il peut également limiter la puissance du moteur pour protéger celui-ci en cas de surchauffe ou de surcharge.

2. ANALYSE

2.1. Expertises techniques

2.1.1. Historique de l'E-box avionnée sur l'appareil

Le 13 septembre 2022, l'E-box concernée par l'évènement est constatée défectueuse. En effet, à l'occasion d'une mise en œuvre d'un drone S100 sur la base de l'aéronautique navale de Hyères, le CEPA a identifié un problème de rechargement des batteries. L'E-box est mise en cause en reproduisant la panne sur un autre drone sur lequel elle venait d'être installée. L'E-Box est donc envoyée à l'industriel pour réparation.

L'équipement revient le 23 octobre 2022 et il est installé sur un S100 à Hyères pour réaliser un point fixe de 2h selon les modalités prescrites par l'industriel Schiebel. Les résultats transmis à l'industriel permettent de valider le fonctionnement du drone et de la station de contrôle système le 27 octobre 2022. Le DET CEPA embarque avec l'équipement sur le PHA Tonnerre en escale à Abidjan le 28 octobre 2022. Le 29 octobre 2022, l'E-Box est remontée sur le drone concerné par l'évènement par les techniciens du détachement et testée électriquement au sol. Une remise en service est effectuée le 1^{er} novembre 2022 et permet d'autoriser les vols du drone. Le 2 novembre 2022, un vol technique de 30 minutes avec cette E-Box permet de vérifier le bon fonctionnement du système. Le constructeur valide les résultats du vol technique, ce qui permet la poursuite des vols du vecteur.

Le 3 novembre 2022, lors de la séance d'entraînement à l'appontage sur le PHA, le système fait remonter une température de refroidissement supérieure à 95 °C. Ce phénomène est connu et la poursuite du vol est autorisée si l'alarme disparaît au bout de 3 minutes et si la température n'excède à aucun moment 105 °C. En effet, en raison d'une circulation de l'air moindre sur le pont, le système a tendance à chauffer. Le vol est poursuivi.

Le Schiebel S100, présent sur le PHA Tonnerre, est remis en vol suite à l'installation d'une E-box de retour de réparation. Depuis, cet équipement a fonctionné moins de 3 heures avant l'apparition d'une alarme.

2.1.2. Analyse des données (cf. Annexe)

L'analyse ci-dessous des données provient des éléments enregistrés à partir de la MPCW.

Les alarmes *Free Wheel Opened*¹¹ et *ECU reset* interviennent à 16h16'26''. Le régime moteur chute à 5 300 tr/min puis revient rapidement au nominal à 7 100tr/min et les alarmes s'effacent. Alors que le régime moteur chute, le déclenchement de la roue libre assure la préservation du régime rotor.

À 16h20'10'', de nombreuses pannes apparaissent en particulier *power limit reached*¹² et *engine communication fail*¹³ associées à une valeur de commande de gaz¹⁴ qui passe à 100 %. On constate alors une chute brutale du régime moteur en moins de 10 s, associée à un taux de chute du drone important de 4 000 ft/mn qui se stabilise ensuite autour de 2 500 ft/mn. Le télépilote agit sur les commandes de vol pour créer les conditions d'autorotation, conduisant à des oscillations des tours rotor. L'arrêt du moteur entraîne des pannes électriques. Les tours rotors sont maintenus via le taux de chute du drone en autorotation. Les batteries continuent de fonctionner et le niveau de tension délivré est maintenu à un niveau standard jusqu'à la fin.

Par ailleurs, les paramètres enregistrés par l'ECU (pression carburant et pression d'admission) sont figés à partir de l'apparition de la panne, ce qui est un symptôme d'une rupture de communication entre l'ECU et le FCM. Les paramètres d'environnement (T°, humidité, etc...) de l'ECU ne sont pas anormaux avant l'apparition de la panne et sont cohérents avec le reste du vol.

¹¹ Roue libre ouverte.

¹² Limite de puissance atteinte.

¹³ Défaut de communication avec le moteur.

¹⁴ La position de la manette de gaz est commandée et monitorée par le FCM et pas par l'ECU.

À 16h20'19'', le pilote change le mode de pilotage du drone, passant du mode automatique au mode manuel durant la phase d'autorotation. Cela est sans effet significatif sur la gestion de la trajectoire du drone. A 16h20'55', le drone percute l'océan et coule.

Après l'apparition d'alarmes associée à un dysfonctionnement de l'ECU, le moteur s'arrête. Le drone passe en autorotation et percute la surface de l'eau 45 s après l'arrêt du moteur.

2.1.3. Analyse d'évènements antérieurs sur Schiebel S100

Deux évènements se sont déjà produits sur des drones Schiebel S100 de la Marine. Suite au premier évènement en 2012, le drone n'a pas pu être récupéré car il est tombé en mer (enquête M-2012-014-A). Le moteur et l'ECU n°226 du second évènement, qui n'a pas donné lieu à une enquête de sécurité, ont pu être expertisés en raison de la récupération du drone après l'incident. Bien que la succession des alarmes et des dysfonctionnements diffère du présent évènement, l'alarme *ECU reset* apparaît dans ces deux cas précédents.

2.1.3.1. Expertise de l'ECU n°226 du deuxième évènement

L'ECU n°226 a été expertisé par le constructeur. L'inspection visuelle a été jugée satisfaisante. La présence de toutes les broches du connecteur a bien été constatée. Par ailleurs, la radiographie à rayons X n'a révélé ni fissure ni signe de choc ou de déformation sur le carter.

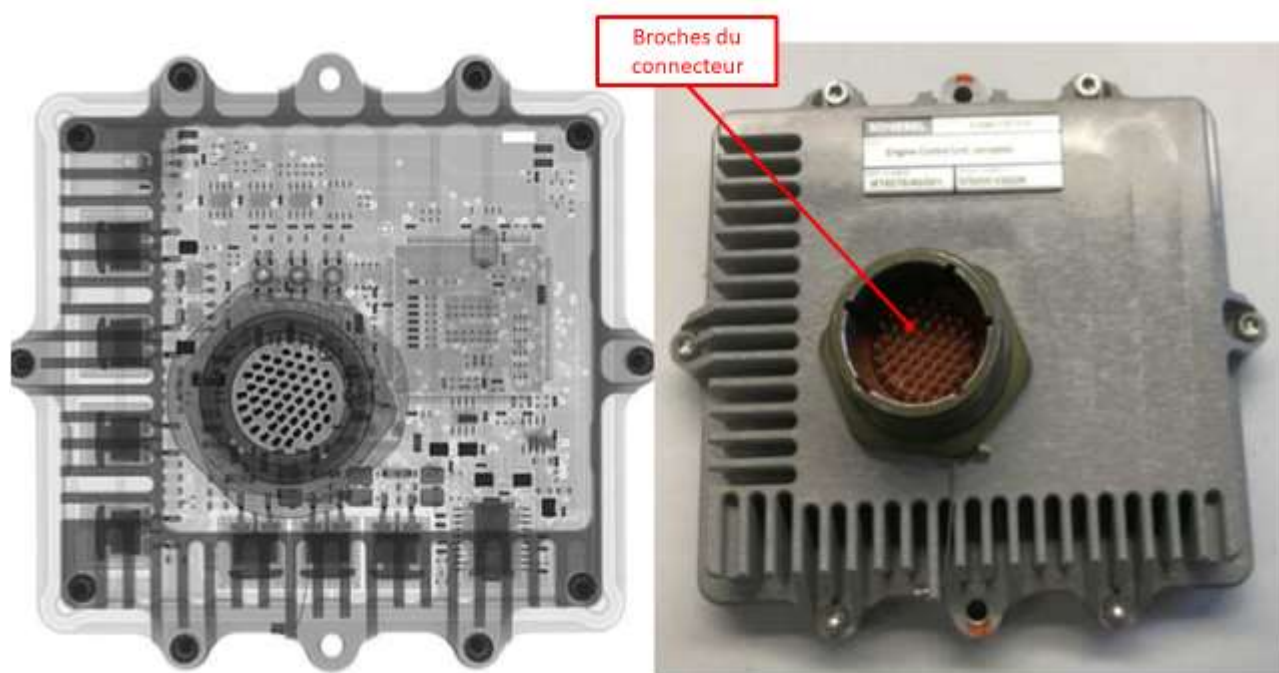


Figure 7 : ECU passé aux rayons X

Les essais sur pot vibrant ont été effectués avec succès aux températures de 20 °C, 70 °C et 80 °C. Le test fonctionnel du dispositif de surveillance, *watchdog*¹⁵, est également satisfaisant, avec une réinitialisation, en moins de 50 ms conformément aux attentes.

L'ECU n°226, impliqué dans le second évènement, suite à une panne moteur associée à l'alarme ECU Reset, a été expertisé par le constructeur. Sans défaut détecté, cet ECU semblait fonctionner nominalement.

¹⁵ En électronique, un *watchdog* (chien de garde) est un dispositif électronique conçu pour surveiller le bon fonctionnement d'un système ou d'un processeur. Il s'agit d'un circuit intégré qui, lorsqu'il détecte une anomalie, peut générer une réinitialisation du système ou une alerte pour indiquer un problème. Le *watchdog* est souvent utilisé dans des applications critiques, telles que l'aéronautique, l'automobile ou les systèmes de contrôle industriels pour garantir la fiabilité du système en cas de dysfonctionnement.

2.1.3.2. Essais en chambre climatique de l'ECU n°226

Les essais en chambre climatique sont des tests effectués sur des équipements ou des produits dans une chambre où les conditions climatiques sont contrôlées et réglées pour simuler différentes conditions environnementales. Ces essais permettent de vérifier la résistance et la fiabilité des équipements ou des produits dans des conditions extrêmes telles que des températures élevées ou basses, des taux d'humidité élevés, des cycles thermiques, etc. Les résultats des essais en chambre climatique sont utilisés pour valider la conception et la qualité des équipements et des produits avant leur mise en service.

Après une durée de 26,5 heures d'essais effectués en chambre climatique à une température de 85 °C, l'ECU n°226 commence à présenter des dysfonctionnements. Dans un premier temps, ces dysfonctionnements se traduisent par une simple réinitialisation, mais par la suite, le taux de réinitialisation augmente progressivement, pour se répéter plusieurs fois par seconde.



Figure 8 : séquences de réinitialisation de l'ECU (en blanc)

La tension d'alimentation reste conforme durant tout ce cycle. Une relation est constatée entre ces réinitialisations de l'ECU et le *watchdog*. Les mises à zéro du compteur du *watchdog* ont lieu toutes les 89 ms au lieu des 20 ms attendues. Si la mise à zéro du *watchdog* n'intervient pas avant 50 ms, ce dernier réinitialise l'ECU. De plus, la communication avec la régulation du moteur n'est plus fonctionnelle. La vérification du *watchdog* montre une fréquence de fonctionnement anormale. Cette défaillance a pour origine le *Phase Locked Loop*¹⁶ (PLL) de l'ECU.

Le PLL est le circuit électronique qui génère un signal d'horloge de sortie avec une fréquence précise qui se base sur le signal de référence d'un quartz. Ce signal de l'horloge est le signal électrique qui synchronise les opérations de tous les composants de l'ECU. C'est également le quartz d'horloge qui fournit un signal stable et précis permettant au processeur de synchroniser et de contrôler les opérations. Ce signal de référence est comparé avec la sortie de l'oscillateur dans le comparateur de phase et toute différence de phase est utilisée pour ajuster la fréquence de l'oscillateur.

Or, l'analyse du cristal à quartz révèle une absence d'oscillation. En cas de défaillance du quartz, c'est l'*Internal Free-Running Phase Locked Loop* (IFR-PLL) qui prend le relais et fonctionne de manière autonome, sans aucune référence externe pour maintenir sa fréquence et sa phase. Ce dispositif utilise l'oscillation d'un circuit analogique RLC¹⁷. Dans le cas de l'ECU, cette fréquence d'oscillation se situe entre 2 et 10 MHz alors que la fréquence du quartz est de 40 MHz. Avec une fréquence de fonctionnement réduite, l'exécution de l'ECU est ralentie et la mise à zéro du *watchdog* n'est plus assurée dans le délai maximum de 50 ms.

En reproduisant le test à une température de 100 °C, ce comportement est observé de manière plus rapide.

¹⁶ Boucle à phase asservie : montage électronique permettant d'asservir la phase ou la fréquence de sortie d'un système, sur la phase où la fréquence du signal d'entrée.

¹⁷ RLC : Résistance, inductance et capacité d'un circuit électronique oscillant.

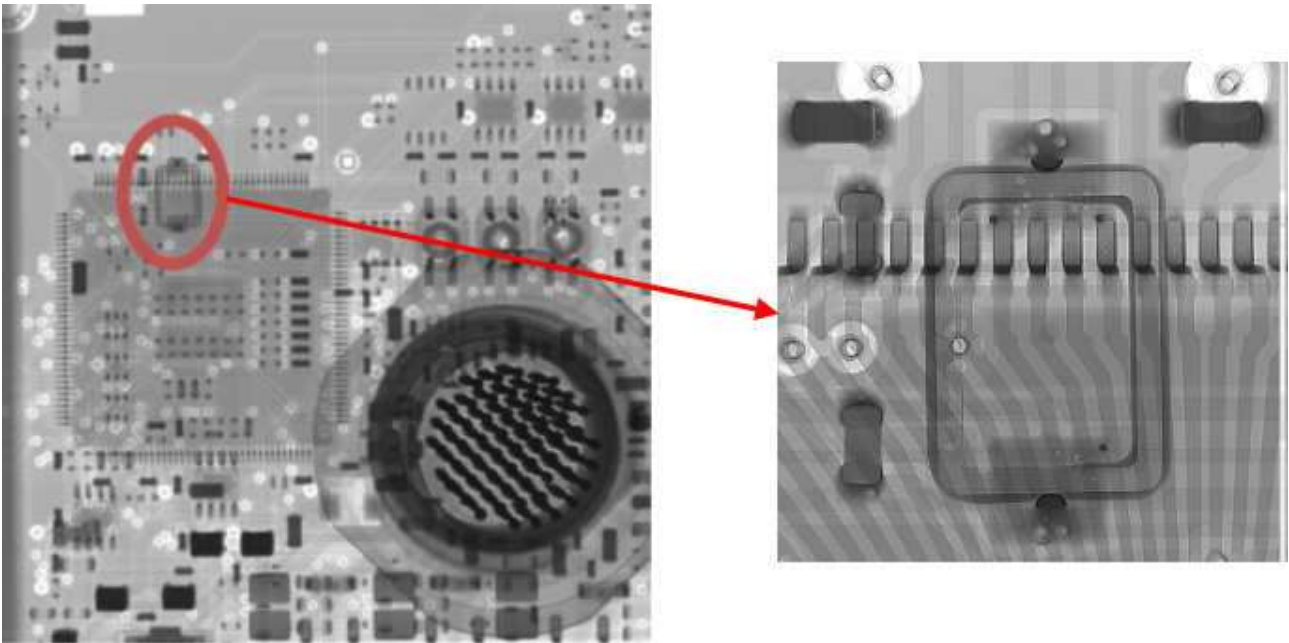


Figure 9 : quartz de l'oscillateur

Le quartz de l'oscillateur ne présente pourtant pas d'anomalie. Tous les quartz des ECU incriminés proviennent cependant d'un même lot. Dans des conditions d'emploi où la température est élevée, certains quartz arrêtent d'osciller sans que les expertises n'en déterminent la raison.

La défaillance de l'oscillateur quartz sous forte contrainte de température conduit à un fonctionnement plus lent de l'ECU ce qui retarde la mise à zéro du *watchdog*. Cela provoque la réinitialisation de l'ECU.

2.2. Séquence de l'évènement

Une première réinitialisation de l'ECU (*ECU reset*) associée à une chute transitoire du régime moteur intervient à 16h16'26'' alors que le drone S100 effectue son retour sur le PHA Tonnerre. Cette panne incite l'équipage à faire revenir le drone le plus rapidement possible et à se préparer à un atterrissage d'urgence.

Le drone reprenant un comportement nominal, l'équipage décide de poursuivre son retour vers le bord.

À 16h20'10'', une série de réinitialisations successives de l'ECU provoque la coupure du moteur avec l'apparition de nombreuses pannes. Le système pilote le drone pour maintenir une autorotation pendant la descente.

À 16h20'19'', le télépilote change le mode de pilotage du drone, passant du mode automatique au mode manuel. Cela est sans effet significatif sur le comportement du drone.

Puis à 16h20'55'', le drone s'abîme en mer et coule.

2.3. Recherche des causes de l'évènement

Les causes de cet évènement sont recherchées dans le domaine des facteurs techniques et dans celui des facteurs organisationnels et humains.

2.3.1. Défaillance du quartz de l'horloge de l'ECU

Les expertises techniques ont démontré que l'arrêt en vol du moteur est probablement dû à une défaillance du quartz de l'horloge de l'ECU.

En effet, la défaillance de l'oscillateur quartz conduit à un fonctionnement plus lent de l'ECU qui ne permet pas de relancer le *watchdog*. Cela réinitialise l'ECU, ce qui correspond aux symptômes identifiés pendant le vol.

L'arrêt du moteur est probablement dû à une défaillance du quartz de l'horloge de l'ECU.

2.3.2. Rôle des condensateurs de l'oscillateur

Les condensateurs de l'horloge secondaire sont de 10 pF¹⁸ et la capacité du quartz est de 12 pF. À partir des données constructeur, l'expertise établit que les condensateurs doivent avoir une valeur théorique de 18 pF. Les condensateurs ont été choisis avec des valeurs de capacité trop basses et l'oscillateur fonctionne avec une fréquence inadaptée.

De manière générale, la dispersion de qualité des composants ne permet pas de maintenir le fonctionnement de l'ECU en cas de défaillance du quartz de l'horloge.

Le choix des condensateurs induit une fréquence inadaptée de l'oscillateur conduisant à des séquences répétées de réinitialisation de l'ECU.

2.3.3. Flottabilité du drone

Le drone S100 n'est pas équipé d'un système de flottabilité. En cas de chute à la mer, la perte du drone et de la charge utile est inévitable.

L'absence de système de flottabilité est un facteur aggravant de l'évènement.

2.4. Eléments non directement liés à l'évènement

Il a été constaté sur la documentation que certaines alarmes de type « *warning* » ne disposent pas d'une checklist pour l'opérateur. Ce manque de procédures adaptées dans le cas de pannes considérées comme majeures favorise le risque d'incident.

L'absence de procédures check-list pour certaines alarmes « *warning* » est préjudiciable à la gestion de ces pannes par les opérateurs.

¹⁸ Pico-farad, unite de capacité électrique.

PAS DE TEXTE

3. CONCLUSION

L'évènement est l'arrêt du moteur en vol d'un drone S100 Schiebel qui s'est abîmé en mer.

#SCF-PP

3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement

Le jeudi 3 novembre 2022, un drone Schiebel S100 du CEPA décolle du porte-hélicoptères amphibie Tonnerre pour un vol de 3 heures d'entraînement permettant de requalifier l'équipage et le système.

Une première alerte *ECU reset* intervient après environ deux heures de vol durant le trajet retour du drone vers le bord.

Le drone reprenant un comportement nominal après une faible chute du régime moteur durant quelques secondes, l'équipage décide de le maintenir sur une trajectoire de retour vers le bâtiment, ce qui est conforme à l'application des consignes des alarmes remontées.

Quelques minutes plus tard, de nombreuses pannes apparaissent. On constate alors une chute brutale du régime moteur en moins de 10 s. L'ECU se réinitialise plusieurs fois par seconde et le moteur qui n'est plus régulé s'éteint.

Le télépilote passe en mode manuel, sans effet sur la trajectoire d'autorotation du drone qui s'abîme en mer dans la minute suivante.

Sans système de flottabilité, le drone sombre et ne peut être récupéré après une recherche en mer utilisant les moyens du PHA Tonnerre.

3.2. Causes de l'évènement

L'arrêt moteur a été provoqué par le dysfonctionnement de l'ECU dans lequel le quartz de l'horloge s'est probablement arrêté d'osciller. Les caractéristiques du circuit d'oscillation secondaire n'ont pas permis d'assurer leur rôle de secours, ce qui a induit la réinitialisation continue de l'ECU toutes les 50 ms. En l'absence d'injection de carburant et d'allumage, le moteur s'est éteint.

Le quartz incriminé provient d'un lot de fabrication qui a été monté sur des ECU de moteurs Schiebel dont certains ont reproduit le même dysfonctionnement. Le problème de qualité de ce lot de quartz n'a cependant pas pu être déterminé.

L'absence d'un système de flottabilité de secours est un facteur aggravant de l'évènement.

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement

4.1.1. Horloge de L'ECU

Suite au dysfonctionnement vraisemblable du quartz de l'ECU, le design du système d'horloge n'a pas permis de maintenir le bon fonctionnement du moteur. Cette panne a causé la perte du drone.

En conséquence le BEA-E recommande :

à l'industriel Schiebel, de renforcer la robustesse de conception de l'ECU vis-à-vis des cas de pannes dont les conséquences mènent à la perte de l'aéronef.

R1 - [M-2022-23-A] Destinataire : Schiebel

4.1.2. Flottabilité

L'absence de système de flottabilité est un facteur aggravant de l'évènement car le drone ne peut pas être récupéré avec sa charge utile en cas de chute à la mer.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à la Marine nationale avec le concours de la direction générale de l'armement d'équiper les S100 en survol maritime du kit de flottabilité.

R2 - [M-2022-23-A] Destinataire : CEMM

4.1.3. Alarmes du manuel « opérateur »

L'analyse de la documentation concernant la panne 730 ECU *RESET* met en évidence que l'urgence d'atterrissage est de type *Land as soon as practical*¹⁹. L'analyse du design démontre que le phénomène peut rapidement dévier vers une succession de *RESET* entraînant alors la coupure du moteur. L'urgence exigée semble ainsi faible au regard des risques encourus suite à l'arrêt du moteur.

à l'industriel Schiebel, de réévaluer le degré d'urgence d'atterrissage associé à l'alarme 'ECU RESET'.

R3 - [M-2022-23-A] Destinataire : Schiebel

4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement

Certaines alarmes de type « *warning* » ne disposent pas de procédure associée dans la check-list. L'absence de procédure est préjudiciable à la gestion de ces pannes par les opérateurs.

à l'industriel Schiebel, d'associer à chaque alarme de type « *warning* », une checklist opérateur.

R4 - [M-2022-23-A] Destinataire : Schiebel

¹⁹ *A return of the UAV as quickly as possible and an emergency landing at the launch / recovery area is recommended – un retour du drone ASAP et un atterrissage d'urgence est recommandé sur la zone de recueil.*

ANNEXE

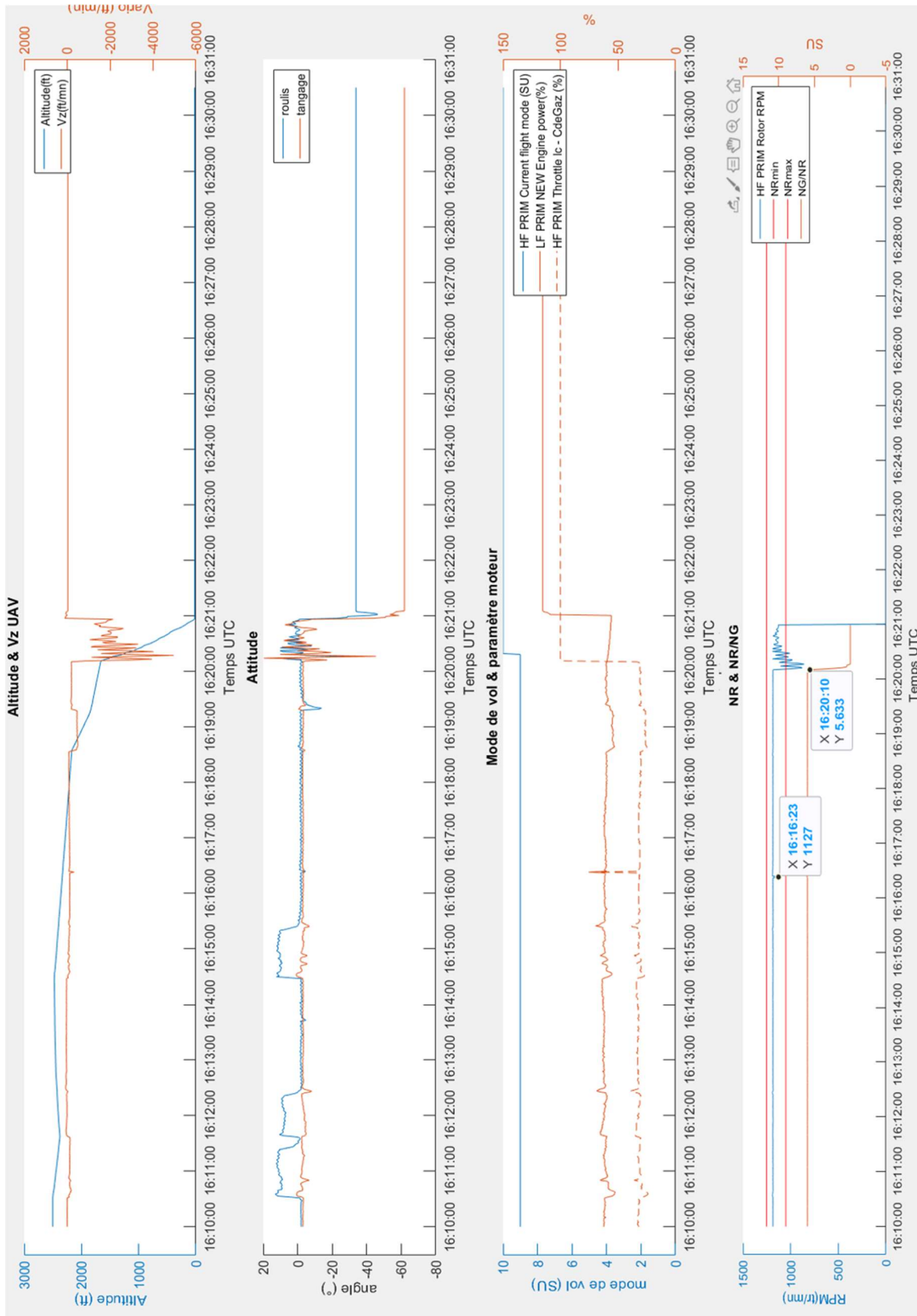


Figure 10 : Courbes des données de vol.