

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

Rapport d'enquête de sécurité



C-2020-10-A

Date de l'évènement	16 septembre 2020
Lieu	Le Puech (Hérault)
Type d'appareil	Eraole
Organisme	Fondation Océan Vital

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 légale française.

CRÉDITS

	M. Éric Dougé	Page de garde
Figures 1 à 3	BEA-É, RESEDA et <i>Google Earth</i>	8 à 10
Figure 4	BEA-É	14
Figure 5	BEA-É, RESEDA et <i>Google Earth</i>	14
Figure 6	Gendarmerie nationale et BEA-É	15
Figure 7	BEA-É	16
Figure 8	DSAC	19
Figure 9	Météo-France et BEA-É	24
Figure 10	BEA-É	25
Figure 11	Laboratoire Océan Vital et BEA-É	34

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS.....	5
1. Renseignements de base	7
1.1. Déroulement du vol.....	7
1.2. Dommages corporels.....	10
1.3. Dommages à l'aéronef	11
1.4. Autres dommages	11
1.5. Renseignements sur le pilote	11
1.6. Renseignements sur l'aéronef.....	11
1.7. Conditions météorologiques	12
1.8. Aides à la navigation	13
1.9. Télécommunications	13
1.10. Renseignements sur l'aéroport	13
1.11. Enregistreurs de bord.....	13
1.12. Constatations sur l'aéronef et sur la zone de l'accident.....	14
1.13. Renseignements médicaux sur le pilote	16
1.14. Incendie.....	16
1.15. Organisation des secours	16
1.16. Essais et recherches	16
1.17. Renseignements sur les organismes.....	17
1.18. Renseignements supplémentaires	17
2. Analyse.....	21
2.1. Expertises techniques.....	21
2.2. Séquence de l'évènement.....	25
2.3. Recherche des causes de l'évènement.....	26
3. Conclusion	37
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	37
3.2. Causes de l'évènement	37
4. Recommandations de sécurité	39
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	39
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement	40

GLOSSAIRE

CODIS	Centre opérationnel départemental d'incendie et de secours
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DGA EP	Direction générale de l'armement - Essais propulseur
DGA TA	Direction générale de l'armement - Techniques aéronautiques
DSAC	Direction de la sécurité de l'aviation civile
ft	<i>Feet</i> → pieds (—1 pied vaut 30,48 cm)
hPa	Hectopascal
kt	<i>Knots</i> → nœuds (1 nœud vaut 1,852 km/h)
kW	Kilowatt
NM	<i>Nautical mile</i> , mille marin – un mille marin vaut 1,852 km
QNH	Pression atmosphérique convertie au niveau moyen de la mer selon les conditions de l'atmosphère standard
RESEDA	Restitution des enregistreurs d'accidents
SIV	Secteur d'information de vol
tr/min	Tours par minute
ULM	Ultra-léger motorisé
VNE	<i>Velocity never exceed</i> , vitesse à ne pas dépasser

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 16 septembre 2020 à 15h07

Lieu de l'évènement : commune du Puech (Hérault)

Organisme : Fondation Océan Vital

Aéronef : Eraole

Nature du vol : vol de liaison

Nombre de personne à bord : 1

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Le 16 septembre 2020, l'avion expérimental hybride électrique Eraole décolle de l'aérodrome de La Roche-sur-Yon Les Ajoncs (Vendée) à 8h55 pour un vol à destination de l'aérodrome d'Aix-les-Milles (Bouches-du-Rhône). Après un peu plus de 5 heures de vol, au sud-ouest de Millau, le pilote subit une perte d'altitude non voulue. Malgré plusieurs tentatives infructueuses d'augmentation de la puissance afin de récupérer de l'altitude, le pilote constate des performances dégradées ne permettant pas la poursuite du vol et prend la décision de se poser sur un terrain de circonstance. Après plusieurs minutes de recherche, le pilote choisit un champ, sur lequel il effectue un atterrissage d'urgence. L'aéronef heurte le sol avec l'aile avant droite, glisse sur quelques mètres et s'arrête contre un talus.

L'avion est fortement endommagé, le pilote est indemne.

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 directeur d'enquête de sécurité adjoint (BEA-É) ;
- un expert technique (BEA-É) ;
- un pilote ayant une expertise sur avion à propulsion électrique.

Autres experts consultés

- direction générale de l'armement – Essais propulseurs (DGA EP)/division évaluation des systèmes aéropropulsifs (DESA) ;
- DGA EP/restitution des enregistreurs d'accidents (RESEDA) ;
- direction générale de l'armement – Techniques aéronautiques (DGA TA)/division d'investigations suite à accident ou incident (MTI) ;
- Météo-France.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : circulation aérienne générale en règles de vol à vue (CAG VFR¹), sans plan de vol

Dernier point de départ : aérodrome de La Roche-sur-Yon Les Ajoncs (LFRI)

Heure de départ : 8h55

Point d'atterrissage prévu : aérodrome d'Aix-les-Milles (LFMA)

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

Depuis plusieurs jours, le pilote souhaite se rendre sur l'aérodrome d'Aix-les-Milles pour y rejoindre les participants à un rallye d'avions électriques. L'arrivée de ce rallye est prévue sur cet aérodrome le 26 septembre. Après une dizaine de jours à attendre des conditions météorologiques propices, les prévisions des 16 et 17 septembre lui semblent favorables pour réaliser ce long vol. Cependant, un épisode de mauvais temps et d'orages de forte intensité est prévu dans les jours suivants. Il décide donc de tenter de réaliser ce vol de mise en place le 16 septembre pour arriver sur place en ayant de la marge par rapport à la date de l'évènement et s'affranchir des conditions météorologiques défavorables. Il prépare sa navigation avec les éléments d'information aéronautique disponibles sur internet et définit un tracé grâce à une application de navigation sur sa tablette électronique. Il prévoit un vol d'environ 8 heures et planifie donc un décollage peu après le lever du soleil, vers 7h30, afin d'être sûr d'arriver à Aix-les Milles avant 18h15 pour que quelqu'un puisse lui ouvrir un hangar où y abriter l'Eraole une fois arrivé.

Le 16 septembre, le pilote part de chez lui vers 6h15 et arrive un peu avant 7 heures sur l'aérodrome de La Roche-sur-Yon Les Ajoncs pour préparer son aéronef pour le vol. Il consulte la mise à jour des prévisions météorologiques. La présence de brume sur le terrain l'empêche de partir en vol à l'heure prévue et il attend que celle-ci se lève vers 8h30.

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

Le pilote met l'Eraole sous tension vers 8h30, règle son calage altimétrique au QNH² de 1 020 hPa puis commence le roulage à 8h47. Il décolle à 8h55 en piste 10, puis fait un léger virage à droite pour s'orienter vers le sud-est en ligne directe vers le premier point tournant de sa navigation près d'Aurillac. Il monte initialement à 2 700 ft environ pour rester sous la zone d'accès restreint R49, dont le plancher est à 3 000 ft. Vers 10 heures, le pilote contacte le contrôleur du secteur d'information de vol (SIV) de Limoges pour avoir une actualisation des données météorologiques sur le sud du massif central. À 10h41 le pilote change le calage altimétrique pour le régler à 1 022 hPa. À 11h17 le pilote entame une succession de montées lentes (taux de montée de l'ordre de 100 ft par minute) et de paliers de stabilisation pour rejoindre son altitude prévue pour la croisière de 5 000 ft, altitude que l'aéronef atteint vers 13 heures. À 13h21, alors qu'il avait prévu initialement de contourner l'aéroport de Rodez par le nord, le pilote dévie sa route vers le sud pour éviter un avion au départ de cet aéroport. Il choisit ensuite de maintenir cette route pour éviter les cumulus bourgeonnant sur le massif des Cévennes, qui sont sur le trajet envisagé initialement.

Depuis son départ, le pilote est en liaison radio successivement avec les SIV de Nantes, Poitiers, Limoges et Clermont-Ferrand.

¹ VFR : *visual flight rules*, règles de vol à vue.

² QNH : pression atmosphérique ramenée au niveau moyen de la mer selon les caractéristiques de l'atmosphère standard, utilisée par les aéronefs pour caler leurs altimètres afin que ceux-ci affichent l'altitude par rapport au niveau moyen de la mer.

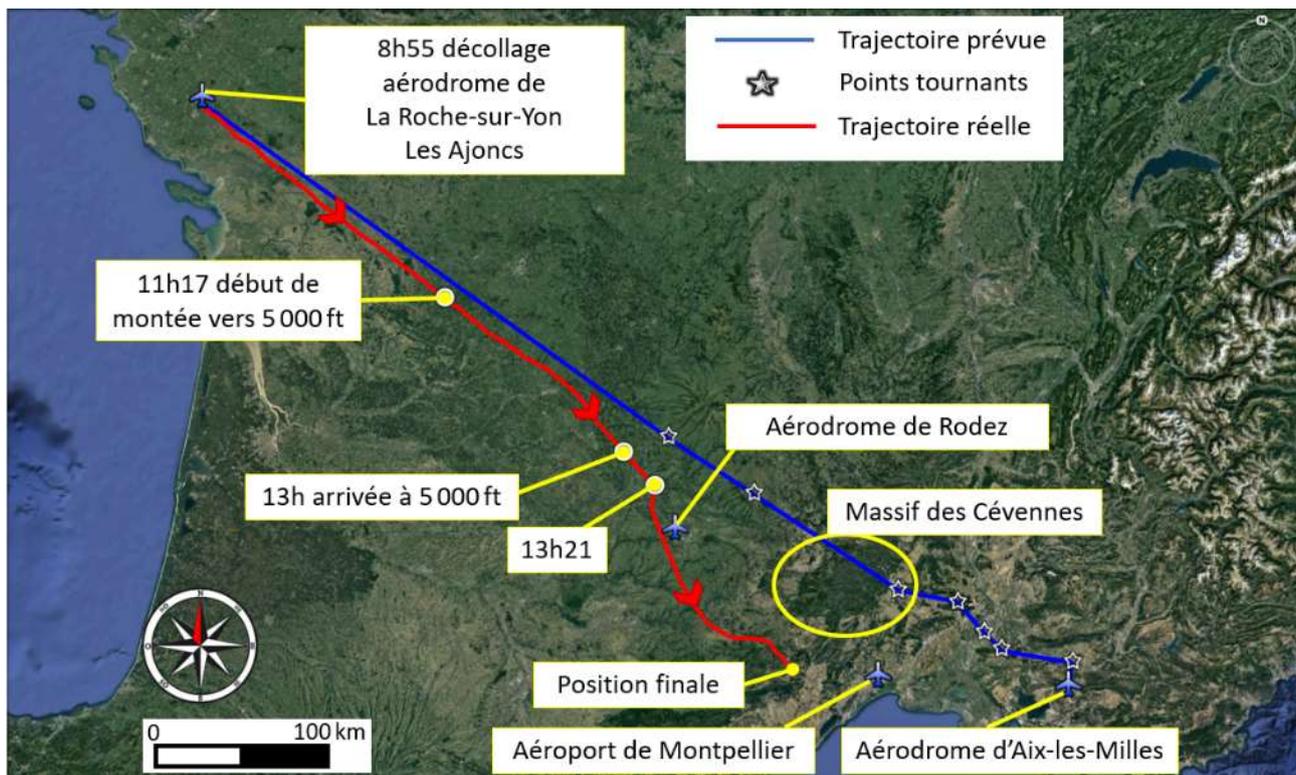


Figure 1 : trajectoires prévue et réelle de l’Eraole

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

À 14h02, l’Eraole monte de 400 ft en une minute, se stabilise une minute environ à un peu plus de 5 400 ft, puis entame une longue descente régulière à un taux de descente de 100 ft par minute environ.

À 14h14, le pilote contacte par radio le SIV de Montpellier (Montpellier info), il s’annonce comme volant seul à bord d’un aéronef prototype électrique, et précise son point de départ, sa destination, sa position approximative ; il indique qu’il se dirige au sud-sud-est pour éviter des cumulus bourgeonnants. Le contrôleur lui assigne un code transpondeur, indique un QNH de 1 017 hPa et mentionne l’activation d’une zone dangereuse. Le pilote collationne le code transpondeur et annonce chercher la zone en question. Le contrôleur lui indique la position de cette dernière. Le pilote indique qu’il dévie vers le sud pour éviter les cumulus et qu’il va éviter la zone.

Quelques minutes plus tard, Montpellier info recontacte l’Eraole pour avoir des précisions sur l’aspect électrique de l’aéronef. Le pilote répond être à bord d’un « avion prototype électrique sous laissez-passer ».

À 14h24, le contrôleur demande au pilote de l’Eraole quelles sont ses intentions pour traverser le secteur de Montpellier. Le pilote, alors à 3 400 ft, indique être confronté à de forts rabattants lui ayant fait perdre 1 300 ft d’altitude en 10 minutes. Il précise qu’il ne pense pas avoir assez de puissance pour passer les reliefs au nord de Montpellier et qu’il prévoit donc de passer par le sud et de rejoindre la côte. Il mentionne être confronté à des turbulences, « se bagarrer » avec des rabattants et avoir besoin d’ascendances pour franchir les derniers reliefs avant la plaine de la région ouest de Montpellier.

Pendant toute cette phase de descente, le pilote cherche à gagner à nouveau de l’altitude en commandant la pleine puissance aux moteurs, mais cela n’est pas suivi d’effet. Le pilote surveille les paramètres de la chaîne de propulsion et ne détecte aucun problème à ce niveau. Il pense que la perte d’altitude est causée par l’aérologie.

L’aéronef arrête vers 14h35 la descente entamée à 14h03 et stabilise son altitude à environ 2 400 ft. Le pilote contacte le SIV de Montpellier à 14h38 pour indiquer qu’il risque de pénétrer la zone mentionnée plus tôt, car il se « bagarre » toujours contre les rabattants et est presque au même niveau que le sommet des crêtes des reliefs environnants. Il mentionne ne pas être à l’aise et suivre les vallées. Le contrôleur lui demande s’il envisage un déroutement et lui indique la position relative des terrains de Millau (15 milles marins (NM) au nord-est) et de Saint-Affrique (plein ouest).

Le pilote annonce avoir bien connaissance de ces terrains mais être dans une situation délicate où il progresse « vallée par vallée » en fonction de l'aérogologie. Suite à cet échange, un autre aéronef à 17 NM au sud-est de l'Eraole, près de Bédarieux, indique que la météo est bonne à son emplacement et qu'il n'y a pas de turbulence. Le contrôleur retransmet cette information à l'Eraole.

À 14h44 le contrôleur informe le pilote de l'Eraole de la désactivation d'une zone proche de sa position. Ce dernier mentionne deux terrains ULM³ devant lui et maintenir son altitude proche de 3 000 ft en suivant les vallées. Il indique ne pas pouvoir revenir sur Millau par manque d'altitude.

À partir de 14h46 l'Eraole reprend de l'altitude à un taux d'environ 100 ft par minute pendant une dizaine de minutes.

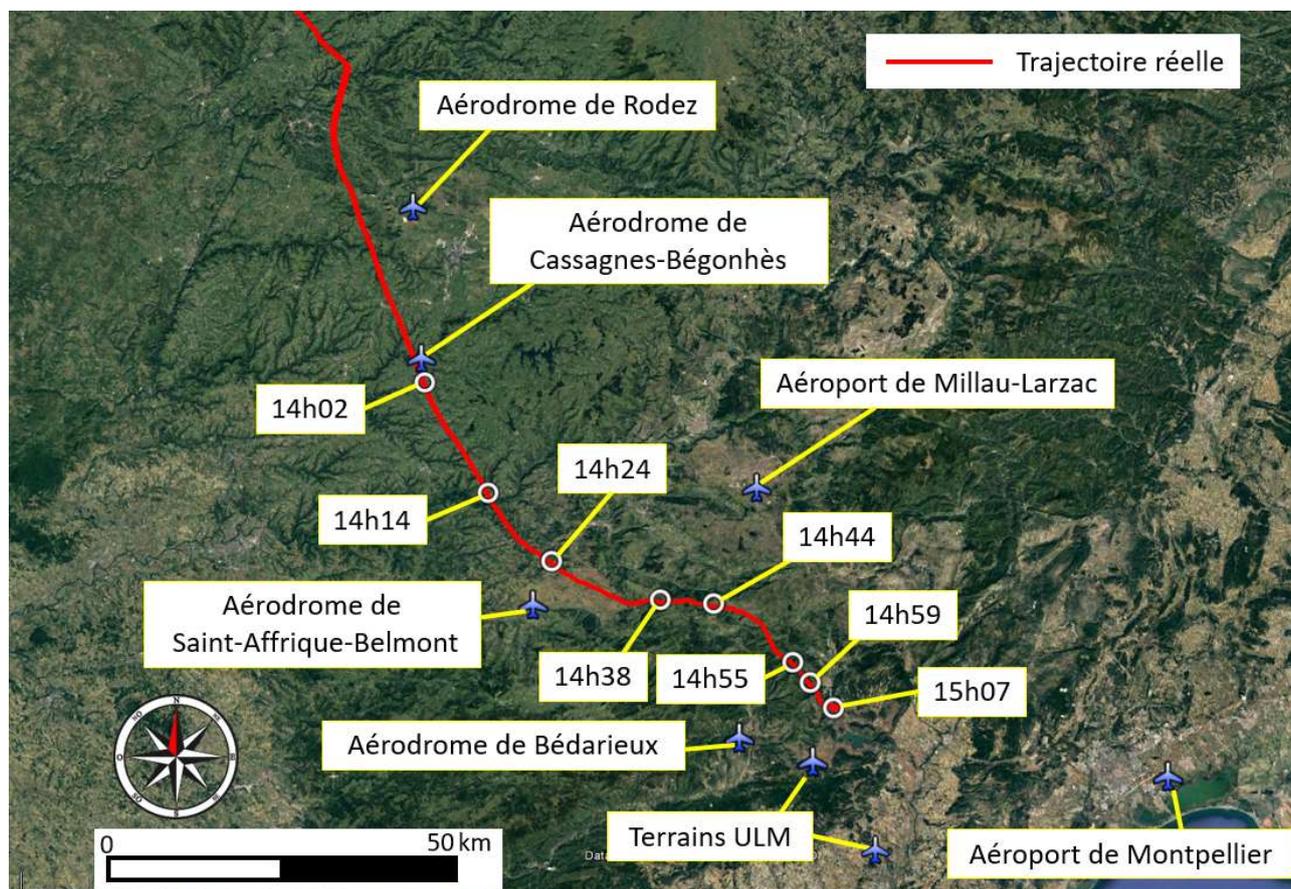


Figure 2 : fin de la trajectoire de l'Eraole

À 14h55 le contrôleur demande au pilote de confirmer qu'il est seul à bord, ce dernier le confirme. Le pilote constate que la génératrice, fournissant la majeure partie de l'énergie électrique nécessaire à la propulsion, consomme de l'énergie au lieu d'en produire. Il tente sans succès plusieurs relances de celle-ci, puis la coupe. Vers 14h56 l'Eraole entame une descente continue avec un taux de descente de 300 ft par minute environ. À 14h57 le contrôleur demande au pilote de confirmer qu'il veut rejoindre la côte pour survoler une zone de plus basse altitude. Le pilote signale alors être confronté à un nouveau problème avec son « générateur » et être en « mode très dégradé », en descente en vol plané et espérer atteindre un terrain ULM plus loin au sud mais risquant plus probablement de devoir se poser dans un champ dans la vallée qu'il survole. Il précise ne pouvoir maintenir le vol que 5 à 10 minutes. Le contrôleur demande au pilote si l'aérodrome de Bédarieux lui semble atteignable, le pilote répond que c'est une autre vallée et qu'il est en descente. Le contrôleur lui demande s'il a un terrain qu'il peut atteindre. Le pilote mentionne un terrain ULM au sud de sa position mais précise qu'il ne pense pas pouvoir l'atteindre.

À 14h59, le contrôleur donne le numéro de téléphone direct de la tour de contrôle pour que le pilote appelle une fois posé. C'est le dernier échange à la radio avec l'Eraole.

³ ULM : ultra-léger motorisé, désigne un aéronef de moins de 750 kilogrammes (pour un avion) ou 600 kilogrammes (pour un hélicoptère).

Dans les minutes qui suivent, le pilote continue à suivre la vallée. Il choisit un champ entouré de vignes au fond de celle-ci pour y effectuer un atterrissage d'urgence et évolue autour pour perdre de la hauteur en s'en approchant. Lors de l'approche finale sur ce champ, en évolution à très basse hauteur, il se retrouve face à une ligne électrique haute tension qui traverse la vallée à sa hauteur. Le pilote fait un virage serré pour ne pas trop s'en approcher. Il arrive alors trop haut pour se poser dans le champ choisi et fait un tour complet autour de celui-ci en virant sur la droite à forte inclinaison. Dans les derniers mètres de hauteur, il arrive sur le champ, désaxé et toujours en virage à droite. L'aile avant droite de l'Eraole heurte alors le sol à 15h07'58'', l'aéronef fait demi-tour puis s'arrête en marche arrière contre un talus en bord du champ une seconde après l'impact initial. Le pilote, indemne, coupe ensuite tous les circuits et sort de l'aéronef, fortement endommagé.

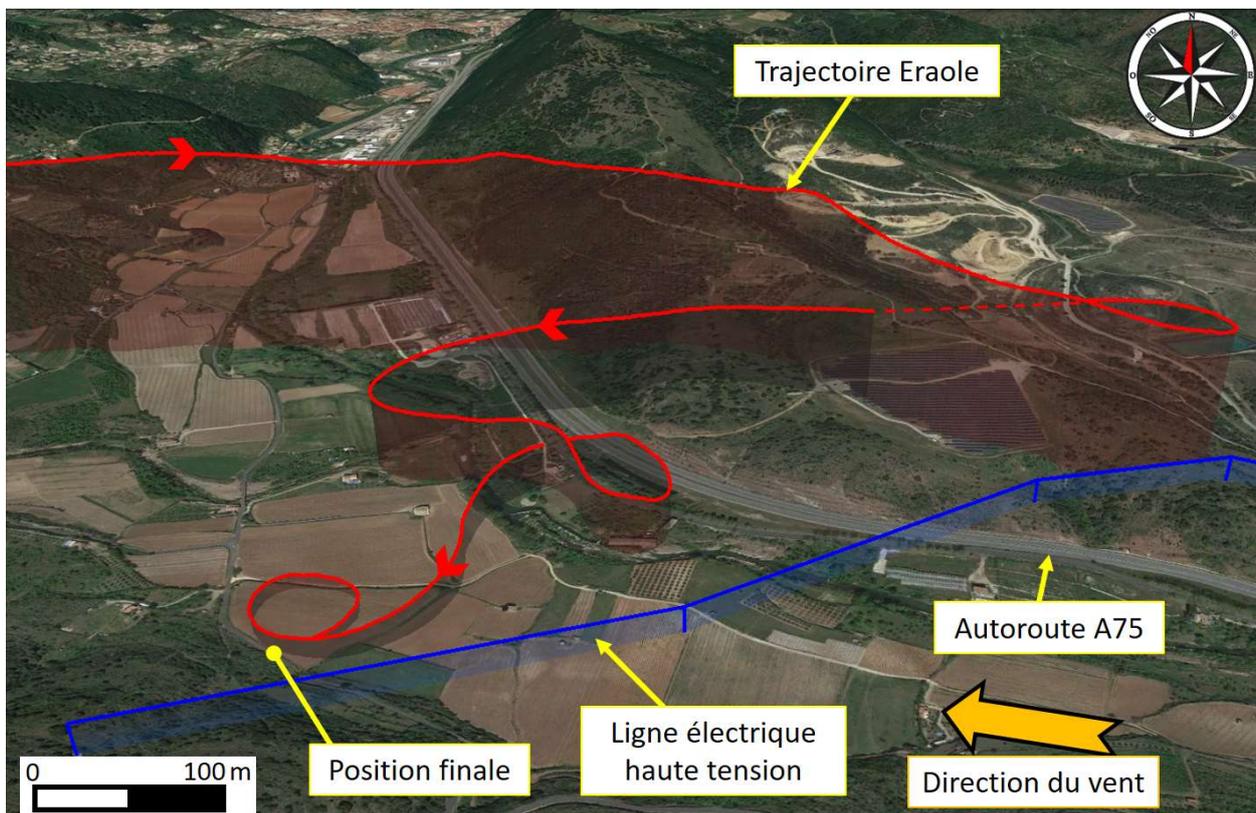


Figure 3 : évolutions finales de l'Eraole

1.1.3. Localisation

– Lieu :

- pays : France
- département : Hérault
- commune : Le Puech
- coordonnées géographiques : N 43°41'46"/E 003°19'41"
- altitude du lieu de l'évènement : 140 mètres, au sol

– Moment : jour

– Aéroport le plus proche au début de la perte d'altitude : aéroport de Cassagnes Bégonhès (LFIG), à 5 kilomètres au nord-ouest

– Aéroport le plus proche du lieu de l'atterrissage d'urgence : aéroport de Bédarieux la Tour sur Orb (LFNX), à 16 kilomètres au sud-ouest

1.2. Dommages corporels

Le pilote est indemne.

1.3. Dommages à l'aéronef

L'aéronef est fortement endommagé.

1.4. Autres dommages

Les impacts de l'aile puis des trains d'atterrissage et du fuselage ont creusé de petites tranchées peu profondes dans le sol.

1.5. Renseignements sur le pilote

- Âge : 52 ans
- Employeur : laboratoire Océan Vital
- Fonction : directeur de la recherche, pilote
- Qualification : licence de pilote privé avion délivrée le 16 décembre 2014 et prorogée le 11 décembre 2018
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont Eraole	sur tout type	dont Eraole	sur tout type	dont Eraole
Total (h)	368	173	51	18	5	37 minutes

- Date du précédent vol sur l'aéronef : 8 septembre 2020

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : fondation Océan Vital
- Aérodrome de stationnement : La Roche-sur-Yon Les Ajoncs (LFRI)
- Type d'aéronef :

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis dernier entretien ⁴
Cellule	Eraole	01	177	-
Hélice	DUC hélices modèle M-STD	7892/7894	177	-
Moteur électrique 1	EMRAX 207	-	177	22
Moteur électrique 2	EMRAX 207	-	177	22
Moteur thermique	Mercedes-Benz ZGS-003	-	177	22
Génératrice électrique	EMRAX 228	-	177	22

1.6.1. Maintenance

En tant qu'aéronef prototype, l'Eraole n'a pas de plan de maintenance certifié. La maintenance est réalisée par le pilote suivant un plan de maintenance *ad hoc*. Le laboratoire Océan Vital prévoyait qu'un plan de maintenance soit formalisé une fois que l'aéronef aurait atteint 300 heures de vol et que la fiabilité de ses différents composants serait mieux connue.

La dernière vidange d'huile du moteur thermique a été réalisée le 22 février 2020 et a inclus un remplacement des filtres. La dernière vidange des circuits de refroidissement a été réalisée le même jour.

⁴ Vidanges réalisées le 22 février 2020.

1.6.2. Performances

Le jour de l'évènement, la puissance apportée par les panneaux solaires est de l'ordre de 4 kW avec l'ensoleillement du moment, pour une puissance maximale des panneaux de 5,5 kW.

La quantité de carburant embarquée au décollage assure une autonomie théorique d'au moins 15 heures de vol, hors apport de l'énergie solaire. La consommation nominale par temps calme et ensoleillé est de 4 à 5 litres par heure. La consommation moyenne constatée pendant le vol de l'évènement est de 6,4 litres par heure.

1.6.3. Masse et centrage

Le centrage est dans les limites autorisées pendant tout le vol.

Masse au décollage : 784 kilogrammes

Masse au moment de l'atterrissage d'urgence : 750 kilogrammes

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : gasoil B7
- Quantité de carburant au décollage : 95 litres
- Quantité de carburant restant au moment de l'atterrissage d'urgence : 55 litres

Le moteur thermique peut être dopé avec l'hydrogène produit par une centrale alimentée en eau. Le réservoir associé était vide pour le vol de l'évènement.

1.6.5. Autres fluides

Le moteur thermique utilise de l'huile C3+5W-30.

Les circuits électriques de puissance et le moteur thermique sont refroidis par un liquide de refroidissement type Gold-Un.

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Les prévisions météorologiques émises pour la journée du 16 septembre 2020 sont les suivantes :

- pour le centre de la France : couche nuageuse fragmentée entre 9 000 et 11 000 ft se déplaçant vers le sud-est et avec apparition de cumulonimbus⁵ isolés à partir de 14h, visibilité supérieure à 8 kilomètres, vent du nord ou nord-ouest pour 5 à 10 kt ;
- pour Rodez :
 - prévision diffusée à 7h et valable à partir de 8h : absence de nuage en dessous de 5 000 ft, visibilité supérieure à 10 kilomètres, vent faible évoluant vers un vent de 6 kt du nord-ouest entre 12h et 14h ;
 - actualisation à 13h : absence de nuage en dessous de 5 000 ft, visibilité supérieure à 10 kilomètres, vent de 5 kt du nord-ouest avec temporairement des cumulus bourgeonnants à 6 000 ft entre 15h et 20h ;
- pour Montpellier :
 - prévision diffusée à 10h et valable à partir de 11h : vent faible, visibilité de 4 800 mètres avec de la brume et des nuages épars à 400 ft, évoluant entre 11h et 12h vers une absence de nuage en dessous de 5 000 ft avec visibilité supérieure à 10 kilomètres et temporairement entre 13h et 20h un vent de 10 kt venant du sud.

La carte TEMSI (temps significatif) donnant les prévisions pour 14h indique la présence de cumulonimbus isolés sur une large zone incluant la majeure partie du massif central et de l'est de la France. La vitesse du vent prévu sur le parcours est inférieure à 15 kt.

⁵ Cumulonimbus : nuages d'orage impliquant des averses et des turbulences modérées à fortes dans un rayon de plusieurs kilomètres jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres aux alentours.

1.7.2. Observations

Les données de Météo-France pour la région traversée par l'Eraole à la fin de son vol indiquent un bon ensoleillement avec l'absence de nuage en basse altitude, sauf sur le massif des Cévennes avec un bourgeonnement de cumulus à partir de 12h, ainsi qu'au sud-ouest du Puech à partir de 14h ; un vent à 3 300 ft stable du nord entre 10 et 15 kt, qui s'atténue vers 5 kt et devient de direction variable vers 14h.

Les observations pour l'aéroport de Rodez vers 13h40 indiquent un vent au sol de 7 kt du nord-ouest, variable entre l'ouest et le nord, l'absence de nuage en dessous de 5 000 ft et une visibilité supérieure à 10 kilomètres, une température au sol de 28 °C, un QNH de 1 021 hPa et la présence passagère de cumulus bourgeonnants épars à 6 000 ft.

Le vent dans la zone proche de la commune du Puech est de direction variable pour 5 à 10 kt. La station sol la plus proche du lieu d'atterrissage, à 3 kilomètres au nord-est, mesure à 15h un vent au sol de 8 kt avec des rafales à 14 kt venant du sud-est et une température au sol de 33°C. Des nuages s'amoncellent dans la zone et donnent lieu à des averses orageuses ; l'une d'elles passe sur le lieu de l'accident quelques dizaines de minutes après celui-ci.

1.8. Aides à la navigation

L'instrumentation avionique principale de l'Eraole inclut un système de navigation par satellite qui permet d'afficher les coordonnées de l'aéronef.

Le pilote a utilisé, en complément de ses cartes papier, une application de navigation sur sa tablette électronique personnelle, elle-même munie de capacités de positionnement par satellite. Cette application permet de visualiser la position de tous les aérodromes et terrains ULM, ainsi que leurs fiches d'approche à vue.

1.9. Télécommunications

L'Eraole est muni d'une radio VHF⁶ pour communiquer avec les services du contrôle aérien. Pendant toute la fin du vol à partir de 14h14, le pilote est en contact avec le SIV de Montpellier grâce à ce poste radio.

L'aéronef est aussi muni d'un transpondeur⁷ avec report d'altitude permettant aux contrôleurs aériens de connaître sa position et son altitude grâce aux radars.

1.10. Renseignements sur l'aéroport

L'aéroport de Montpellier est doté d'un service de contrôle aérien qui assure la gestion des aéronefs dans les zones d'approche et d'aéroport associées, ainsi que l'information de vol pour les aéronefs qui contactent leur SIV.

En cas de faible trafic aérien, un seul contrôleur gère à la fois la fréquence d'approche et le SIV, ces fréquences étant regroupées par relais radio, ce qui était le cas le jour de l'évènement. Les fréquences ont été dégroupées avec un contrôleur alors dédié à la fréquence du SIV à partir de 14h42 pour gérer l'Eraole, seul sur la fréquence de Montpellier Info.

1.11. Enregistreurs de bord

L'instrumentation avionique principale de l'Eraole comporte une fonction d'enregistrement des données de vol. Les échanges vocaux ne sont pas enregistrés à bord de l'Eraole. En revanche, les communications radio sont enregistrées par le service de contrôle et ont pu être récupérées.

L'ensemble des données du vol de l'évènement a été extrait et récupéré pour analyse.

⁶ VHF : *very high frequency*, très haute fréquence.

⁷ Un transpondeur est un dispositif électronique embarqué qui émet une réponse quand il reçoit une interrogation radio, permettant ainsi de localiser les aéronefs qui en sont équipés.

1.12. Constatations sur la zone de l'accident et sur l'aéronef

1.12.1. Examen de la zone d'impact

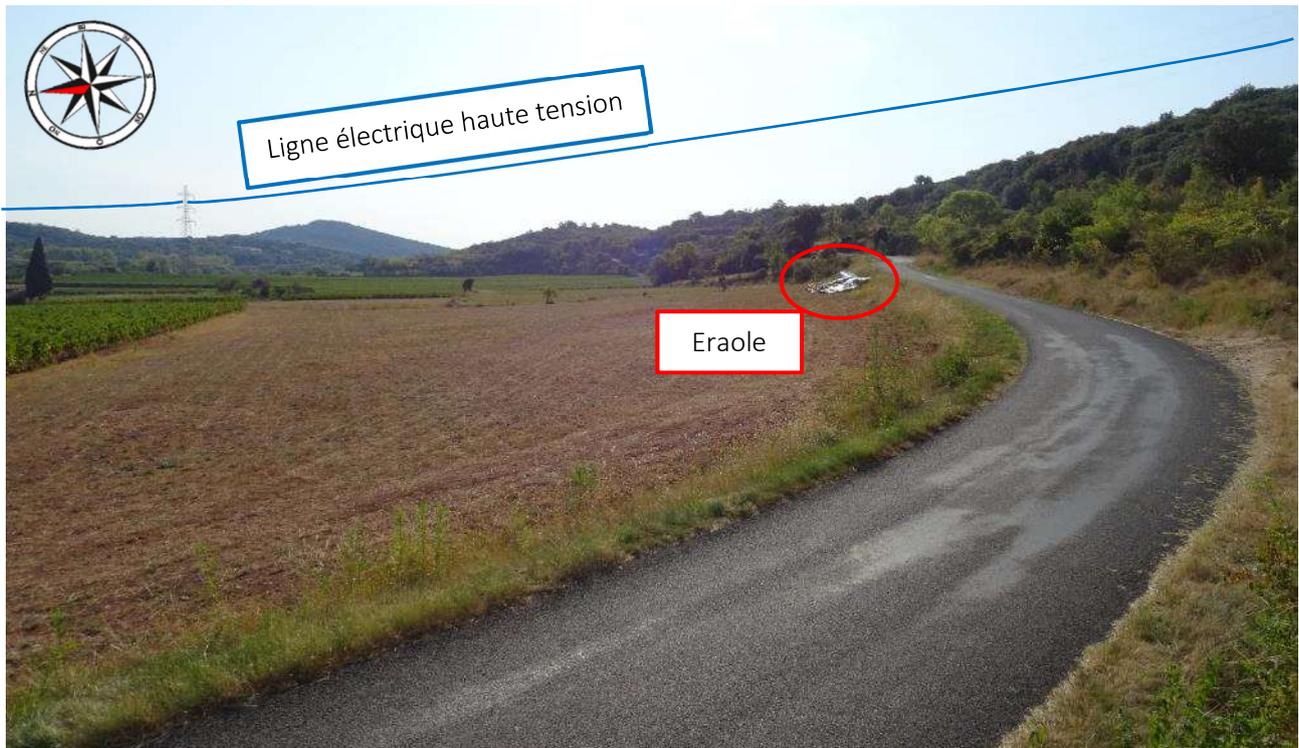


Figure 4 : vue du champ en regardant vers l'est

L'Eraole repose contre un talus sur le côté le plus haut d'un champ en dévers d'environ 15°. Ce champ triangulaire, au fond d'une petite vallée, est bordé au sud par une route goudronnée, au nord par des vignes et à l'est par un fossé qui le sépare du champ voisin. Une ligne électrique haute tension traverse la vallée 150 mètres à l'est du champ.

Le champ présente une première trace d'impact 21 mètres avant la position finale de l'aéronef, puis quelques mètres plus loin plusieurs traînées allant jusqu'à l'aéronef.

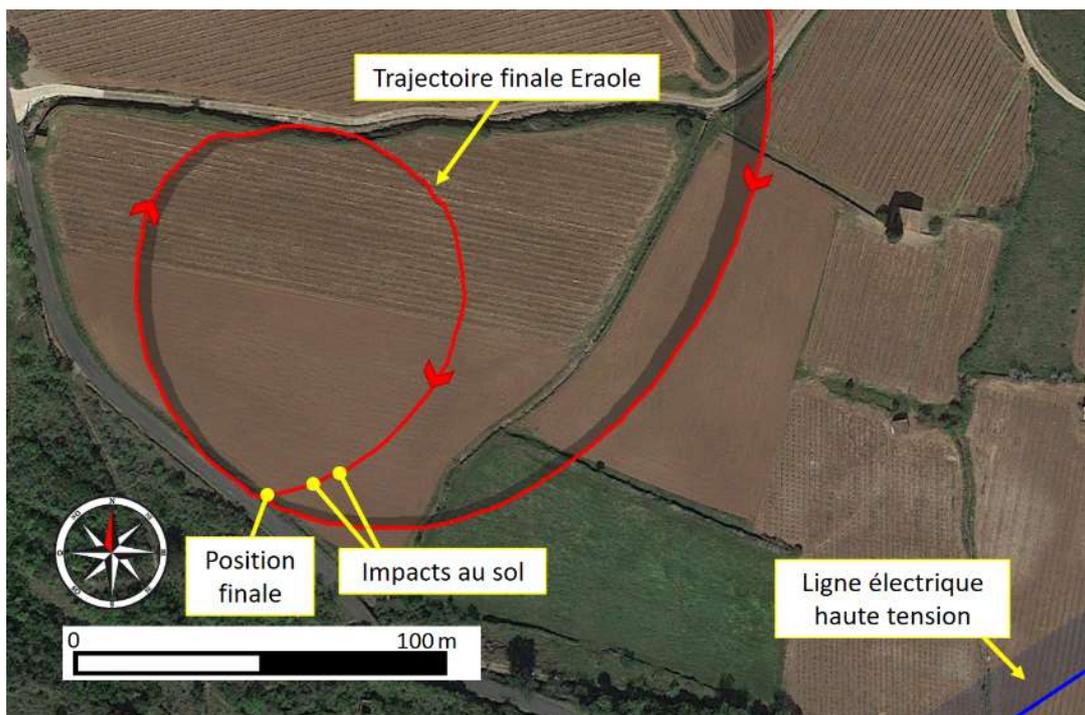


Figure 5 : vue à la verticale du champ

1.12.2. Examen de l'aéronef

L'aéronef est posé sur le ventre et l'aile avant. L'arrière de l'aéronef est contre le talus bordant le champ, avec la queue brisée et repliée le long du fuselage. Les trois trains d'atterrissage sont pliés ou rompus vers la droite du fuselage : la jambe de train principal gauche est sous le fuselage, la droite sous l'aile droite et la roulette de queue est tordue vers la droite. Les deux jambes du train d'atterrissage principal sont arrachées du fuselage et repliées sous celui-ci et l'aile avant-droite. La roulette de queue est tordue vers la droite. L'aile avant-droite est brisée net en son milieu et s'est retournée ; l'aileron s'est séparé de l'aile. Les saumons des deux ailes droites, dont l'un est brisé en deux, et la barre de structure les reliant sont arrachés des ailes. La barre de structure reliant les deux ailes gauches est déconnectée de l'aile arrière-gauche. Les pales de l'hélice sont brisées à une trentaine de centimètres du moyeu, les extrémités des pales étant disloquées. La ferrure de fixation de la verrière est arrachée et cette dernière s'est désolidarisée du fuselage.

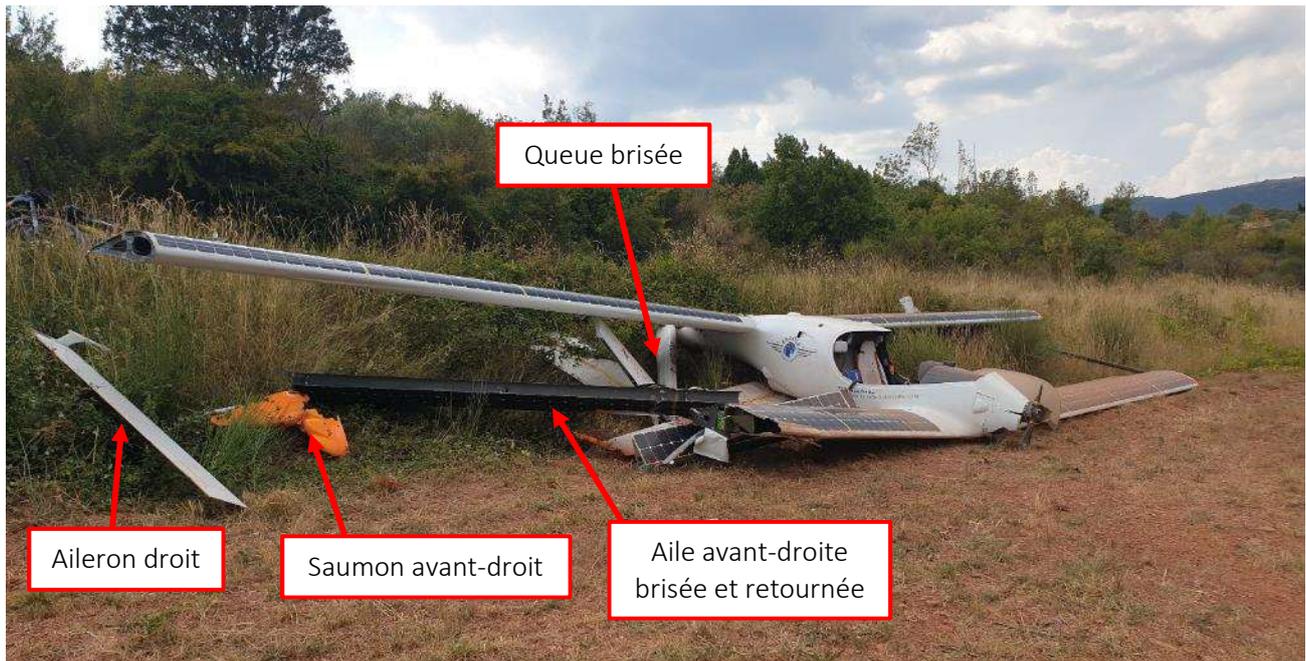


Figure 6 : Ercabec après l'atterrissage d'urgence

Aucune fuite de carburant n'est visible et les réservoirs contiennent encore 55 litres de carburant, répartis ainsi : 45 litres dans le réservoir avant et 10 litres dans le réservoir arrière. La durite d'admission du moteur thermique est pleine de carburant. Une fuite assez importante d'huile est constatée sous le moteur et le radiateur d'huile à l'intérieur du fuselage.

Malgré les ruptures de la structure, les différents morceaux sont encore solidaires grâce aux câbles des commandes de vol, intègres, et celles-ci sont encore fonctionnelles. L'aérofrein est en position rentré. Le démontage de l'avion permet de constater que les durites du moteur thermique et les câblages électriques sont correctement reliés, à part une sonde de température du moteur thermique qui est arrachée.

Une des cellules du bloc de batterie situé dans l'aile avant-droite est séparée des autres au niveau de la rupture de cette aile.

La barre de liaison entre les deux ailes droites est retrouvée dans un arbre de l'autre côté de la route qui longe le champ.

Les interrupteurs généraux de coupure des circuits électriques sont sur la position « arrêt ». Tous les autres interrupteurs du poste de pilotage ont été mis sur arrêt et les disjoncteurs désenclenchés par les secours en suivant les consignes du pilote. La manette des gaz est en position plein réduit.

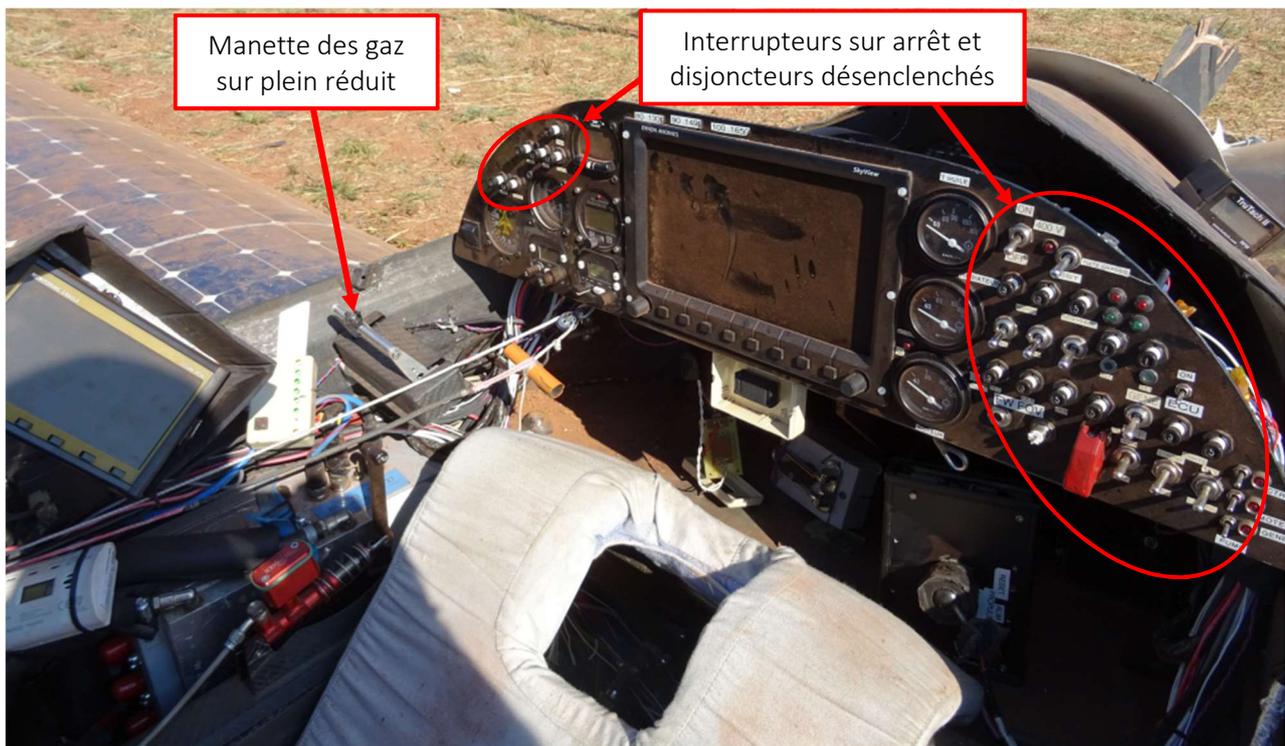


Figure 7 : vue du cockpit après l'atterrissage d'urgence et l'intervention des secours

1.13. Renseignements médicaux sur le pilote

- Dernier examen médical :
 - type : expertise de classe 2 du 9 avril 2020
 - résultat : apte
- Examens biologiques : effectués
- Blessures : aucune

1.14. Incendie

Sans objet.

1.15. Organisation des secours

Le pilote sort par ses propres moyens de l'aéronef, avec l'aide de quelques témoins arrivés après l'accident. Il appelle ensuite à 15h12 la tour de contrôle de Montpellier au numéro qui lui a été fourni avant l'atterrissage. Il dit être sauf mais commotionné et indique sa position grâce aux coordonnées géographiques affichées par sa tablette électronique. Le contrôleur transmet ces informations au centre opérationnel départemental d'incendie et de secours (CODIS) du département de l'Hérault, qui déclenche l'intervention des pompiers de la commune de Lodève, voisine du Puech où a eu lieu l'accident. Ces derniers arrivent quelques minutes plus tard et prennent en charge le pilote pour des examens à l'hôpital de Montpellier, après s'être assurés auprès de ce dernier de la sécurisation de l'aéronef.

1.16. Essais et recherches

L'expertise du générateur (moteur thermique et génératrice) et l'analyse des fluides prélevés sont confiées à DGA EP.

L'expertise des batteries, des circuits électriques et des commandes associées est confiée à DGA TA.

L'exploitation des données enregistrées par le système avionique et des communications radios est réalisée par RESEDA.

Les conditions météorologiques ont été analysées par Météo-France.

L'analyse des facteurs organisationnels et humains est réalisée par le BEA-É.

1.17. Renseignements sur les organismes

1.17.1. Fondation Océan Vital

La fondation Océan Vital, créée en 2007 et dont le pilote est un des membres fondateurs, est une fondation d'entreprise intervenant dans les énergies renouvelables et l'habitat bioclimatique. Cette fondation possède son propre laboratoire situé à Olonnes-sur-Mer en Vendée. Ce laboratoire est équipé pour la fabrication de pièces en matériaux composites de très grande taille et a été utilisé pour la fabrication de la structure de l'Eraole. Les panneaux solaires qui équipent cet aéronef ont aussi été conçus, brevetés et fabriqués dans ce laboratoire. La fondation porte le projet Eraole depuis 2012 et en a assuré la conception, la fabrication, la mise au point et les vols, dont le premier a eu lieu fin 2016.

Au moment de l'évènement, la fondation est en cours de dissolution et le pilote recherche activement des moyens de financement pour continuer son projet. Le laboratoire Océan Vital subsiste.

1.17.2. Secteur d'information de vol

Les SIV sont un ensemble de 24 zones permettant de couvrir l'espace aérien inférieur (niveau de vol⁸ inférieur au niveau 195) de la France métropolitaine. Dans ces secteurs, les organismes de contrôle des approches des grands aéroports assurent les services d'information de vol et d'alerte au profit des aéronefs qui les contactent. Ce contact radio est facultatif pour les aéronefs évoluant selon les règles du vol à vue. Les SIV peuvent notamment fournir des informations météorologiques et avertir de la proximité d'autres aéronefs ou de l'activation de zones réglementées ou dangereuses. En cas d'urgence, le service d'alerte permet d'aider les pilotes en situation de détresse ou d'alerter les secours.

1.17.3. Direction de la sécurité de l'aviation civile

La direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC) est un service à compétence nationale de la direction générale de l'aviation civile (DGAC), qui dépend elle-même du ministère de la transition écologique. La DSAC est l'autorité française compétente en matière de surveillance et de certification dans le domaine de l'aviation civile. C'est la DSAC qui délivre les laissez-passer provisoires pour les aéronefs expérimentaux qui ne sont pas du ressort de l'agence de l'union européenne pour la sécurité aérienne (AESA).

1.18. Renseignements supplémentaires

1.18.1. Conception de l'Eraole

1.18.1.1. Généralités

L'Eraole est un avion expérimental hybride électrique, avec une configuration biplan à ailes décalées. L'aile basse est sous et à l'avant du fuselage, l'aile haute dessus et au milieu du fuselage entre le poste de pilotage et la queue. Le train d'atterrissage est une configuration classique non rétractable, avec les trains principaux de chaque côté du fuselage au niveau de la jonction avec l'aile avant et une roulette de queue reliée en rotation à la gouverne de direction. Toute la surface supérieure des ailes est recouverte de panneaux solaires.

Conçu pour les vols d'endurance (le but final étant une traversée de la mer Méditerranée et de l'océan Atlantique), il vole lentement, avec de faibles taux de montée (motorisation faible pour une meilleure autonomie) et de descente. Un petit aérofrein est installé sur le dessus du fuselage pour avoir un meilleur taux de descente à cause d'une vitesse maximale autorisée (VNE, *velocity never exceed*) très faible (limitation de tenue structurale pour limiter la masse), pénalisante pour la descente. L'aéronef n'est pas doté de système de pilotage automatique. Toutefois, la commande de tangage est munie d'un système de compensateur à réglage électrique pour soulager les efforts à fournir par le pilote pour contrôler l'aéronef sur cet axe.

1.18.1.2. Chaîne de propulsion

La propulsion de l'Eraole est assurée par une hélice bipale à pas fixe couplée à deux moteurs électriques mis en série. L'énergie électrique provient de trois sources : des batteries, des panneaux solaires et un moteur thermique couplé à une génératrice.

⁸ Un niveau de vol est en aéronautique une altitude exprimée en centaines de pieds au-dessus de la surface isobare 1 013,25 hPa.

Ce dernier a une puissance suffisante pour maintenir le palier et recharger les batteries, qui elles-mêmes fournissent l'appoint d'énergie nécessaire pour assurer la montée. L'apport d'énergie des panneaux solaires permet de diminuer la puissance que doit fournir le moteur thermique et d'augmenter l'autonomie de l'aéronef. Cette autonomie est d'environ 65 heures de vol avec l'emport maximal de carburant, en fonction des conditions d'ensoleillement.

Un record a été établi le 29 mai 2020 à 10 heures et 37 minutes de vol.

Deux écrans en cockpit sont dédiés à l'affichage des paramètres de la chaîne de propulsion pour permettre au pilote de surveiller les puissances, températures et autres données de chacun des éléments de la chaîne.

1.18.1.3. Caractéristiques de l'aéronef

Chaque moteur électrique a une puissance maximale de 25 kW et est géré par son propre boîtier de contrôle et de conversion de puissance, pour une puissance propulsive totale maximale bridée à 48 kW pour assurer la montée sans surchauffe. En cas de panne d'une de ces deux chaînes de puissance, l'autre est juste suffisante pour maintenir le palier, ce qui nécessite une puissance de 20 à 25 kW environ.

Les batteries ont une tension nominale de 360 volts et sont capables de fournir une puissance maximale de 24 kW. Elles ne sont pas prévues pour fournir seules la puissance, car elles n'ont alors qu'une autonomie d'une douzaine de minutes. En revanche, elles permettent d'apporter le surplus de puissance nécessaire à la montée. En cas de panne du générateur, elles octroient une autonomie de quelques minutes pour maintenir le palier et effectuer un atterrissage d'urgence.

Les panneaux solaires peuvent apporter une puissance maximale de 5,5 kW, dépendant de l'ensoleillement. Le générateur (moteur thermique couplé à une génératrice électrique) peut fournir une puissance maximale de 36 kW. Il est prévu pour assurer à lui seul l'apport énergétique nécessaire à maintenir le palier tout en rechargeant les batteries. En revanche, il ne peut pas assurer seul l'apport énergétique nécessaire à la montée et doit être aidé des batteries et panneaux solaires dans ces phases.

Au global, l'aéronef doit consommer l'énergie des batteries pour pouvoir monter, ce qui impose des paliers réguliers au cours de la montée pour recharger celles-ci. Une fois arrivé à l'altitude de croisière, le générateur fournit la puissance nécessaire à maintenir le palier, diminuée de la puissance fournie par les panneaux solaires. Il faut aussi compter une perte d'énergie dégagée en chaleur de 2 kW environ.

Les performances en vitesse sont les suivantes :

- vitesse de montée : 80 km/h ;
- vitesse de croisière nominale : 90 à 100 km/h ;
- vitesse d'approche : 80 km/h ;
- vitesse maximale (VNE) : 116 km/h ;
- vitesse de décrochage théorique⁹ : 55 km/h.

La distance de roulement à l'atterrissage sur une piste revêtue est de 180 mètres.

L'Eraole a une finesse¹⁰ maximale d'environ 17 moteur réduit et 18,5 moteur calé, soit une finesse d'une valeur intermédiaire entre celle d'un avion léger et celle d'un planeur. Cependant, la grande surface alaire par rapport à la masse de l'Eraole le rend particulièrement sensible aux turbulences.

1.18.1.4. Eléments de sécurité

L'Eraole a été conçu pour pouvoir être équipé d'un parachute de cellule. Cet emport n'étant envisagé que pour les vols au-dessus de l'eau, il n'est pas installé le jour de l'évènement. La balise de détresse portative n'a pas été emportée pour la même raison.

La structure du poste de pilotage est renforcée pour protéger le pilote en cas d'accident. Ce dernier est équipé d'une combinaison ignifuge et d'un casque quasiment intégral. Un masque respiratoire couvrant l'ensemble du visage, avec une prise d'air extérieure, est disponible en cas de dégagement de fumées. Un extincteur est installé dans le fuselage au-dessus du moteur thermique pour pouvoir éteindre un éventuel incendie dans ce compartiment.

⁹ La vitesse de décrochage n'a pas été vérifiée en vol car cela a été jugé trop risqué, seules des approches du décrochage ont été réalisées lors des premiers vols d'essais.

¹⁰ Finesse : rapport entre la distance parcourue et l'altitude perdue en vol plané ; une finesse de 17 indique qu'en vol plané, l'avion avance de 17 mètres par mètre d'altitude perdu.

Pour tous les vols, le pilote emporte un poinçon permettant de briser le plexiglas de la verrière du poste de pilotage pour s'extraire de celui-ci en cas d'urgence, au sol, si la verrière est bloquée, ainsi qu'un couteau pour couper au besoin le harnais l'attachant au siège. Un interrupteur à double sécurité est placé dans le poste de pilotage et permet de court-circuiter les moteurs électriques afin qu'ils se comportent comme des freins électriques en vol, ce qui permet de bloquer l'hélice en cas de panne de propulsion pour l'empêcher de s'emballer. Aucun de ces dispositifs n'a été utilisé le jour de l'évènement.

L'aéronef n'est pas doté de dispositif d'avertissement de décrochage ou d'approche du décrochage.

1.18.2. Autorisations de vol

L'Eraole étant un avion expérimental destiné à explorer une nouvelle technologie, il est exclu des règles européennes régissant la certification et l'autorisation des vols d'un aéronef. Le laissez-passer autorisant les vols doit donc être délivré par l'autorité nationale, en l'occurrence ici la DSAC suivant la réglementation nationale.

Sur la période d'octobre 2016 à décembre 2020, suivant un processus *ad hoc* se basant sur ses processus utilisés pour les aéronefs de construction amateur, la DSAC a délivré un total de 13 laissez-passer temporaires autorisant les vols de développement puis de démonstration de l'Eraole. Les premiers laissez-passer temporaires, d'une durée de validité de deux à six mois, ont permis les premiers vols de développement. Une fois ceux-ci réalisés, les laissez-passer ont été délivrés pour des périodes de validité plus longues, d'une durée d'un an. La fondation Océan Vital a envoyé chaque année un bilan des heures de vol effectuées et n'a pas signalé de problème technique, à part un problème mineur de qualité audio de la radio. À chaque demande de renouvellement, la DSAC a délivré de nouveaux laissez-passer temporaires sur la base de ces comptes-rendus.

Le dernier laissez-passer temporaire a été émis le 20 décembre 2019 et est valide jusqu'au 31 décembre 2020. Ce laissez-passer impose des limitations pour chaque vol dont :

- vent inférieur à 15 kt et air calme sans turbulence ;
- la liste nominative des trois pilotes, dont le pilote de l'évènement, autorisés à piloter l'Eraole ;
- l'organisme de contrôle doit être informé qu'il s'agit de vols d'un aéronef expérimental.

- Essais selon le " Programme d'essais en vol de l'appareil Eraole F-WFOV" de [REDACTED] envoyé le 29/09/2016
- Vent inférieur à 15 nœuds et air calme sans turbulence
- VNE=116 km/h
- Facteur de charge limite = 3.2 g ; présence obligatoire d'un accéléromètre installé à bord
- Limitation de la masse au décollage à 820 kg
- Pilotes autorisés : [REDACTED] pilote et [REDACTED], [REDACTED]
- Démonstration publique selon "Programme de démonstration, Avion Eraole F-WFOV" du 07/12/2018
- L'organisme de contrôle doit être informé qu'il s'agit de vols d'un aéronef expérimental

Figure 8 : limitations listées dans le laissez-passer temporaire de l'Eraole en vigueur pour l'année 2020

1.18.3. Qualifications nécessaires pour les vols d'essai sur avion léger

La réglementation européenne définit les exigences relatives aux qualifications que doivent détenir les pilotes réalisant des vols d'essai sur aéronef. Ces règles ne précisent rien concernant les aéronefs dont la masse maximale au décollage est inférieure à deux tonnes. Pour piloter l'Eraole et réaliser les vols d'essai sur cet aéronef, une licence de pilote privé avion est donc suffisante.

La DSAC peut imposer des restrictions supplémentaires au travers du laissez-passer temporaire, qui dans le cas présent sont limitées à une liste nominative des pilotes autorisés à piloter l'Eraole du fait de son caractère expérimental et atypique. La DSAC a de plus conseillé au pilote concerné par l'évènement de recevoir une formation sur avion à train classique, ce que le pilote a fait.

1.18.4. Particularités de la propulsion électrique pour un avion

Un avion traditionnel dont la source d'énergie est un carburant présente des performances moteur qui ne dépendent principalement que des conditions atmosphériques (pression et température de l'air). Les performances globales s'améliorent au cours du vol avec l'allègement de la masse grâce à la consommation de carburant. Un tel avion peut voler de façon nominale jusqu'à assécher les réservoirs, à l'exception d'une faible quantité de carburant inconsommable.

Sur un avion à propulsion électrique, la masse des batteries ne varie pas au cours du vol. De plus, au fur et à mesure que leur charge décroît, le voltage en sortie des batteries diminue aussi, ce qui réduit la puissance que peut délivrer le moteur électrique. Ainsi, plus on a consommé d'énergie en provenance des batteries, plus les performances de la chaîne de propulsion diminuent.

Ce phénomène s'accroît particulièrement pour les batteries qui ont un niveau de charge faible : en dessous de 20 % de charge environ, la tension chute très rapidement, jusqu'à passer en dessous d'un seuil où le moteur ne peut plus délivrer de couple. L'atteinte de ce seuil active la protection en tension des batteries pour éviter tout endommagement et les déconnecte.

Pour résumer, les performances d'un avion électrique diminuent tout au long du vol. Quand on décharge presque complètement les batteries, cette dégradation est très rapide jusqu'à l'arrêt moteur alors que les batteries ont encore de la charge. Pour les avions électriques sans génération à bord, il est donc conseillé de se poser immédiatement lorsque la charge des batteries est inférieure à 30 % pour avoir le temps d'atterrir avec un peu de réserve de puissance pour manœuvrer.

1.18.5. Compétence du BEA-É pour les enquêtes de sécurité concernant des aéronefs expérimentaux

Le texte de création du BEAD-Air (devenu le BEA-É) est le décret n° 2005-1383 du 4 novembre 2005, relatif au dispositif particulier d'enquêtes techniques sur les accidents ou incidents survenus aux aéronefs conçus exclusivement à usage militaire ou exploités en circulation aérienne militaire ou à ceux qui appartenant à l'État français ou tout autre État ne sont pas inscrits au registre d'immatriculation prévu à l'article 17 de la convention relative à l'aviation civile internationale signée à Chicago le 7 décembre 1944. Il stipule à l'article 2 que « le BEAD-air est chargé, en application des dispositions de l'article 40 de la loi du 12 juin 2003, des I, II et III de l'article L. 711-1 et de l'article L. 711-2 du code de l'aviation civile susvisés, de procéder aux enquêtes techniques relatives aux accidents ou incidents survenus aux aéronefs conçus exclusivement à usage militaire ou exploités en circulation aérienne militaire ou à ceux qui appartenant à l'État français ou à tout autre État, ne sont pas inscrits au registre d'immatriculation prévu à l'article 17 de la convention relative à l'aviation civile internationale signée à Chicago le 7 décembre 1944 ».

L'Eraole est un aéronef prototype. Il n'est pas immatriculé sur les registres de l'aviation civile. Le BEA-É est donc compétent pour réaliser l'enquête de sécurité concernant l'accident de cet aéronef.

2. ANALYSE

2.1. Expertises techniques

2.1.1. Analyse des fluides prélevés

Des prélèvements de carburant, d'huile et de liquide de refroidissement ont été réalisés sur l'Eraole. Ces fluides sont bien du type prévu et ne présentent pas de signe de pollution ou de dégradation importante. L'huile du moteur thermique présente cependant des traces de divers composants métalliques, traduisant un début d'usure du circuit de lubrification et des paliers du vilebrequin du moteur thermique.

L'analyse des fluides ne révèle aucune anomalie hormis un début d'usure de différents éléments du moteur thermique.

2.1.2. Quantité d'huile du moteur

L'huile retrouvée dans le fuselage après l'accident provient vraisemblablement du radiateur d'huile, qui s'est déformé lors de l'impact avec le sol. Cependant, la quantité restante d'huile dans le moteur thermique reste suffisante pour assurer son fonctionnement nominal.

La fuite d'huile est probablement consécutive à l'accident. Elle ne remet pas en cause la capacité de lubrification du moteur.

2.1.3. Expertise technique des éléments de la chaîne de propulsion

2.1.3.1. Expertise des batteries

Les batteries de puissance situées dans les ailes ont une charge résiduelle de 15%. Cependant, cette charge correspond à une tension de 324 Volts, qui est à peine suffisante pour entraîner les moteurs électriques avec un couple permettant d'assurer une traction par l'hélice. De plus, la performance des batteries utilisant la technologie lithium-ion s'effondre très rapidement sous les 20% de charge. La charge résiduelle des batteries était donc trop faible à la fin du vol pour permettre un apport de puissance propulsive et explique l'impossibilité pour le pilote de corriger sa trajectoire dans le plan vertical dans les dernières minutes pour gérer son atterrissage d'urgence.

La charge résiduelle des batteries à la fin du vol ne permet pas d'apporter une puissance suffisante pour maîtriser la trajectoire dans le plan vertical.

2.1.3.2. Expertise des circuits de commande de puissance et des moteurs

L'ensemble des éléments permettant de commander les organes de puissance de l'avion (manette des gaz, interrupteurs de commande des moteurs et de la génératrice) ont été vérifiés ainsi que les câblages les reliant à ces organes. Les moteurs et la génératrice ont aussi été expertisés.

Aucune anomalie n'a été relevée sur les circuits de commande de puissance, la génératrice et les moteurs.

2.1.3.3. Expertise du convertisseur de puissance de la génératrice

Le convertisseur de puissance de la génératrice ne présente aucun endommagement apparent. L'utilisation du logiciel de contrôle ne révèle aucune anomalie et les réglages correspondent à ceux qui ont été définis par les essais de développement.

Cependant, l'absence de banc de test de suivi de maintenance ne permet pas de confirmer le bon fonctionnement du convertisseur et l'absence de panne interne d'un composant.

Le convertisseur de puissance de la génératrice est visuellement en bon état et bien configuré. Il n'a pas été possible de déterminer l'origine du dysfonctionnement de cet élément.

2.1.4. Analyse des données de vol

2.1.4.1. Performances de l'aéronef

Les paramètres de vol enregistrés, principalement altitude et vitesse, permettent de voir qu'à partir de 14h, les augmentations d'altitude sont couplées à une augmentation de vitesse, ce qui traduit une augmentation de l'énergie totale de l'avion, donc une ascendance ou une puissance moteur élevée. À l'inverse, les pertes d'altitude sont couplées à une baisse de la vitesse, donc à une diminution de l'énergie.

Sur la base des éléments relevés sur les données de vol, on constate lors de la première phase de descente (à partir de 14h environ) soit une diminution progressive de l'apport énergétique en provenance du moteur ou des ascendances soit une augmentation de la traînée effective à cause des turbulences. Lors de la phase de stabilisation de l'altitude à 14h35, les performances sont à peine supérieures à celles du vol en plané. Il y a une brève et rapide augmentation d'altitude entre 14h46 et 14h56 (gain de près de 1 000 ft d'altitude), puis pendant la descente finale à partir de 14h56, les performances sont dégradées par rapport au vol en plané, ce qui peut indiquer des rabattants ou que l'hélice mouline et freine l'avion. En outre, la vitesse est éloignée de la vitesse de meilleure finesse, ce qui accentue la dégradation des performances.

Lors de la première phase de descente à partir de 14h, une diminution de l'énergie propulsive ou une augmentation de la traînée se traduit par une perte d'altitude régulière et une diminution de la vitesse, avec des performances s'approchant progressivement de celles d'une absence de propulsion. Après un bref sursaut permettant un gain rapide d'altitude, la descente finale à partir de 14h56 se déroule avec des performances dégradées par rapport au vol en plané.

2.1.4.2. Facteur de charge

L'instrument avionique principal de l'Eraole enregistre le facteur de charge vertical. Ces données montrent que pendant le début du vol, le facteur de charge reste proche de la normale à $1 \pm 0,1 g^{11}$. Ensuite à partir de 14h environ et jusqu'à la fin du vol, le facteur de charge varie beaucoup plus fréquemment et avec une plus grande amplitude ($\pm 0,2$ à $\pm 0,3 g$ avec des pics à $\pm 0,6 g$), ce qui est représentatif de la traversée de turbulences.

Des variations de facteur de charge significatives démontrent que l'Eraole traverse une zone de turbulence à partir de 14h environ.

2.1.4.3. Température dans le compartiment arrière

La température mesurée dans le compartiment du moteur thermique passe de 33 °C à 14h à 40 °C à 14h50, soit une augmentation presque double par rapport à l'augmentation de température théorique pour une perte d'altitude de 2 000 ft à raison de 2 °C tous les 1 000 ft. Cela dénote une génération de chaleur importante, donc une forte sollicitation du générateur. De plus, une élévation brutale de la température entre 14h54 et 14h58 est observée, avec un pic à 50 °C, avant de retomber aussi rapidement ensuite.

Le moteur thermique est situé derrière le dossier du siège du pilote. Il est refroidi grâce à un radiateur qui utilise le flux d'air extérieur grâce à une écope. Pendant les 30 minutes précédant le décollage, la température augmente ainsi de 19°C puis retombe après le décollage, une fois que le radiateur peut jouer son rôle.

L'autre élément du générateur situé dans ce même compartiment est la génératrice électrique, couplée au moteur thermique. Elle dispose d'un refroidissement liquide.

¹¹ g : valeur de la pesanteur terrestre.

Le pic de température mesuré dans ce compartiment peu avant 15h est beaucoup plus bref et intense que celui avant le décollage, alors que la vitesse de l'aéronef assure le refroidissement. Le pilote peut ouvrir plus grand l'écope du refroidissement du radiateur, si la surveillance des températures des différents boîtiers affichées sur ses écrans de paramètres lui indique une élévation de température. Cependant, le pilote n'ayant pas relevé d'élévation anormale de température parmi les paramètres affichés et surveillés, cette élévation rapide a été probablement trop brève pour être détectée. Le pilote n'a pas modifié la position de l'écope et le flux de refroidissement est resté constant pendant toute la descente. L'élévation de température alors que le refroidissement est constant implique donc une génération importante de chaleur dans le compartiment, provenant soit du moteur thermique soit de la génératrice soit des deux combinés.

Pendant le début de la phase de descente, la lente augmentation de température est cohérente avec une utilisation plus soutenue du générateur (plus forte demande de puissance propulsive donc plus forte sollicitation du générateur et plus grande génération de chaleur). Le pic de chaleur peu avant 15h correspond au moment de la consommation anormale de puissance électrique de la génératrice. Le générateur reçoit beaucoup d'énergie au lieu d'en fournir et doit donc dissiper cette énergie ainsi que la chaleur normalement dégagée par le moteur thermique en fonctionnement. Ces éléments sont cohérents avec une forte élévation de température dans le compartiment arrière.

À partir du début de la perte non désirée d'altitude, la température dans le compartiment arrière augmente plus vite que la normale. Un bref et intense pic de température est relevé de 14h54 à 14h58 avant de chuter. Ces éléments démontrent une sollicitation plus importante du générateur pendant la descente et avec une consommation anormale d'énergie électrique de la génératrice lors du pic de chaleur.

2.1.4.4. Gestion de la trajectoire

Pendant les dernières minutes du vol, le pilote recherche puis se dirige vers un champ pour son atterrissage d'urgence. Lors de ces évolutions représentées en figure 3, les virages sont effectués à forte inclinaison (jusqu'à 51,5° de roulis) et à faible hauteur. Ainsi le dernier virage, représenté en figure 5, est effectué à une hauteur inférieure à 20 mètres avec un angle de roulis moyen de 41° et qui augmente rapidement en fin de virage. Lors de l'impact de l'aile droite avec le sol, l'avion est incliné de 50° à droite. Ces évolutions sont en limite voire au-delà du domaine de vol. En effet, ces données montrent que pendant les deux dernières minutes, chaque virage est en limite du décrochage. Les calculs indiquent que 2,5 secondes avant l'impact au sol, l'avion passe sous la vitesse de décrochage théorique.

Pour réaliser son atterrissage d'urgence, le pilote effectue des manœuvres aux limites du domaine de vol de l'aéronef. Il est probable que l'avion décroche et que le pilote en perde le contrôle juste avant de toucher le sol.

2.1.5. Analyse spectrale

Les enregistrements des messages radios émis par le pilote entre 14h14 (prise de contact radio avec le contrôleur de Montpellier) et 14h59 (dernier contact radio) comportent, en fond sonore, les bruits du moteur thermique, de l'hélice et des écoulements aérodynamiques autour de l'aéronef. Une analyse du spectre de fréquences de ce bruit de fond permet de déduire la fréquence de rotation de l'hélice. Le bruit du moteur thermique est par contre plus faible et difficilement exploitable. Les conclusions de l'analyse sont :

- l'hélice tourne à un régime moyen légèrement supérieur à 2 600 tr/min jusqu'à 14h44, donc légèrement plus rapide que le régime nominal en croisière qui est de 2 500±100 tr/min ;
- pendant cette période, le régime hélice atteint plusieurs fois 2 670 tr/min, s'approchant du maximum de 2 800 tr/min, puis se stabilise aux environs de 2 580 tr/min entre 14h40 et 14h44 ;
- le bruit généré par l'hélice devient trop faible pour être exploitable à partir de 14h55.

Pour une propulsion électrique avec hélice à pas fixe comme dans le cas présent, la vitesse de rotation de l'hélice est proportionnelle au couple généré par les moteurs.

Entre 14h14 et 14h40 pendant la première phase de descente, le couple moteur moyen est légèrement supérieur au couple nominal pour maintenir le palier en croisière en air calme. Ce couple revient dans la fourchette haute du nominal en croisière entre 14h40 et 14h44 pendant le palier qui suit. À partir de 14h55 soit quelques dizaines de secondes avant le début de la descente finale, le bruit de l'hélice est beaucoup plus faible, probablement à cause d'une baisse de régime pouvant correspondre à un couple faible ou nul au niveau de l'hélice.

2.1.6. Expertise des conditions météorologiques

L'analyse de Météo-France indique pour la région traversée par l'Eraole à la fin de son vol :

- absence de nuage et bon ensoleillement ;
- bourgeonnement de cumulus à partir de 12h sur les reliefs proches du lieu de l'accident ;
- absence d'ondes orographiques ou de rabattants ;
- vent faible jusqu'à 3 000 ft et modéré jusqu'à 5 000 ft ;
- ascendances jusqu'à 5 000 ft à 14h avec une turbulence thermodynamique modérée en surface.

La trajectoire prévue pour la navigation traverse une zone pour laquelle les prévisions météorologiques indiquent l'apparition de cumulonimbus isolés. La trajectoire effectivement réalisée longe le bord de cette zone tout en restant à l'intérieur de celle-ci.

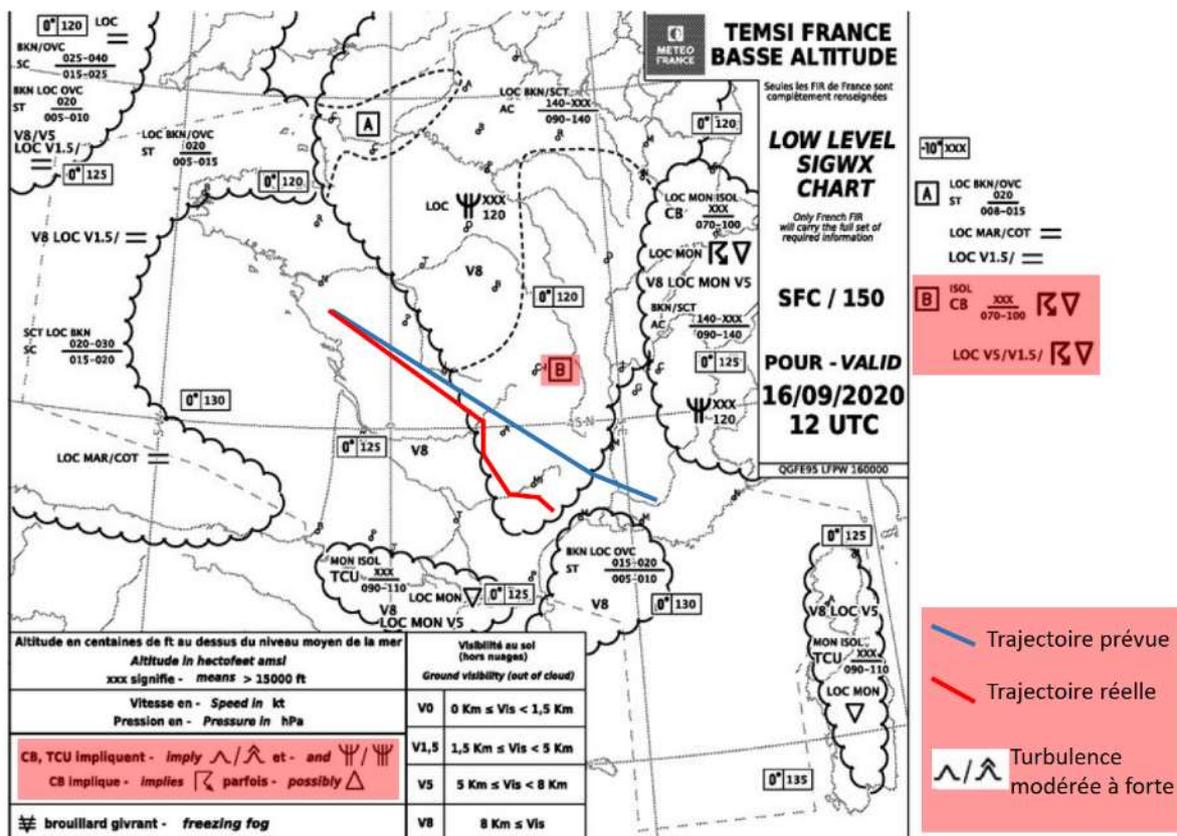


Figure 9 : carte TEMSI valide à 14h avec superposition des trajectoires de l'Eraole

De plus, l'Eraole se dirige vers des zones de plus basse pression (QNH plus élevé de 3 hPa à Rodez par rapport à Montpellier) et le QNH baisse rapidement entre 12h et 14h dans les zones traversées, perdant 2 hPa. Le QNH baisse ainsi de 5 hPa entre 12h et 14h sur la position de l'Eraole, passant de 1022 à 1017 hPa.

Cependant le pilote ne change pas le calage de son altimètre quand le contrôleur de Montpellier lui annonce un QNH de 1017 hPa à 14h14.

Sur la trajectoire de l'Eraole, il y a des ascendances et une turbulence modérée à basse altitude. La trajectoire réalisée passe dans une zone où les prévisions indiquent des phénomènes météorologiques pouvant provoquer des turbulences et des averses. Le QNH baisse de 5 hPa entre 12h et 14h pour l'Eraole mais le pilote ne change pas son calage altimétrique.

2.1.7. Capacité de déroutement

Pendant la première phase de perte d'altitude, le taux de descente moyen est de 115 pieds par minute et la vitesse de 78 km/h en moyenne. Compte-tenu de l'altitude de l'aéronef, de la direction du vent et des aérodromes à proximité, les déroutements envisageables sont :

- Cassagnes Begonhes si le déroutement est décidé dès le début de la perte d'altitude vers 14h ;
- puis Saint-Affrique Belmont jusqu'à 14h30.

Passé cet horaire et une fois l'altitude stabilisée, vers 14h35, il n'est plus possible d'atteindre un terrain de déroutement, notamment du fait de l'altitude trop proche de celle du sommet des crêtes environnantes.

Lors de la descente finale à partir de 14h56, le taux de descente est tel que l'atterrissage d'urgence dans un champ est la seule possibilité.

Pour atteindre une piste et se poser en sécurité, le déroutement doit être décidé avant la fin de la première phase de perte d'altitude.

2.2. Séquence de l'évènement

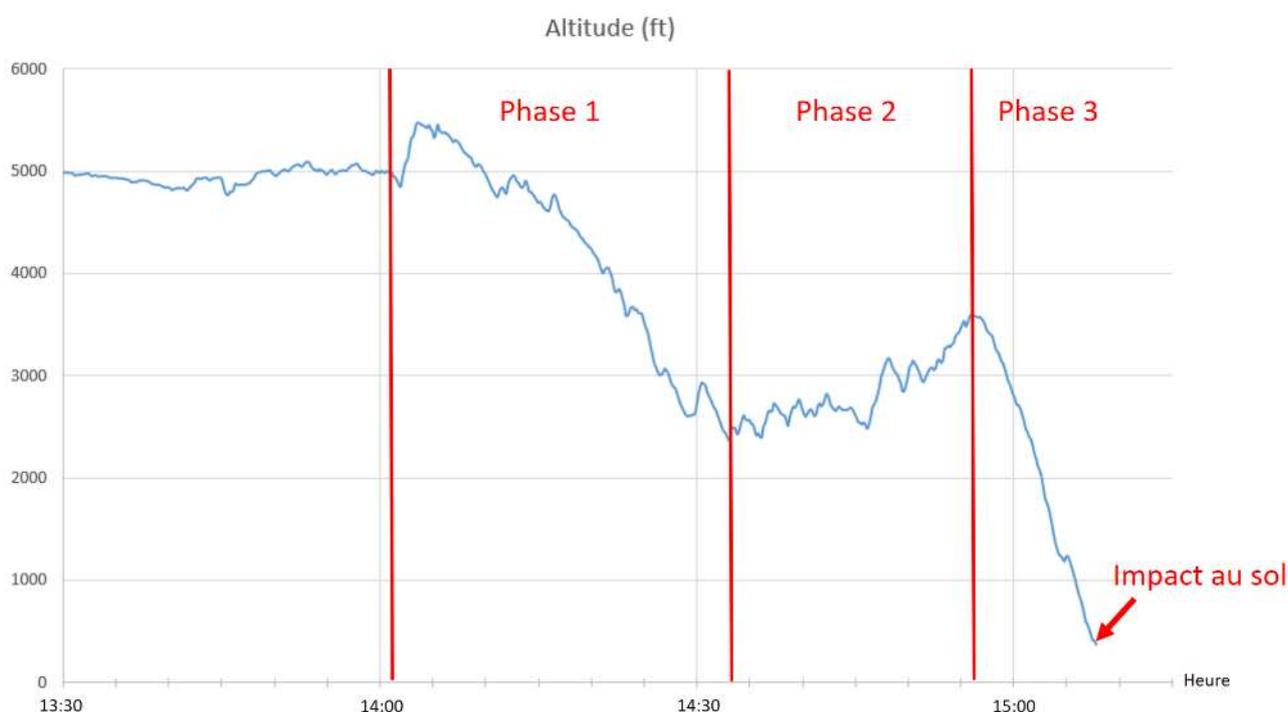


Figure 10 : altitude de l'Eraole sur la partie significative du vol

L'Eraole entre dans une zone de turbulence modérée vers 14h et entame une phase de descente lente (phase 1) jusqu'à 14h35, passant de 5 000 à 2 400 ft d'altitude. À partir de 14h35 (phase 2), l'altitude de l'Eraole se stabilise jusqu'à 14h46 et remonte même à 3 500 ft à 14h56.

Pendant ces deux phases la puissance propulsive est supérieure à la puissance normalement nécessaire pour maintenir le palier, avec des pics proches de la puissance maximale. Le pilote poursuit sa trajectoire en évitant de survoler les crêtes environnantes, avec des sommets pouvant atteindre 2 300 à 2 800 ft.

Un pic de chaleur est enregistré dans la zone du générateur entre 14h54 et 14h58. Aux environs de 14h55, l'hélice ne fournit plus de traction et le pilote constate que la génératrice consomme de la puissance électrique au lieu d'en fournir. Il tente plusieurs fois de la relancer, puis la coupe. Seules les batteries peuvent alors fournir de l'énergie aux moteurs électriques.

À partir de 14h56, l'Eraole entame sa descente finale (phase 3) avec un taux de descente dégradé par rapport à un vol plané. Pendant les cinq dernières minutes, l'Eraole effectue de nombreux virages à forte inclinaison et faible hauteur. À 15h07, l'Eraole, en limite de portance, heurte le sol d'abord avec l'aile avant droite qui se casse en deux, puis les trains principaux latéralement et finit en marche arrière contre un talus.

2.3. Recherche des causes de l'évènement

2.3.1. Causes relevant du domaine technique

En l'absence de données techniques enregistrées concernant la chaîne de propulsion, la recherche des causes s'appuie sur le témoignage du pilote. Les hypothèses suivantes sont retenues :

- le moteur thermique ne s'est jamais éteint et tournait au minimum au ralenti ;
- l'hélice ne s'est jamais arrêtée ;
- aucune donnée anormale ou traduisant une panne n'a été détectée par le pilote jusqu'à 14h55 environ (détection de l'anomalie de la génératrice qui consomme du courant au lieu d'en délivrer) ;
- le pilote a commandé la pleine puissance des moteurs à plusieurs reprises, sans réussir à contrer la perte d'altitude pendant la phase 1, et sans aucun effet pendant la fin de la phase 3.

Les expertises ne relèvent aucun dysfonctionnement de la chaîne de propulsion, y compris sur les organes de commande de celle-ci, mis à part pour le boîtier convertisseur de tension de la génératrice. Ce dernier sert aussi de boîtier de commande pour la génératrice. Le boîtier est visuellement intègre et est correctement configuré, mais son bon fonctionnement n'a pu être démontré.

2.3.1.1. Perte d'altitude initiale et difficulté à regagner de l'altitude

Pendant les phases 1 et 2, aucun problème technique n'est relevé et l'hélice tourne à un régime élevé révélateur d'une puissance propulsive supérieure à la puissance nécessaire pour maintenir le palier en air calme. La chaîne de propulsion fonctionne normalement et délivre même une puissance élevée.

Aucune cause technique ne peut expliquer la perte d'altitude et la difficulté à la regagner pendant les phases 1 et 2.

2.3.1.2. Défaut du convertisseur de tension de la génératrice

2.3.1.2.1. Comportement de la génératrice

Pendant la transition entre les phases 2 et 3, vers 14h55, le pilote détecte que la génératrice consomme du courant au lieu d'en délivrer. Cette situation n'est censée survenir que lorsque la génératrice est utilisée comme démarreur pour lancer le moteur thermique avant de partir en vol. Après avoir tenté plusieurs fois de la réarmer, sans succès, le pilote coupe alors la génératrice, qui ne délivre donc plus d'énergie. Le moteur thermique continue de tourner, au ralenti, sans apporter d'énergie pour la propulsion de l'aéronef. Pendant toute la phase 3, le pilote ne dispose donc que de l'énergie stockée dans les batteries et de l'apport des panneaux photovoltaïques.

Une défaillance du boîtier convertisseur de tension de la génératrice est la seule cause pouvant expliquer le comportement de la génératrice. Une fois celle-ci coupée, l'Eraole ne dispose, que d'une douzaine de minutes d'autonomie de propulsion au maximum.

2.3.1.2.2. Perturbation électromagnétique de l'électronique

Lors des vols de mise au point de l'Eraole, il a été constaté que l'utilisation de la radio sur certaines fréquences provoque des pertes de puissance. La cause identifiée est la perturbation de l'électronique de puissance par les émissions électromagnétiques du poste de communication radio. Une modification a donc été apportée en appliquant une fine couche métallique, visant à assurer une protection électromagnétique minimale, sur les câbles de la radio et sur le convertisseur de tension de la génératrice. Cette solution a été jugée suffisante lors des vols suivants. Cependant, il n'est pas exclu qu'une perturbation résiduelle puisse avoir favorisé une panne du convertisseur de tension, ou que ce dernier ait subi une usure prématurée avant que la modification ne soit appliquée.

Un problème de compatibilité électromagnétique entre le poste de communication radio et le convertisseur de tension de la génératrice peut avoir favorisé la panne de ce dernier.

2.3.1.2.3. Sollicitation du convertisseur de tension de la génératrice

Pendant les phases 1 et 2, le pilote sollicite beaucoup de puissance pour tenter de maintenir l'altitude pendant une durée longue. Le générateur doit donc faire un apport continu de puissance ce qui provoque un échauffement du convertisseur de tension.

Les essais d'endurance effectués avec l'Eraole ont permis de s'assurer que la partie génération est en capacité de fournir sa pleine puissance pendant une longue durée. Cependant ces essais ont été effectués à des températures extérieures plus faibles, ne couvrant pas les températures estivales élevées du jour de l'évènement. Il est probable qu'une forte demande de puissance, qui se traduit alors par une rapide élévation de température du convertisseur, pour permettre d'assurer la brève reprise d'altitude qui précède la descente finale, soit l'élément déclencheur final de la panne du convertisseur.

Le convertisseur de tension de la génératrice a probablement failli vers 14h54 pendant une forte sollicitation provoquant une élévation de température, dans une ambiance déjà chaude. Sa défaillance a consécutivement provoqué une consommation anormale d'énergie électrique de la génératrice et une rapide élévation de température dans le compartiment arrière.

2.3.1.2.4. Utilisation d'éléments non prévus pour un usage aéronautique

Le convertisseur de tension de la génératrice est un élément conçu pour une utilisation industrielle terrestre. Il n'a pas été conçu pour une utilisation aéronautique et la documentation constructeur indique que ses capacités de refroidissement se dégradent avec l'altitude. Sa fiabilité n'est potentiellement pas adaptée à l'utilisation dans un aéronef, surtout par temps chaud et en altitude.

Le convertisseur de tension de la génératrice n'est pas conçu pour l'utilisation qui en est faite sur l'Eraole, ce qui a probablement diminué sa fiabilité.

2.3.1.3. Énergie des batteries

Les batteries seules sont juste suffisantes pour fournir l'énergie nécessaire pour maintenir le palier en air calme et ce pendant une douzaine de minutes environ si elles sont pleinement chargées. Pendant la phase 3, le pilote constate qu'il n'arrive pas à obtenir de puissance propulsive même en demandant la pleine puissance des moteurs électriques et observe une tension anormalement basse des batteries. Les expertises des batteries indiquent qu'elles sont presque complètement déchargées.

En effet, les demandes continues de puissance pendant les phases 1 et 2, combinées à l'anomalie de la génératrice qui consomme de la puissance entre sa défaillance et le moment où le pilote la coupe, ont probablement vidé partiellement ou totalement les batteries avant la phase 3.

Les batteries sont en grande partie ou totalement déchargées au début de la phase 3, expliquant l'absence de puissance propulsive pendant cette phase.

2.3.2. Cause relevant du domaine environnemental

Le pilote explique sa perte d'altitude à la radio par la présence de rabattants et de turbulences. L'Eraole est très sensible aux turbulences, qui lui imposent une puissance motrice supérieure pour maintenir le palier et par conséquent une consommation de carburant augmentée, confirmée sur le vol de l'évènement, par le pilote et par la quantité restante de carburant. De plus, aucune cause technique n'a été retenue pour expliquer la perte d'altitude pendant les phases 1 et 2 et l'analyse spectrale montre une puissance motrice supérieure à la normale. L'Eraole ne peut cependant maintenir longtemps sa puissance propulsive maximale car celle-ci nécessite de puiser de l'énergie dans les batteries. Cette puissance augmentée n'est pas suffisante pour maintenir le palier pendant la phase 1 et juste suffisante en phase 2.

Les données Météo-France pour les zones traversées par l'Eraole indiquent l'absence d'ondes orographiques et la présence d'ascendances, mais avec une turbulence modérée jusqu'à 5 000 ft. Les évolutions du facteur de charge confirment ces turbulences et leur renforcement.

La perte d'altitude initiale est due aux turbulences modérées dans la zone traversée, qui imposent, pour tenter de maintenir le palier, une puissance propulsive supérieure à celle que peut fournir en continu l'Eraole.

2.3.3. Causes relevant du domaine des facteurs organisationnels et humains

2.3.3.1. Profil du pilote

2.3.3.1.1. Expérience

Le pilote est détenteur d'une licence de pilote privé et a réalisé la moitié de ses heures de vol sur l'Eraole. Il a été aux commandes pour la majeure partie des vols d'essai et de développement et l'ensemble des vols qui ont suivi. Il fait partie des ingénieurs ayant conçu cet avion et est expert de ses systèmes. L'autre moitié de ses heures de vol a été réalisée en majorité sur un avion de type PA28, plus rapide et avec une finesse deux fois plus faible. Le pilote a donc une bonne expérience sur l'Eraole, hors l'entraînement aux pannes sur cet aéronef aux performances très limitées. Ses connaissances en entraînement aux pannes sont relatives à un aéronef de caractéristiques très différentes. De plus, le pilote n'a pas d'expérience en planeur, dont les méthodes d'utilisation apportent des notions importantes dans la gestion de l'aérodynamique, des déroutements et de l'atterrissage en campagne. Ainsi, en phase 3, le pilote tarde beaucoup à choisir le champ dans lequel opérer son atterrissage d'urgence, alors qu'il est déjà à faible hauteur. Ce choix tardif lui laisse peu de temps pour préparer son approche et repérer les obstacles alentours. Il se fait d'ailleurs surprendre par la position de la ligne électrique haute tension qui l'oblige à modifier sa trajectoire d'approche à très faible hauteur.

Le pilote est un expert pour l'Eraole, mais possède un faible entraînement à l'atterrissage en campagne, et une faible expérience préalable sur avion lent comme l'Eraole. Il choisit trop tardivement son point de poser d'urgence et en conséquence est mal préparé pour son approche, il modifie sa trajectoire à moins de 50 mètres du sol.

2.3.3.1.2. Profil d'entrepreneur

Le pilote, avant le projet Eraole, a participé à plusieurs navigations en solitaire en mer. Le projet Eraole est une nouvelle aventure qui lui permet de mettre en avant des technologies plus écologiques, objectif du laboratoire Océan Vital.

Cette motivation première nécessite, comme tout projet, des financements, que le pilote recherche activement. Au moment de l'évènement, le pilote s'inscrit dans une logique de relance de son projet, car son budget initial est épuisé.

Le profil d'entrepreneur du pilote est synonyme d'une grande motivation dans la réussite du projet Eraole.

2.3.3.1.3. Esprit ingénieur

Le pilote est ingénieur avant d'être pilote et a participé à la conception de l'Eraole. Cet aéronef expérimental a pour objectif d'être un démonstrateur de l'utilisation d'une propulsion hybride électrique, avec apport de l'énergie solaire, sur un appareil volant. Ce penchant pour les aspects techniques et technologiques peut avoir poussé le pilote à se focaliser sur les systèmes de l'aéronef plutôt que sur la navigation. Notamment, pendant la phase 1, le pilote surveille avec insistance les paramètres de la chaîne de propulsion pour comprendre la perte d'altitude non désirée et cherche une cause technique même s'il n'en détecte aucun indice. De plus, le pilote a une grande confiance dans l'architecture du système de propulsion et l'estime robuste. Les deux cas déjà rencontrés auparavant de panne en vol n'ont causé aucun dégât, l'Eraole ayant pu revenir se poser sans encombre sur la piste à proximité. Le pilote n'exprime aucun sentiment d'urgence vers le contrôleur et semble plutôt estimer avoir du temps pour analyser et gérer son problème.

Le pilote est aux commandes d'un aéronef pour lequel il a contribué à la conception. Il est confiant dans la robustesse du système, même s'il lui connaît des faiblesses. Son prisme ingénieur le pousse à se focaliser sur la recherche d'une cause technique à la perte d'altitude non désirée, au détriment de la gestion du vol et d'un éventuel déroutement.

2.3.3.2. Contraintes et biais cognitifs

2.3.3.2.1. Fatigue

Au début de la perte d'altitude à 14h, le pilote est en vol depuis cinq heures. Il est aux commandes en permanence en l'absence de pilote automatique, dans un cockpit exigu imposant une position recroquevillée, avec une température dans le cockpit plutôt élevée et équipé d'une épaisse combinaison de vol ignifugée et d'un casque intégral. De plus, le vol dans les turbulences lui demande une gestion constante de la puissance moteur pour ne pas dépasser la VNE dans les ascendances et ne pas trop perdre d'altitude dans les descendances, avec des variations de plusieurs centaines de pieds qu'il faut contrer à chaque fois pour tenter de maintenir son altitude. Le pilote peut donc être soumis à une fatigue physique limitant ses capacités cognitives pour gérer les problèmes qu'il rencontre. Notamment, au moment du premier contact radio avec Montpellier à 14h14, le pilote ne collationne qu'une partie du message et ne relève pas le changement de QNH.

Le pilote est probablement fatigué au moment où les problèmes apparaissent, ce qui peut le limiter dans ses capacités de recherche de solution et augmente la probabilité d'erreurs.

2.3.3.2.2. Persévérance

Le pilote est fortement motivé pour arriver à destination avec l'Eraole avant l'arrivée du rallye. Il choisit de faire le trajet par la voie des airs, du fait de la complexité du transport de l'Eraole par voie routière. En effet, cette solution impose de très longues opérations de démontage avant transport puis de remontage à destination. De plus, le camion spécialisé qui lui aurait permis de transporter l'Eraole par voie routière n'est pas utilisable. Cependant, la météo défavorable les jours suivants ne laisse au pilote qu'un choix limité dans la planification du vol. Le trajet est prévu en une seule étape. D'ailleurs, le pilote n'a pas prévu de hangar pour y stocker au besoin, l'Eraole sur ce trajet.

Or, et en cas de déroutement, ce remisage peut s'avérer nécessaire contre les intempéries éventuelles pour protéger les panneaux solaires souples et allégés de l'Eraole. Il a un arrangement pour profiter d'un hangar

une fois à destination, mais pour cela il doit arriver avant 18h15 à Aix-les Milles. Ces conditions spécifiques de stockage freinent la décision d'un déroutement.

Une fois en vol, malgré les turbulences contre lesquelles l'Eraole n'est pas dimensionné et qu'il n'est pas autorisé à traverser, le pilote poursuit le vol et ne considère que des terrains devant lui comme éventuels déroutement. Il espère trouver des conditions météorologiques plus favorables en route. Il estime par ailleurs être loin des orages qui se forment au nord-est de sa position sans s'inquiéter du bourgeonnement des nuages dans sa zone. Il se retrouve trop loin des éventuels aérodromes de déroutement et poursuit son vol en s'enfermant dans des vallées qu'il espère voir déboucher sur la plaine côtière de Montpellier.

Le pilote est dans le cas typique du phénomène de persévération. Malgré les indices lui signalant que la situation devient risquée, chaque décision de continuer restreint les voies de sortie pour s'extirper du mauvais pas dans lequel il se trouve. Il est par ailleurs très difficile de sortir seul de ce genre de situation, sans le bénéfice d'une intervention extérieure. Le contrôleur lui propose plusieurs fois des déroutements, le pilote refuse cependant ces propositions.

Le pilote est motivé pour arriver à destination et persévère dans ses choix, ce qu'il lui coupe progressivement tout échappatoire et l'enferme dans des choix de plus en plus risqués, malgré les tentatives d'aide du contrôleur.

2.3.3.2.3. Surcharge cognitive en phase 3

Lors de la phase 3, le pilote tarde à choisir un champ car il espère trouver un terrain adéquat plus loin. Lorsqu'il se décide enfin, il est à une hauteur plutôt faible ce qui lui laisse peu de temps pour repérer les obstacles, choisir son approche et préparer l'atterrissage (coupure du moteur thermique pour limiter le risque d'incendie notamment). Cette pression temporelle peut provoquer une surcharge cognitive, exacerbée par la fatigue, limitant ses capacités. Ainsi, il analyse trop tardivement que la ligne haute tension rend impossible l'approche qu'il avait prévue. De plus, pendant toute la phase 3, il surveille très peu sa vitesse. Il vole ainsi à des vitesses largement inférieures (ou même parfois supérieures) à la vitesse de 75 km/h, qui lui offrirait pourtant la meilleure finesse. Les performances sont alors dégradées pendant la descente, lui offrant encore moins de temps pour gérer l'atterrissage. Enfin, le pilote n'a pas d'expérience du vol à une si faible hauteur et une si faible vitesse ce qui augmente aussi sa charge mentale de travail, avec une focalisation sur le champ qu'il cherche à atteindre. Cette surcharge cognitive peut accentuer le manque de surveillance du paramètre vitesse, ce qui aboutit à un décrochage et une perte de contrôle juste avant l'impact au sol.

Pour la fin du vol, le pilote est probablement en surcharge cognitive ce qui limite ses capacités à gérer en sécurité l'atterrissage d'urgence.

2.3.3.3. Sous-estimation du risque

2.3.3.3.1. Sous-estimation du risque lors de la conception

La conception de l'Eraole, du fait de son caractère expérimental, fait appel à des technologies nouvelles dans le monde aéronautique. La majeure partie des éléments de la chaîne de propulsion n'est pas conçue pour un usage aéronautique. Notamment, l'utilisation en altitude de certains éléments ou encore leur compatibilité avec un puissant émetteur radio peut en dégrader le fonctionnement. Plusieurs dysfonctionnements ont été constatés en vol et résolus pendant le développement, mais leurs conséquences ont été limitées car la panne se déclarait à proximité d'un aérodrome et sur un élément redondé ou ne provoquait pas la perte totale d'un élément non redondé. Dans le document « check-list avion » de l'Eraole, pour le cas d'une panne du générateur qui ne peut être résolu, il est prévu un « atterrissage en campagne avec l'aide des batteries et du solaire ».

Cependant, malgré une fiabilité mal connue des éléments et plusieurs cas de pannes avérées, aucune préconisation ou limitation d'utilisation (proximité d'un aérodrome, survol de zones permettant l'atterrissage en campagne) n'a été formulée pour les vols ultérieurs.

De plus, le pilote s'est doté de nombreuses protections contre les conséquences d'un accident (casque, combinaison ignifuge, moyens d'extraction de la cellule). Cependant, certains éléments de secours (balise de détresse, parachute de cellule) n'ont pas été embarqués sur l'Eraole car leur installation n'était programmée que pour les vols avec survol maritime. Leur emport n'était pas envisagé avant ces vols, afin de limiter la masse de l'aéronef.

Au global, il n'a pas été réalisé d'analyse de sécurité pour prendre en compte les particularités de l'Eraole et implémenter en conséquence des limitations opérationnelles, permettant de gérer les performances limitées et la conséquence des éventuelles pannes.

Lors du développement de l'Eraole, l'absence d'analyse de sécurité formelle n'a pas permis d'avoir une évaluation complète du risque prenant en compte les limitations de l'aéronef et les conséquences d'éventuelles pannes. Le risque a donc été sous-estimé et les mesures d'atténuation apparaissent insuffisantes.

2.3.3.3.2. Sous-estimation du risque pour le vol de l'évènement

L'Eraole a déjà été confronté deux fois à une panne sur la chaîne de propulsion, limitant la puissance disponible au point d'imposer un poser dès que possible. Dans un des deux cas il s'agissait d'une surchauffe d'un des convertisseurs de tension alimentant un des moteurs électriques, provoquant sa défaillance et sa mise en sécurité. Ce convertisseur est du même modèle que celui de la génératrice. Une autre fois, le pilote a été confronté à des turbulences importantes ayant provoqué une perte d'altitude alors que la pleine puissance des moteurs (soit 48 kW) était déployée. Le pilote avait donc déjà connaissance de cas similaires à ceux auxquels il a été confronté le jour de l'évènement.

De plus, les batteries de l'Eraole, en supposant qu'elles soient pleinement chargées, ne permettent qu'une douzaine de minutes d'autonomie. Dans cette configuration, l'atterrissage d'urgence est la seule solution en cas de panne de génératrice à plus d'une quinzaine de minutes de vol (en comptant une marge grâce à l'altitude de départ) d'un terrain adéquat. Le risque de s'éloigner à plus de quinze minutes de vol d'un aérodrome est donc à mesurer par rapport à la fiabilité de la génératrice. Par ailleurs, l'emploi des batteries de très grande capacité sur avion électrique présente le risque d'un emballement thermique, pouvant provoquer un important incendie et imposant un poser immédiat. Il est donc nécessaire de survoler des zones le permettant.

Ce vol était programmé pour une longue durée (huit heures). Cette durée n'a été atteinte que trois fois précédemment (un vol de huit heures, un de dix et un de presque onze heures), ces trois vols ayant été réalisés à proximité de l'aérodrome de départ. Le déplacement le plus long précédemment réalisé, de la Roche-sur-Yon vers Perpignan, avait ainsi été fractionné en plusieurs vols, répartis sur plusieurs jours, en évitant le survol du massif central. Le vol du 16 septembre est alors le premier vol aussi long réalisé en navigation (la plus longue navigation ayant duré moins de cinq heures) et aussi le premier au-dessus de reliefs montagneux. Le pilote a pris le risque de ce survol montagneux pour pouvoir arriver à destination avant l'heure de fermeture du terrain de destination.

Au niveau météorologique, le pilote dévie sa trajectoire vers le sud des Cévennes pour s'éloigner de la zone d'apparition des cumulonimbus, mais reste dans la zone identifiée comme instable. Il est donc exposé aux dangers aérologiques associés. Il cherche à continuer vers la côte, bien dégagée de tous ces phénomènes, mais cela l'oblige à continuer à traverser la zone pénalisante pour l'Eraole plutôt que de s'en éloigner.

Pour l'altitude de vol, le pilote a choisi d'effectuer la croisière à 5 000 ft et pas plus haut car la VNE faible de l'Eraole limite fortement le taux de descente, ce qui aurait imposé un très long temps de descente sur la fin du vol. Cependant, la marge de hauteur s'est alors retrouvée réduite pour gérer la panne.

Les expériences passées du pilote, dont une où il a frôlé la mort, peuvent avoir provoqué chez lui une plus grande acceptation du risque, pouvant amener à une perception amoindrie des dangers et à des comportements plus risqués. Les manœuvres dangereuses des dernières minutes de vol sont un exemple de tels comportements. Paradoxalement, le pilote a une bonne connaissance des conséquences des accidents et s'est donc protégé contre celles-ci (combinaison ignifuge, casque intégral, coupe-sangle, poinçon permettant

de briser la verrière pour sortir si celle-ci est bloquée, etc.), mais ces protections peuvent aussi avoir renforcé le sentiment de sécurité et la sous-évaluation du risque d'accident.

Que ce soit dans la planification ou l'exécution du vol, le pilote sous-estime le risque pris en entreprenant puis en poursuivant le vol dans les conditions rencontrées. Le passé du pilote peut impliquer une acceptation du danger entraînant une sous-évaluation du risque et induire des comportements plus risqués, potentiellement renforcés par le sentiment de sécurité apporté par les nombreuses protections en cas d'accident qu'il a à sa disposition à bord.

2.3.3.4. Difficultés d'action du contrôle aérien

2.3.3.4.1. Absence de communication préalable

Le laissez-passer provisoire délivré pour l'Eraole par la DSAC précise que « l'organisme de contrôle doit être informé qu'il s'agit de vols d'un aéronef expérimental ». La DSAC entendait par là qu'un contact préalable à chaque vol devait être effectué pour communiquer, à chaque entité de contrôle aérien concerné par le vol, les caractéristiques particulières de l'Eraole pour permettre aux contrôleurs d'assurer efficacement leur rôle. Les deux aspects importants sont les performances limitées (vitesse faible, motorisation particulière imposant un taux de montée faible et discontinu, plafond opérationnel peu élevé, nécessité de vol en air calme sans turbulence) et la présence de batteries de grande capacité, nécessitant une prise en charge particulière par les services de secours en cas d'incident ou d'accident. Les enregistrements des communications radio entre le pilote et les contrôleurs en poste à la tour de contrôle de Montpellier permettent de constater que le pilote annonce lors du premier contact être à bord d'un avion prototype électrique mais ne donne pas plus de détails malgré la demande de précisions du contrôleur.

Le pilote pense suffisant de mentionner au premier contact radio qu'il est à bord d'un aéronef « prototype électrique » pour remplir cette condition. Il croit que les contrôleurs peuvent alors accéder à la fiche de navigabilité de l'Eraole, qu'il avait communiquée à la DSAC en 2018. Cependant, ce document n'est pas accessible aux contrôleurs en poste de contrôle. Ils n'ont pas le temps de le consulter ni de l'exploiter de manière satisfaisante sous contrainte temporelle car le document fait dix pages et il contient des données qui peuvent introduire de la confusion. Par exemple, le plafond pratique (altitude maximale atteignable avec un taux de montée de 300 ft par minute) est indiqué à 2 000 ft, alors que les essais ont montré que l'Eraole peut monter à une altitude supérieure à 9 000 ft, la grande différence étant due à la vitesse ascensionnelle déjà très faible à basse altitude de l'Eraole.

Ainsi, deux minutes après le premier contact radio avec le SIV de Montpellier, le contrôleur demande au pilote des précisions sur l'aspect avion électrique, le pilote réitère le statut de prototype électrique, mentionne qu'il est sous laissez-passer, mais n'apporte aucune précision supplémentaire pour aider le contrôleur.

Une consigne imprécise du laissez-passer et une interprétation différente de sa finalité entre la DSAC et le pilote ont empêché une communication en amont des capacités et des limitations de l'Eraole. Cette situation ne permet pas au contrôleur d'avoir à sa disposition toutes les informations utiles pour aider efficacement le pilote.

2.3.3.4.2. Différence d'appréciation de la situation

Le pilote paraît serein lors de tous les échanges radio. Les prises de contact sont plus souvent à l'initiative du contrôleur, qui propose plusieurs fois des déroutements au pilote. Ce dernier rejette toutes les propositions de déroutement proposées par le contrôleur et indique à chaque fois une possibilité plus loin sur sa trajectoire. Le contrôleur pense donc que le pilote gère la situation et est juste confronté à une aérologie turbulente qui l'empêche de tenir son altitude. Le pilote ne se déclare jamais en situation d'urgence ou de détresse. Le contrôleur ne se rend compte de la gravité de la situation qu'à la fin, quand en réponse à sa demande d'intentions, le pilote indique n'avoir plus que 5 à 10 minutes de vol avant de devoir se poser dans un champ. À Montpellier, les enregistrements des échanges entre les contrôleurs, le chef de quart de la tour et le bureau des télécommunications et de l'information des vols (BTIV) permettent de connaître la situation des

intervenants au sol. Les contrôleurs isolent la fréquence du SIV pour garder l'Eraole seul en fréquence à 14h42, après que ce dernier ait signalé arriver au niveau des crêtes. Le chef de quart est prévenu de la situation mais les échanges entre le contrôleur et le chef de quart indiquent une mécompréhension sur les capacités de l'Eraole et le niveau de criticité de la situation, notamment pour évaluer s'il faut déclencher une alerte de niveau Alerfa ou Détressfa¹². Le chef de quart prévient ensuite le BTIV, ce dernier déclenche immédiatement la phase Détressfa avec le peu d'informations disponibles. Lors d'une nouvelle discussion entre le chef de quart et le contrôleur à 14h50, ce dernier indique que le pilote ne semble pas du tout stressé et que l'aéronef est un prototype donc que c'est peut-être normal qu'il n'ait pas de très bonnes performances. Il trouve que le passage au niveau d'alerte Détressfa est disproportionné. Le chef de quart recontacte donc le BTIV pour proposer de ne pas déclencher de Détressfa, mais le BTIV indique garder ce niveau pour surveiller la suite des événements.

Un peu plus tard, le contrôleur remarque que l'Eraole a repris un peu d'altitude et réitère son observation que le pilote n'a pas du tout l'air inquiet de la situation. Le chef de quart informe le BTIV à 14h57 qu'il ne semble pas y avoir d'urgence, puis rappelle deux minutes plus tard pour signaler le contraire car le pilote a indiqué une situation très dégradée et devoir se poser dans les minutes qui suivent.

De son côté, le pilote est confronté à cette perte d'altitude subie dont il cherche à déterminer la cause et il se retrouve proche du relief, au point de se sentir presque enfermé dans les vallées survolées et de vouloir au plus tôt rejoindre la plaine côtière. Par ailleurs, les turbulences s'amplifient au fur et à mesure que le temps passe. Il lutte de plus en plus pour garder son altitude sans signaler cependant de difficulté.

Le pilote est dans une situation de plus en plus dégradée mais n'émet aucun message de détresse. Il ne signale qu'il va devoir faire un atterrissage d'urgence qu'au dernier moment et, sur sollicitation du contrôleur. Sans ces informations, le contrôleur ne peut apporter d'aide efficace au pilote.

2.3.3.4.3. Gestion perfectible du secours par le contrôleur

Le contrôleur, malgré les informations limitées à sa disposition, essaie d'apporter toute l'aide qu'il peut au pilote de l'Eraole. Cependant, il tarde à demander au pilote d'afficher le code transpondeur 7700 (code d'urgence, qu'il peut lui demander d'afficher dès l'enclenchement de l'alerte Détressfa) et l'Eraole n'est plus détectable au radar quand le centre organisant les recherches et secours aéronautiques lui demande de le faire afficher, ce qui aurait aidé pour le suivi de l'aéronef en détresse et la localisation de l'accident. De plus, au moment du déclenchement des secours, le contrôleur n'indique pas aux pompiers qu'il s'agit d'un avion électrique et mentionne même par erreur que le carburant emporté est du kérosène. Néanmoins, les pompiers ont pu bénéficier de l'aide du pilote, encore vivant et conscient, pour sécuriser l'aéronef.

Le contrôleur, surpris par la rapidité de la dégradation de la situation de son point de vue, ne demande pas à temps l'affichage du code transpondeur d'urgence au pilote. Il ne transmet pas aux secours le peu d'information dont il dispose sur les dangers spécifiques liés au type de propulsion de l'aéronef.

2.3.3.5. Design expérimental peu ergonomique

Le cockpit de l'Eraole est peu ergonomique sur plusieurs plans. Au niveau de la position de pilotage, l'exigüité du poste de pilotage impose une position recroquevillée pour le pilote, avec très peu de possibilités de mouvement, ce qui peut être très inconfortable sur un vol long.

Par ailleurs, au niveau de la disposition des instruments, les paramètres liés à la chaîne de propulsion sont affichés sur des écrans situés de chaque côté du cockpit, complétés de quelques cadrans sur les côtés de la planche de bord, nécessitant un balayage latéral de plutôt grande amplitude de la tête pour les consulter. Ces affichages latéraux ne disposent ni d'alarme visuelle d'informations prioritaires (panne, valeur anormale) ni d'alarme sonore et nécessitent donc un balayage visuel continu pour détecter un problème. De plus, cette détection peut ne pas être immédiate si le pilote est occupé par autre chose. Ce balayage continu occupe une bonne partie du temps du pilote. Le circuit visuel complet de vérification des nombreux paramètres du

¹² Il y a trois phases d'alerte en cas d'évènement aérien, dans l'ordre : Incerfa (phase d'incertitude sur la situation de l'avion), Alerfa (phase d'alerte, car la situation laisse supposer un danger pour l'aéronef), Détressfa (phase de détresse car danger avéré).

système de propulsion prend de l'ordre de la minute, sachant qu'il faut de plus interpréter certains d'entre eux pour vérifier qu'ils sont conformes à l'attendu, leurs valeurs nominales dépendant de la situation. Par exemple, les batteries doivent consommer de l'énergie quand elles se rechargent (et la génératrice délivrer une puissance supérieure à la normale en même temps), alors qu'elles délivrent de l'énergie pour fournir la puissance nécessaire pour monter. Il faut donc mettre en relation l'énergie entrant ou sortant des batteries avec leur niveau de charge et la trajectoire verticale de l'avion.

Ce design induit donc une charge de travail élevée pour la surveillance des paramètres tout en n'assurant pas un délai rapide de détection d'anomalie. Ainsi, en fin de phase 2, il peut s'être écoulé plusieurs minutes entre la défaillance du convertisseur de tension de la génératrice et la détection de celle-ci par le pilote ; pendant ce temps, l'énergie des batteries est consommée par les moteurs électriques et le convertisseur défaillant, privant le pilote d'une partie des réserves d'énergie utiles pour la phase 3.



Figure 11 : agencement du cockpit de l'Eraole et position de pilotage

De plus, les sécurités logicielles de certains composants ont été volontairement désactivées, pour ne pas priver le pilote des pleines capacités du système en cas d'urgence. Ainsi, les protections en température des convertisseurs de tension ont été désactivées, afin de permettre au pilote de passer outre la surchauffe de l'un d'eux pendant une courte période pour assurer son atterrissage, en acceptant le risque d'un endommagement irréversible. Cependant, une telle surchauffe doit être détectée rapidement au vu de ses conséquences (perte définitive du composant) et donne une raison supplémentaire d'assurer un balayage complet et régulier des paramètres.

Le design peu ergonomique et les choix de conception de cet aéronef expérimental provoquent un inconfort pour le pilote, une charge cognitive élevée pour assurer le pilotage et la sécurité, sans garantir une détection rapide d'une anomalie.

2.3.3.6. Absence de structure support

Au jour de l'évènement, le projet Eraole ne dispose pas d'une équipe de soutien. Le pilote est seul pour gérer le projet depuis de nombreux mois avec quelques aides ponctuelles. Notamment, il n'a pas pu bénéficier du regard d'une personne extérieure pour l'aider dans ce projet et dans l'évaluation des risques associés. Il assure lui-même la maintenance de l'aéronef.

Seul dans le projet Eraole, le pilote ne dispose pas d'une équipe pour l'aider dans la planification des vols et l'évaluation des risques associés, tout comme pour l'entretien de l'aéronef.

2.3.3.7. Faible supervision par l'autorité compétente

2.3.3.7.1. Processus de supervision

L'agence de l'union européenne pour la sécurité aérienne (AESA), autorité primaire de certification pour l'Union Européenne, n'est pas compétente pour les aéronefs spécifiques listés dans l'annexe 1 du règlement de l'Union Européenne n° 1139/2018 (dont les aéronefs spécialement conçus à des fins d'expérience) et délègue leur gestion aux autorités nationales, pour la France la DGAC, et plus particulièrement la DSAC. Celle-ci ne dispose pas de processus spécifique pour gérer ce type d'aéronefs, très rares, qui sont suivis au cas par cas suivant un processus *ad hoc*, qui pour l'Eraole était similaire au processus de délivrance des certificats de navigabilité restreint d'aéronef (CNRA), qui autorise les vols d'aéronefs de construction amateur. Ce type de document ne peut s'appliquer aux aéronefs expérimentaux. Pour leur cas spécifique, le document officiel délivré pour autoriser leurs vols est un laissez-passer provisoire, document qui permet l'autorisation de vol de n'importe quel type d'aéronef. Lorsqu'un laissez-passer provisoire est nécessaire pour autoriser les vols d'un prototype en vue de sa certification, la liste des sujets qu'il faut vérifier pour obtenir ce laissez-passer est défini dans la norme PART 21, sous-partie A (règlement de l'Union Européenne n° 748/2012). Pour les avions expérimentaux, l'autorité nationale est libre de délivrer le laissez-passer si elle estime que le vol peut être réalisé en sécurité.

Dans le cas de l'Eraole, la DSAC a délivré les laissez-passer provisoires sur dossier et en n'exigeant en supplément qu'un essai statique pour vérifier la tenue de la structure des ailes. Aucune analyse de sécurité, aucun manuel de vol ou plan de maintenance, obligatoires pour autoriser les vols des aéronefs certifiés ou prévus de l'être, n'ont été exigés pour délivrer les laissez-passer de l'Eraole. Ces éléments ne sont pas exigés réglementairement pour délivrer un laissez-passer pour ce type d'aéronef. La DSAC a assisté à plusieurs essais au sol avant d'autoriser le vol mais n'en avait pas l'obligation. Une fois les premiers vols autorisés, les renouvellements successifs du laissez-passer provisoire ont été réalisés sur la base d'un compte-rendu des heures de vol effectuées et de l'absence d'incident reporté durant la période de validité du précédent laissez-passer. Les obligations réglementaires de l'autorité habilitée ont été respectées.

L'absence de réglementation européenne pour gérer les vols d'aéronefs expérimentaux laisse les autorités nationales libres d'autoriser ces vols si elles estiment qu'ils peuvent avoir lieu en sécurité pour les tiers. La DSAC n'a pas de processus dédié à ces aéronefs pour la délivrance de laissez-passer provisoire et les gère au cas par cas en s'inspirant du processus permettant la délivrance des certificats de navigabilité restreints d'aéronefs. La DSAC a jugé le niveau de sécurité pour les tiers acceptable, après prise en compte de vérifications supplémentaires notamment sur la tenue de la structure de l'Eraole.

2.3.3.7.2. Exigences réglementaires sur les aptitudes de pilotage peu contraignantes

Pour les vols d'essai d'aéronefs dont la masse maximale au décollage est supérieure à deux tonnes, selon leurs caractéristiques et le type d'essai, la réglementation impose différents niveaux de compétence aux pilotes et ingénieurs navigants réalisant ces essais. Pour les aéronefs dont la masse est inférieure, dont l'Eraole, il n'y a pas d'exigence particulière. Une licence de pilote suffit. Le pilote, titulaire d'une licence de pilote privé et d'une expérience en vol modeste, est donc réglementairement apte à réaliser les vols d'essai de l'Eraole. Nonobstant ce point réglementaire, la DSAC lui a conseillé de faire quelques vols sur avion à train classique pour s'habituer à cette configuration du train d'atterrissage de l'Eraole, que le pilote a réalisés avant les essais de l'Eraole.

Par ailleurs, le pilote a suivi un court stage de sensibilisation aux risques du vol lent (décrochage, vrille) mais n'a aucune formation sur la gestion des risques en vol d'essai.

La réglementation est très peu contraignante sur les compétences nécessaires pour piloter l'Eraole en sécurité.

2.3.3.7.3. Exigences réglementaires de remontée d'information méconnues

Le règlement d'exécution n° 2018/2015 de la commission de l'Union Européenne du 29 juin 2015, établissant une liste classant les événements dans l'aviation civile devant être obligatoirement notifiés conformément au règlement n° 376/2014 du parlement européen et du conseil européen, impose de notifier certains événements aériens, dont :

- impossibilité d'atteindre les performances requises ou escomptées lors du décollage ;
- défaillance ou dysfonctionnement important d'une pièce ou d'une commande d'hélice, de rotor ou de groupe turbomoteur ;
- dysfonctionnement ou défaut du circuit de carburant ayant eu un effet sur l'alimentation et/ou la distribution de carburant ;
- sortie de niveau de vol.

Ce règlement n'est cependant pas applicable aux aéronefs expérimentaux.

L'Eraole s'est trouvé plusieurs fois dans des situations correspondant à au moins l'un des critères cités :

- lors d'un décollage, surchauffe d'un convertisseur de tension entraînant sa mise en sécurité automatique et la perte d'une des deux chaînes de puissance, empêchant tout gain d'altitude et imposant un circuit basse hauteur pour revenir se poser ;
- lors d'un autre décollage, déconnexion intempestive d'une durite du turbo du moteur thermique, limitant la puissance délivrée par la génératrice et ayant des conséquences similaires ;
- pendant un transit de retour d'un meeting aérien, passage dans une zone de forte turbulence provoquant une importante perte d'altitude malgré le déploiement de la pleine puissance (48 kW) ;
- des perturbations électromagnétiques provoquées par les émissions radio sur certaines fréquences ont perturbé les chaînes de puissance et provoqué des pertes d'altitude de plusieurs centaines de pieds.

Le laboratoire Océan Vital n'a fait remonter aucune information à la DSAC sur ces événements. Lors des demandes de renouvellement de laissez-passer provisoire, seul un bilan des heures de vol effectuées était fourni à la DSAC, sans mention non plus de ces événements lorsque la DSAC lui a demandé explicitement s'il y avait eu des incidents, privant l'autorité des informations pertinentes pour évaluer la sécurité et pouvoir renouveler le laissez-passer.

En l'absence de réglementation applicable et malgré des demandes explicites, les événements aériens subis par l'Eraole n'ont pas été notifiés à la DSAC et ont privé cette dernière des informations pertinentes pour évaluer la sécurité lors du renouvellement des laissez-passer temporaires.

3. CONCLUSION

L'évènement est un atterrissage d'urgence non maîtrisé consécutif à une perte de puissance ne permettant pas la poursuite du vol.

#SCP-PP¹³

#ACR¹⁴

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

Le 16 septembre 2020, l'Eraole, avion expérimental hybride électrique, décolle à 8h55 de l'aérodrome de La Roche-sur-Yon Les Ajoncs, pour un vol prévu de huit heures à destination de l'aérodrome d'Aix-les-Milles. Le pilote souhaite participer à un rassemblement d'avions électriques. Contraint par les phénomènes météorologiques à venir, il est limité dans le choix de la date pour le vol de mise en place.

L'Eraole est autorisé au vol par un laissez-passer provisoire délivré par la DSAC. Les limitations de vol définies dans ce document imposent notamment que le vol ait lieu en air calme et sans turbulences et que l'organisme de contrôle soit informé qu'il s'agit de vols d'un aéronef expérimental. La grande surface alaire de l'aéronef le rend très sensible aux turbulences. Sa motorisation ne lui permet pas d'avoir un fort taux de montée et impose des paliers réguliers pour recharger les batteries entre chaque courte montée.

Les prévisions météorologiques indiquent l'apparition de cumulonimbus isolés sur une large zone que la trajectoire prévue par le pilote traverse. Ce dernier, constatant l'apparition de ces nuages sur sa trajectoire, dévie sa route plus au sud. À partir de 14h, le pilote entre dans une zone de turbulences, qui se renforcent. Dès lors, l'aéronef n'est plus en mesure de maintenir son altitude de croisière de 5 000 ft et perd de l'altitude. Le pilote contacte le SIV de Montpellier à 14h14 en s'annonçant comme aéronef prototype électrique sans précision complémentaire. La perte d'altitude s'arrête à 14h35 à 2 400 ft, puis est suivie par une phase où l'altitude est maintenue puis remonte légèrement. En parallèle, le contrôleur propose des terrains de déroutement que le pilote écarte en indiquant ne pas pouvoir les atteindre par manque d'altitude.

Aux environs de 14h55, une défaillance de la génératrice prive l'Eraole de sa principale source d'énergie électrique. L'aéronef entame alors une descente continue avec des performances inférieures à un vol en plané. Le pilote choisit un champ en fond de vallée entouré de vignes et s'en approche pour y effectuer un atterrissage d'urgence. Gêné sur sa trajectoire par une ligne électrique haute tension, il effectue des manœuvres à très faible vitesse, faible hauteur et forte inclinaison pour s'approcher du champ visé. À 15h07, l'Eraole heurte le sol avec l'aile avant-droite et s'arrête un peu plus loin en marche arrière contre un talus.

Le pilote, indemne, appelle le contrôleur par téléphone. Ce dernier déclenche les secours. Le pilote les aide à sécuriser l'aéronef à leur arrivée.

L'Eraole est fortement endommagé.

3.2. Causes de l'évènement

La cause de la perte d'altitude initiale est la traversée d'une zone de turbulence modérée, non compatible avec les performances et le domaine d'emploi autorisé de l'Eraole. Pour autant, en raison de sa forte motivation pour arriver à destination et de sa détermination à poursuivre son vol, le pilote sollicite au maximum la motorisation de l'Eraole pour tenter de continuer la traversée de cette zone. Cette forte sollicitation par temps chaud du convertisseur de tension de la génératrice, conçu pour une utilisation non aéronautique et peu protégé contre les perturbations électromagnétiques, a probablement provoqué sa défaillance. Celle-ci peut avoir été favorisée par un problème de compatibilité électromagnétique avec le poste de radio, présumé résolu. Privé de sa principale source d'énergie électrique et trop éloigné de terrains de déroutement adéquats, l'atterrissage d'urgence s'est imposé au pilote. La rapidité de la descente finale a été aggravée par le faible niveau de charge des batteries, très sollicitées, notamment par la défaillance du convertisseur le temps que celle-ci soit détectée.

¹³ System/Component Failure (Powerplant). Référence : Aviation Occurrence Categories version de mai 2021 de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI).

¹⁴ Abnormal Runway Contact.

Que ce soit lors de la préparation du vol ou pendant celui-ci, le pilote a sous-évalué les risques d'un vol aussi long, survolant des reliefs, et avec des phénomènes météorologiques dangereux pour cet aéronef. Ses expériences passées peuvent expliquer cette prise de risque par une plus grande acceptation du danger. L'absence de structure de support et de soutien ne l'a pas aidé à anticiper et à négocier les risques inhérents au projet.

Enfin, à défaut d'informations pertinentes sur la nature du vol et les spécificités de cet aéronef, le service du contrôle n'a pu aider qu'imparfaitement le pilote dans la conduite de son vol et l'atténuation des risques, que ce soit avant le vol, pendant celui-ci ou après pour la gestion des secours.

Le pilote a été diminué dans ses capacités à gérer la situation par les éléments suivants :

- une focalisation sur l'aspect technique du vol et la recherche d'une cause technique à la descente ;
- la fatigue générée par un vol long ;
- l'ergonomie rudimentaire du cockpit, qui induit une forte charge mentale de travail pour surveiller les systèmes et un délai significatif pour la détection des pannes ;
- un entraînement minimal à l'atterrissage en campagne ;
- une surcharge cognitive en fin de vol, provoquant une dégradation des performances de vol et une approche non maîtrisée menant à l'évènement.

Enfin, l'absence de remontée des faits de sécurité vers l'autorité par le laboratoire Océan Vital n'a pas permis à la DSAC d'avoir un avis parfaitement éclairé sur le niveau de sécurité pour cet aéronef avant la délivrance et le renouvellement de son laissez-passer provisoire.

4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

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

4.1.1. Étude de sécurité et fiabilisation des composants

La défaillance d'un unique élément, non conçu pour un usage aéronautique et dont la fiabilité n'est pas connue, a entraîné un atterrissage d'urgence. Celui-ci a dû être effectué hors de portée d'un terrain adéquat, même si les batteries avaient été totalement chargées. Une étude de sécurité lors de la conception permet de vérifier que la fiabilité des différents composants d'un aéronef, combinée avec la gravité des événements pouvant être la conséquence de leur défaillance, identifie un niveau de risque acceptable. Si un risque est jugé inacceptable, cela doit entraîner une modification de la définition (par exemple, ajout d'une redondance, intégration d'un parachute de cellule, fiabilisation d'un composant) ou l'implémentation de limitations d'utilisation

(par exemple, vol de jour avec vue du sol uniquement, à distance de plané d'un terrain adéquat). Cette étude permet aussi d'aider à définir les procédures d'utilisation et de gestion des pannes.

Une étude de risque peut aussi être faite en utilisation, avant chaque vol, afin d'évaluer si les risques associés à un vol particulier (par exemple, survol d'un milieu montagneux) sont acceptables et de mettre en place des limitations opérationnelles adaptées (par exemple, choix d'une altitude de vol plus élevée, choix d'une route permettant de rester à proximité de terrains de déroutement).

En conséquence, le BEA-É recommande :

au laboratoire Océan Vital, pour la conception et l'emploi d'aéronefs ou d'éléments destinés à être installés à bord d'aéronefs, de réaliser une étude de sécurité permettant d'évaluer les risques puis d'en déduire et d'implémenter les stratégies permettant d'avoir un niveau de risque acceptable (modification de la conception, limitations d'utilisation).

R1 – [C-2020-10-A] Destinataire : laboratoire Océan Vital

4.1.2. Processus de délivrance du laissez-passer

Les aéronefs expérimentaux, par nature, introduisent des nouveaux concepts ou de nouvelles technologies dans le monde aéronautique. Il est difficile de définir a priori les exigences permettant de garantir un niveau de risque acceptable avant la délivrance du laissez-passer. Avoir une liste des domaines et points critiques à vérifier peut cependant aider dans une évaluation plus fiable du niveau de risque.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à la DSAC, de préciser le processus de délivrance des laissez-passer pour les aéronefs expérimentaux.

R2 – [C-2020-10-A] Destinataire : DSAC

4.1.3. Contact préalable avec le contrôle

Dans les laissez-passer provisoires délivrés pour permettre les vols de l'Eraole, la DSAC indique dans les limitations que « l'organisme de contrôle doit être informé qu'il s'agit de vols d'un aéronef expérimental ». La DSAC entendait par là qu'un contact préalable au vol doit être effectué pour que les contrôleurs gérant les espaces à travers lesquels vole l'Eraole aient connaissance des spécificités de cet aéronef. Le pilote n'avait pas conscience de cette attente. Fort de ce constat, en plus d'un contact préalable pour permettre de communiquer les informations utiles aux contrôleurs, il peut être opportun d'imposer pour ce type d'aéronef un dépôt de plan de vol, permettant d'assurer un meilleur suivi du vol et d'avoir une anticipation au niveau des services de contrôle aérien et pour l'organisation éventuelle des secours.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à la DSAC, lors de la délivrance de laissez-passer pour un aéronef expérimental, de préciser la forme et le contenu que doivent avoir les contacts préalables à un vol de l'aéronef concerné.

R3 – [C-2020-10-A] Destinataire : DSAC

à la DSAC, dans les limitations des laissez-passer pour les aéronefs expérimentaux, d'imposer le dépôt d'un plan de vol pour chaque vol de navigation ainsi que la mention dans celui-ci de la présence de batteries de forte capacité et fort voltage le cas échéant.

R4 – [C-2020-10-A] Destinataire : DSAC

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

4.2.1. Remontée d'information d'évènement aérien

Le laboratoire Océan Vital n'a fait remonter aucune information à la DSAC sur les évènements aériens rencontrés, y compris sur l'accident objet de ce rapport. Lors des demandes de renouvellement de laissez-passer provisoire, seul un bilan des heures de vol effectuées était fourni, sans mention d'un quelconque incident, privant l'autorité des informations pertinentes pour évaluer la sécurité et pouvoir renouveler le laissez-passer. Le règlement d'exécution n° 2018/2015 de la commission de l'Union Européenne du 29 juin 2015, établissant une liste classant les évènements dans l'aviation civile devant être obligatoirement notifiés conformément au règlement n° 376/2014 du parlement européen et du conseil européen, impose de remonter au plus tôt ce type d'évènement, mais n'est pas applicable pour les aéronefs expérimentaux. Une exigence similaire peut cependant être introduite dans les conditions de validité du laissez-passer.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à la DSAC, d'imposer dans les laissez-passer provisoires des obligations de remontée d'information des évènements aériens.

R5 – [C-2020-10-A] Destinataire : DSAC