



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

BEAD-air

Bureau enquêtes accidents défense air

RAPPORT D'ENQUÊTE DE SÉCURITÉ



BEAD-air-T-2013-011-A

Date de l'événement 4 septembre 2013

Lieu Camp de Canjuers (83)

Type d'appareil Système de drone DRAC

Immatriculation F-158

Organisme Armée de terre

Unité Batterie de reconnaissance de brigade, batterie Oisans

AVERTISSEMENT

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'événement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'analyse des causes possibles de l'événement fait l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes retenues. Enfin, des recommandations sont présentées dans le dernier chapitre. Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heures locales.

UTILISATION DU RAPPORT

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 à l'esprit des règlements et relève de la responsabilité de son utilisateur.

CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS

Page de garde : armée de terre

- Pages : 7, 10, 16, 17, 18, 23 et 25 : BEAD-air
- Pages 10, 11 et 12 : armée de terre
- Pages 28 et 29 : Airbus Defense and Space

TABLE DES MATIERES

CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS	2
TABLE DES MATIERES	3
GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS	5
1. Renseignements de base	6
1.1. Déroulement du vol	6
1.2. Tués et blessés	8
1.3. Dommages à l'aéronef	8
1.4. Autres dommages	8
1.5. Renseignements sur le personnel	9
1.6. Renseignements sur le système DRAC	10
1.7. Conditions météorologiques	14
1.8. Aides à la navigation	15
1.9. Télécommunications	15
1.10. Renseignements sur le point de poser programmé	15
1.11. Enregistreurs de bord	15
1.12. Renseignements sur l'épave et sur l'impact	15
1.13. Renseignements médicaux et pathologiques	18
1.14. Incendie	18
1.15. Questions relatives à la survie des occupants	18
1.16. Essais et recherches	18
1.17. Renseignements sur les organismes	19
1.18. Renseignements supplémentaires	20
1.19. Techniques spécifiques d'enquête	21
2. Analyse	23
2.1. Séquence d'événement	23
2.2. Facteurs humains	26
2.3. Facteurs environnementaux	27
2.4. Facteurs techniques	27
3. Conclusion	31
3.1. Eléments établis utiles à la compréhension de l'événement	31
3.2. Causes de l'événement	31
4. Recommandations de sécurité	33
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'événement	33
4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement	33

GLOSSAIRE

BRB :	Batterie de reconnaissance de brigade
CPUT	Consignes permanentes d'utilisation du terrain
CUJ :	Charge utile jour
DGA :	Direction générale de l'armement
DRAC :	Drone de renseignement au contact
EEPROM :	<i>Electrically erasable programmable read only memory</i>
FPGA :	<i>Field programmable gate array</i>
LD :	Liaison de données
ODVC :	Opérateur de vol confirmé
PPP :	Point de poser programmé
RA :	Régiment d'artillerie
RAM :	<i>Random access memory</i>
SAM :	suivi acquisition mission
SCV :	Suivi conduite de vol
TLD :	Terminal de liaison de données
VA :	Véhicule aérien

SYNOPSIS

Date de l'événement : 4 septembre 2013 à 15h50

Lieu de l'événement : camp de Canjuers

Organisme : armée de terre

Commandement organique : commandement des forces terrestres

Unité : batterie de reconnaissance de brigade (BRB), Batterie Oisans

Aéronef : drone de renseignement au contact (DRAC) – pod¹ F-158

Nature du vol : vol d'entraînement

Résumé de l'événement selon les premiers éléments recueillis

Lors d'un vol d'entraînement, en l'absence d'alarmes, les écrans de suivi de trajectoire se figent. L'équipage perd le contrôle du véhicule aérien (VA) qui percute un arbre.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- Un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents défense air (BEAD-air).
- Un enquêteur adjoint au directeur d'enquête du BEAD-air.
- Un expert technique du BEAD-air.
- Un instructeur chef d'équipe drone.
- Un instructeur « servant drone ».

Autres experts consultés

- Constructeur de l'aéronef – Cassidian
- Direction générale de l'armement techniques terrestres (DGA/TT)

Déclenchement de l'enquête de sécurité

Le BEAD-air a été informé le 5 septembre 2013 à 8h57 par appel téléphonique de la brigade de gendarmerie de l'air de Cuers. L'équipe d'enquête s'est rendue sur place le jour même.

¹ Pod : terme anglais pour nacelle

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

Contexte du vol

L'unité effectue un exercice de maintien de qualification sur le terrain de Canjuers du 2 au 5 septembre. Ce vol est le deuxième vol du jour de l'équipage.

1.1.1. Mission

Type de vol : CAM T

Type de mission : entraînement

Dernier point de départ : zone 4 secteur «DE»² sur le terrain du camp de Canjuers

Heure de lancement prévue : 15h00

Durée prévue de vol : 1h00

Zone d'évolution : zones LF R138

Point de récupération prévue : zone 4 secteur «DE» sur le terrain du camp de Canjuers (proche du site de lancement)

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

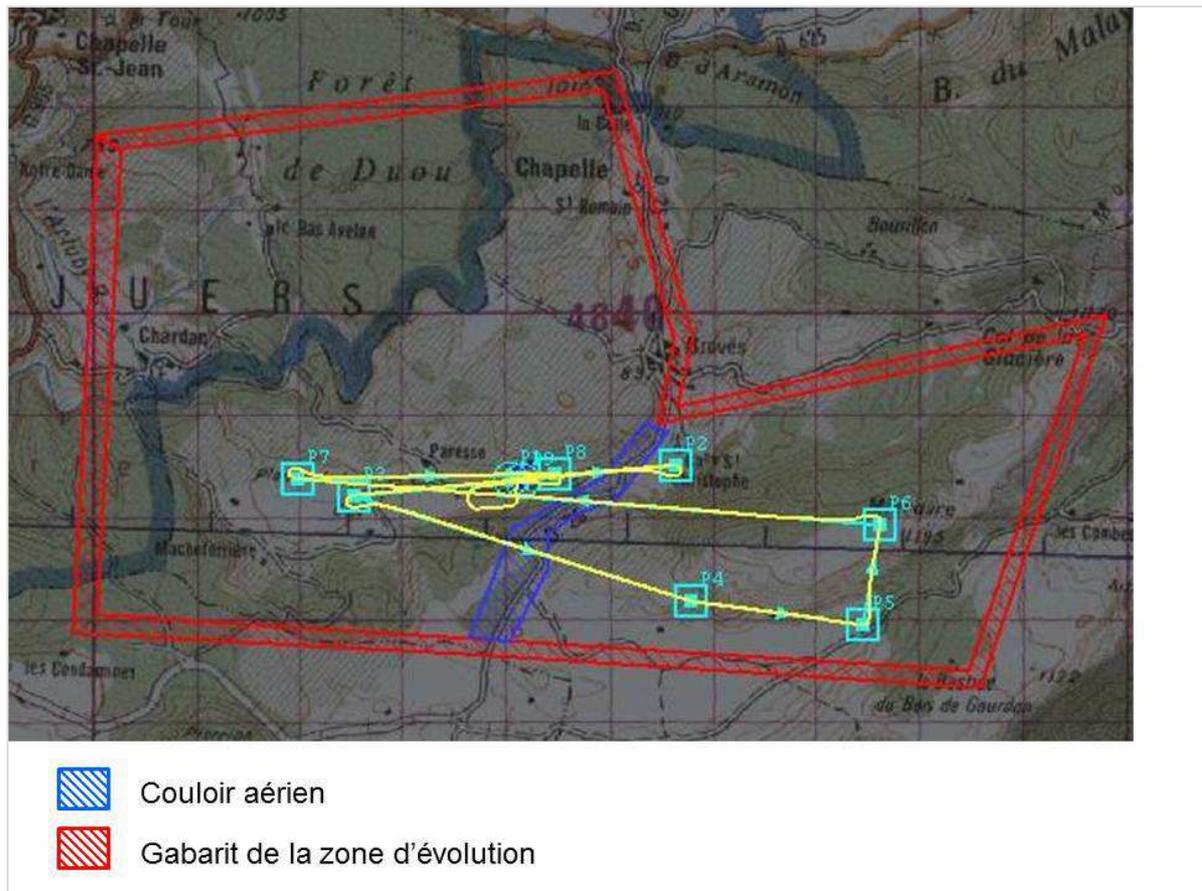
L'objectif de la mission d'entraînement est de reconnaître deux sites : un village reconstitué et un observatoire.

L'équipage commence la préparation du système pour un vol initialement prévu à 10h00. Il assemble le VA, charge les cartographies de la zone et les différents points de passage qui constituent le plan de vol, rentre les gabarits de la zone de vol comme aide visuelle et compile le plan de vol.

Lors de la préparation du système, des problèmes de synchronisation entre les stations sols et le terminal de liaisons de données (TLD) sont constatés. Le chef de détachement décide de repousser le vol à 15h30.

La préparation reprend vers 15h00. L'équipage effectue un relevé météorologique avec la station portative. Les conditions permettent un lancer manuel. La préparation continue jusqu'au test du moteur. A 15h19, le VA est lancé manuellement face au vent.

² Le site de Canjuers est découpé en plusieurs zones et secteurs suivant le type d'activité avec chacune son gabarit de sécurité suivant l'activité. La zone 4 secteur « DE » peut être utilisé par les drones



Plan de vol

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

Vers 15h48, alors que le VA termine un deuxième hippodrome dans le sens antihoraire, l'alarme de la tension moteur droit s'allume durant une quinzaine de secondes. Elle repasse au vert durant une minute et se rallume durant une quinzaine de secondes. L'équipage décide d'écourter la mission et de faire un retour sur le point de poser programmé (PPP).

Pour cela, il active le mode de fonctionnement « suivi de plan de vol ». Le chef de détachement a ainsi le temps de demander par téléphone l'autorisation de franchir le couloir aérien qui traverse la zone d'évolution. L'autorisation est accordée.

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

Vers 15h50, après 31 minutes de vol et le passage du point P6, la commande de retour sur le PPP est validée. Le chef d'équipe s'aperçoit après quelques secondes que sa fenêtre de suivi trajectographique du DRAC est figée. Sa fenêtre vidéo est toujours active. L'opérateur rend compte que sa fenêtre est également figée. L'équipage ne constate aucune alarme de perte de liaison de données.

Deux minutes plus tard (temps estimé d'arrivée du DRAC sur le PPP), ne voyant pas arriver le DRAC, l'équipage débranche l'alimentation du terminal espérant ainsi forcer le retour du drone.

A 16h04, le chef de détachement rend compte à l'officier 3D du camp par téléphone de la perte du VA. A 16h07, un ratissage est organisé. A 16h48, une fumée est aperçue. Le VA est retrouvé par les pompiers vers 19h30.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France
- département : Var (83)
 - commune : Monferrat
 - coordonnées géographiques :
 - 43° 39' 13,27 N
 - 6° 34' 45,64 E
 - altitude du lieu de l'événement : 952 mètres
- Moment : jour

1.2. Tués et blessés

Néant

1.3. Dommages à l'aéronef

Aéronef	Disparu	Détruit	Endommagé	Intègre
DRAC VA F-158		X		

1.4. Autres dommages

L'incendie consécutif à l'accident s'est propagé à la végétation sur le site de l'impact. La végétation a été brûlée sur une superficie de 4,5 hectares.

1.5. Renseignements sur le personnel

1.5.1. Chef d'équipe

- Unité d'affectation : 93^{ème} régiment d'artillerie de montagne, BRB batterie Oisans
- Qualification : opérateur de vol confirmé (ODVC) obtenue le 24 novembre 2011
- Formation : stage chef d'équipe terminée le 24 novembre 2011
- Total des vols et des heures de mise en œuvre du DRAC par l'opérateur:

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	Nombre de vols	Heures de vol	Nombre de vols	Heures de vol	Nombre de vols	Heures de vol
Total	39	15h33	12	5h22	1	0h16
Dont en tant que SAM	17	6h51	6	2h53	1	0h16
Dont en tant que SCV	22	8h42	6	2h29	0	0h00

- Date du dernier vol : 3 septembre 2013

1.5.2. Opérateur drone

- Unité d'affectation : 93^{ème} régiment d'artillerie de montagne, BRB batterie Oisans
- Qualification : ODVC le 24 avril 2013
- Formation : stage de formation de spécialité élémentaire DRAC terminée le 24 avril 2013
- Total des vols et des heures de mise en œuvre du DRAC par l'opérateur:

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	Nombre de vols	Heures de vol	Nombre de vols	Heures de vol	Nombre de vols	Heures de vol
Total	12	5h31	12	5h31	1	0h14
Dont en tant que SAM	4	2h08	4	2h08	0	0h00
Dont en tant que SCV	8	3h23	8	3h23	1	0h14

- Date du dernier vol : 3 septembre 2013

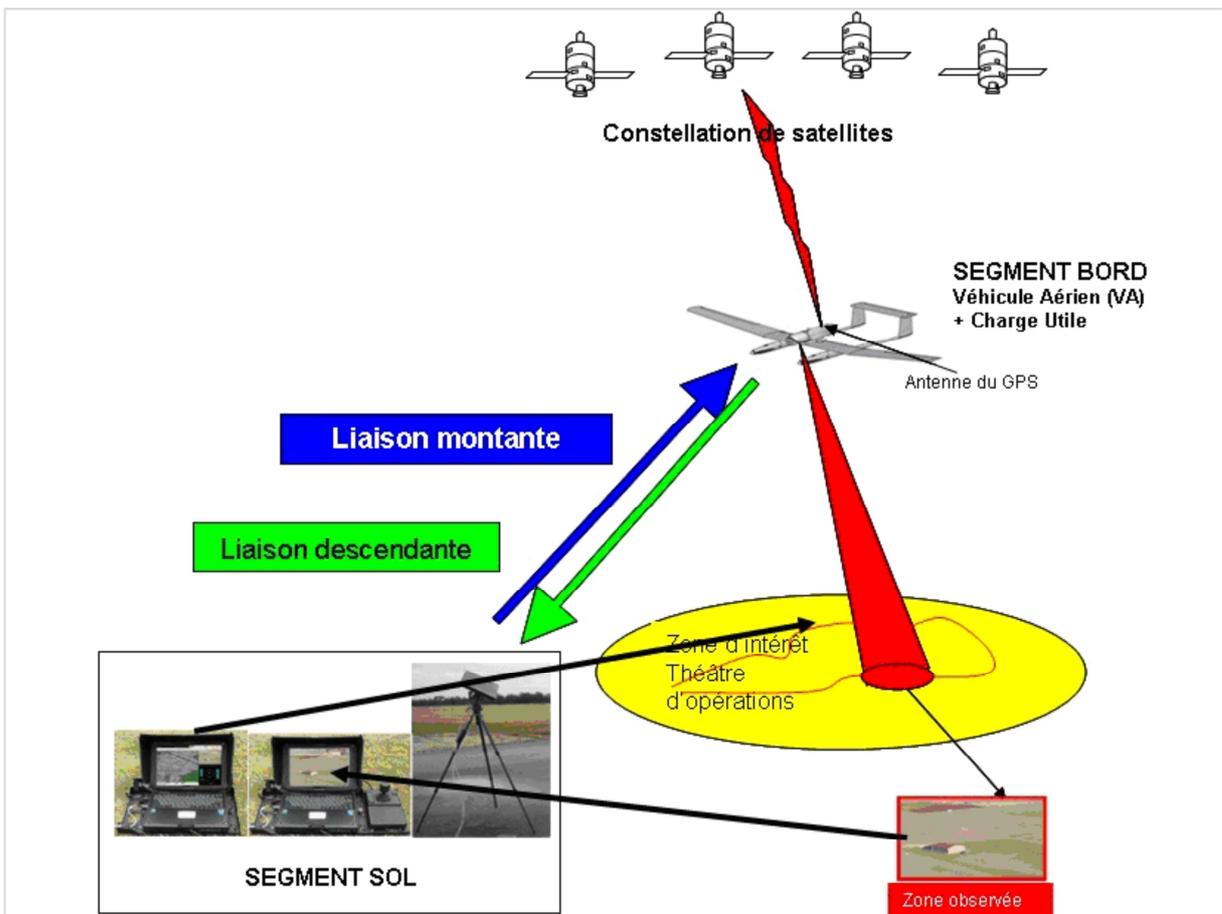
1.6. Renseignements sur le système DRAC

Le système DRAC a pour objectif la reconnaissance d'une zone d'intérêt. Il se décompose en deux segments :

- un segment sol composé d'une station suivi conduite de vol (SCV), d'une station suivi acquisition mission (SAM) et d'un terminal de liaison de données (TLD) ;
- un segment bord composé du porteur équipé de deux moteurs électriques, d'un pod regroupant la charge utile et le système de commande.

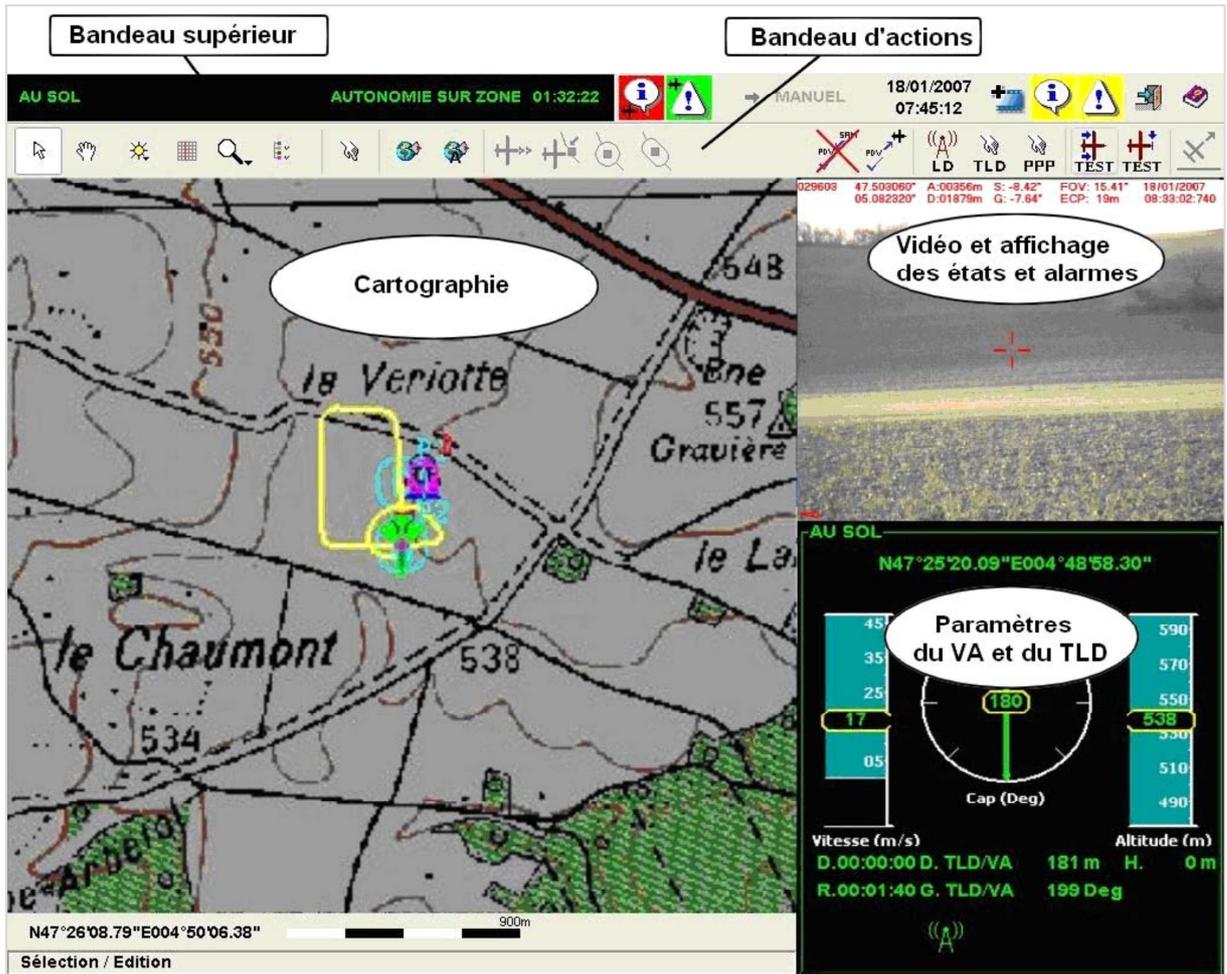


Segment bord



Principe de fonctionnement du DRAC

L'opérateur SCV a en charge le pilotage du VA qui peut être effectué de manière automatique (suivi du plan de vol), semi-automatique (réalisation de figures en entrant des paramètres simples) ou manuelle (consignes de vitesse, hauteur et cap).

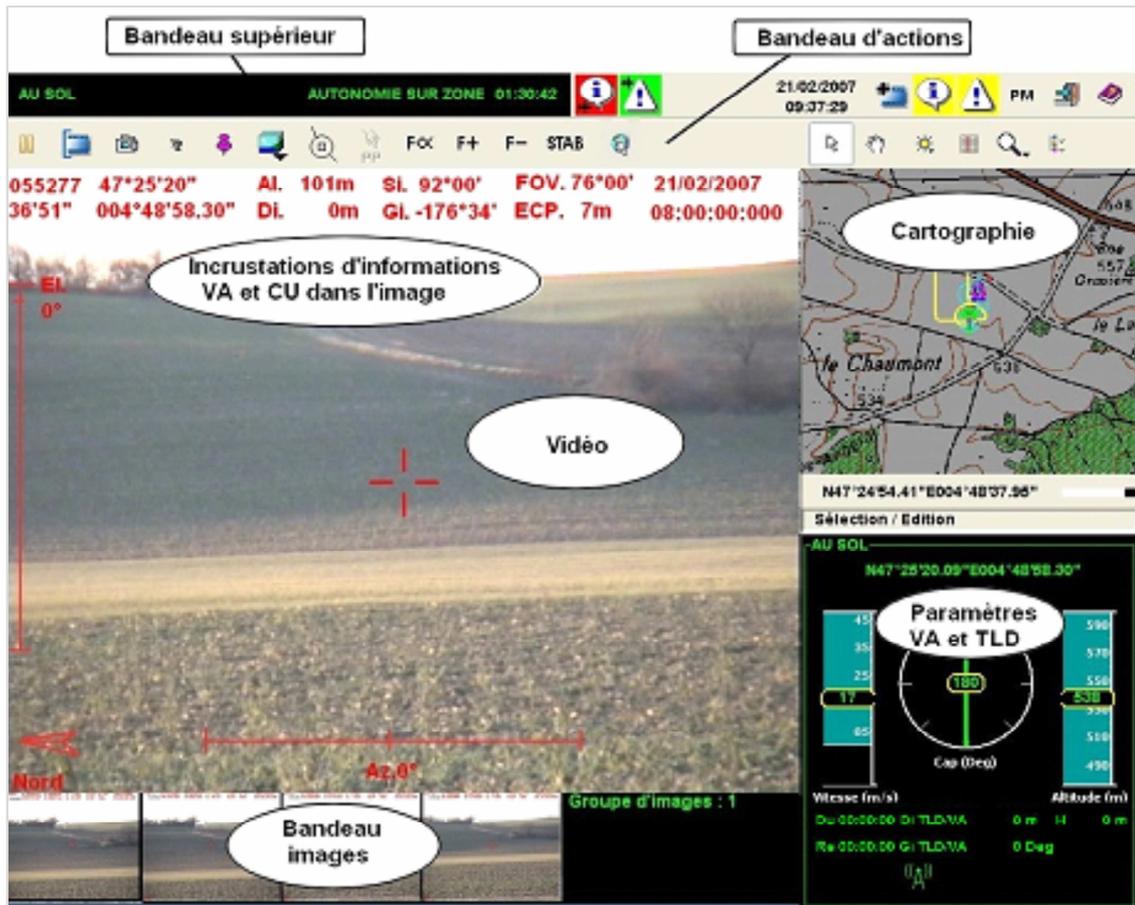


Présentation de l'écran SCV

Indication de l'état du VA	 États système
 Indication des alarmes du VA	 Alarmes systèmes

Les témoins d'alarme changent de couleur lors de l'apparition d'une panne : orange ou rouge suivant l'importance de la panne.

L'opérateur SAM est chargé de la réalisation de la mission. Il pilote la caméra de la charge utile, capable de photographier et de filmer.



Présentation de l'écran SAM

- Organisme : armée de terre
- Commandement organique (ou opérationnel) d'appartenance : commandement des forces terrestres
- Base de stationnement : 93^{ème} régiment d'artillerie de montagne de Varcès
- Unité d'affectation : batterie de renseignement de brigade
- Type d'aéronef : DRAC
 - configuration : le DRAC est équipé d'une caméra visuelle : charge utile jour (CUJ)
 - stations sols : deux PC portables Panasonic CF19
 - armement : sans objet
- caractéristiques :

	Type - série	Numéro	Temps de vol depuis sa réparation
Pod	7511648X00	F158	40 min

1.6.1. Maintenance

Le VA porteur du pod numéro F-158 a été livré à l'armée de terre en janvier 2010. Il a effectué plusieurs vols opérationnels jusqu'en novembre 2010 où il a été accidenté, ce qui nécessite une réparation chez le constructeur pour un problème moteur combiné à une mauvaise gestion par l'opérateur du « mode dégradé ».

Les opérations suivantes ont été réalisées :

- réparation de la structure ;
- remplacement des fixations du pod au plan central ;
- réparation du berceau électronique ;
- contrôle de compatibilité électromagnétique ;
- changement du connecteur de l'antenne omnidirectionnelle.

Aucun endommagement des composants électroniques n'a été constaté. Le pod a subi des tests avant et après réparation au cours desquels aucune défaillance matérielle ni fonctionnelle n'a été détectée.

Il a été rendu à l'armée de terre en avril 2013 après le contrôle en vol de son fonctionnement.

La maintenance du DRAC est réalisée conformément aux programmes d'entretien en vigueur dans l'armée de terre.

1.6.2. Performances

Les performances du système DRAC sont résumées dans le tableau ci-après.

Caractéristiques	Performances
Autonomie du VA	environ 90 minutes pour une vitesse air de 17m/s
Vitesse maximale du VA par rapport à l'air	25 m/s
Vitesse du vent au sol au décollage	14 m/s au maximum
Vitesse du vent en vol	20 m/s au maximum
Altitude maximale	3 000 m
Montée continue du VA en vol	750 m au maximum
Température d'utilisation	- 5 °C à + 45 °C
Portée	10 km

1.6.3. Masse et centrage

La masse du VA avec CUJ est d'environ 8,35 kg.

La masse et le centrage sont dans les normes.

1.6.4. Source d'énergie interne

Les composants du système DRAC sont alimentés de la manière suivante :

Caractéristiques des batteries alimentant les composants du système DRAC

Module alimenté	Moteur VA x 2	Pod	Stations SCV et SAM	TLD
Batterie	BATMOT	BATPOD	BATPC	BATLD
Type	Lithium polymère	Lithium polymère	Lithium Ion	Lithium polymère
Référence	7514461Y00	7514459W00	CF-VZSU48U	7514460X00
Tension Nominale (V)	14,8	11,1	10,65	14,8
Capacité à 20°C (mAh)	10 800	5 600	5 700	5 400

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Le camp de Canjuers n'est pas équipé de service météorologique Météo-France. Le chef de détachement a consulté le bulletin météo de la station du Cannet des Maures conformément à la procédure.

Les prévisions météorologiques permettaient la réalisation du vol.

1.7.2. Information de vent sur les sites de lancement et récupération

L'équipage a été informé des conditions météorologiques sur le site de lancement par la station météorologique portative en dotation.

Les valeurs relevées avant le lancement sont :

- vent au sol 080° 3 à 5 m/s ;
- température 27°C.

Ces conditions permettaient la réalisation du vol et un lancer manuel.

1.7.3. Information de vent en vol

Le système de navigation du VA calcule un vent à l'altitude de vol. Ce paramètre est accessible à l'équipage. Le vent moyen constaté durant le vol est de 6,5 m/s de secteur Sud Sud-Est.

1.8. Aides à la navigation

Le VA suit un plan de vol programmé qui peut être modifié durant le vol. La position du VA est affichée sur les écrans des opérateurs. Cette information de position est mise à jour via la liaison de données descendante qui transmet notamment les coordonnées GPS du VA.

1.9. Télécommunications

Pour les vols effectués sur le site du camp de Canjuers, le chef de détachement et l'officier 3D du camp sont en communication par téléphone portable ou par liaison radio VHF.

1.10. Renseignements sur le point de poser programmé

La zone d'atterrissage (zone rectangulaire de 90m x30m) sur laquelle se situe le PPP est plane. Elle a été nettoyée en début d'exercice, conformément à la réglementation en vigueur MAT16 535/1.

1.11. Enregistreurs de bord

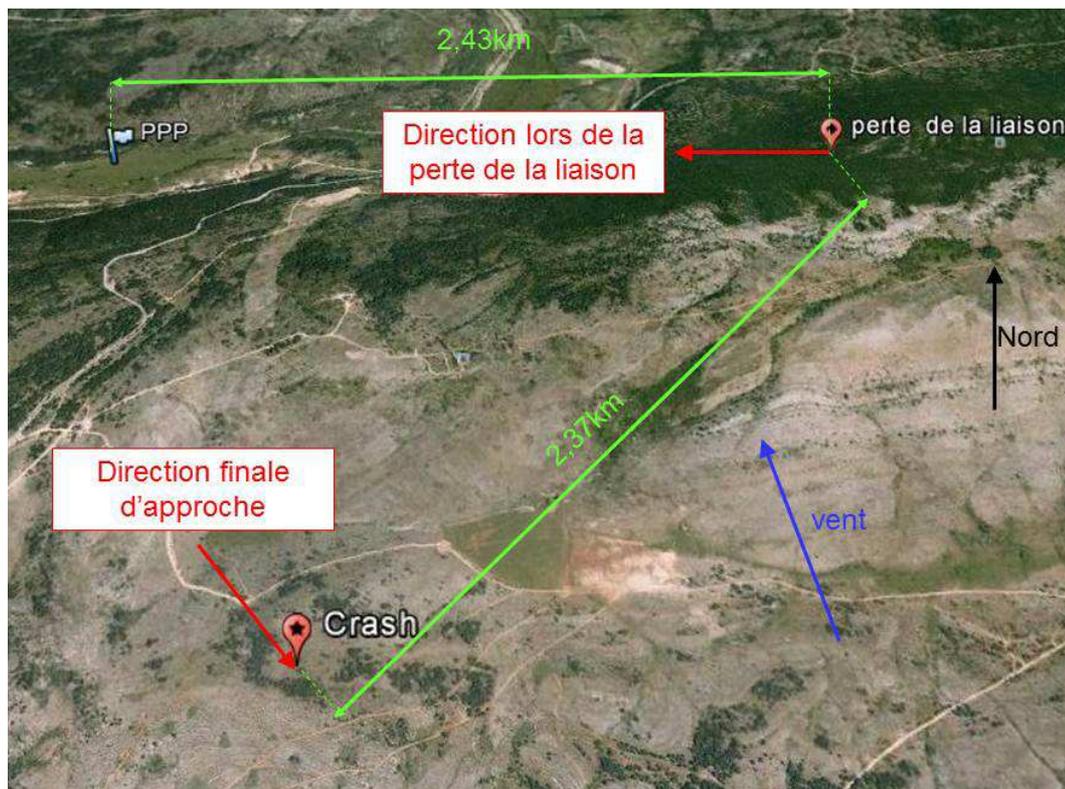
Le pod numéro F158 est équipé d'un enregistreur de paramètres de vol. Les données ont été exploitées par les équipes de Cassidian.

Les paramètres et la vidéo sont enregistrés sur les stations SAM et SCV. Elles ont été exploitées par les experts du 61^{ème} RA et les équipes de Cassidian.

1.12. Renseignements sur l'épave et sur l'impact

1.12.1. Examen de la zone

Le VA s'est encastré dans un arbre à une hauteur de trois mètres. La zone a pris feu suite à l'impact des batteries sur le sol. L'épave est éloignée de la trajectoire du retour.



Environnement du lieu de l'accident

1.12.2. Examen de l'épave



Vue générale du VA dans l'arbre

Premières constatations :

- dans l'arbre :
 - l'aile droite, l'intrados du plan central et une partie du fuselage ont brûlé ;
 - la charge utile jour a basculé vers l'avant ;
 - la batterie de la charge utile est endommagée ;
 - l'attitude de l'appareil est de 5° à piquer et de 15° en roulis, avec un gisement de 140°;
 - le fuselage droit est rompu entre l'empennage et le plan central ;
- au sol :
 - le moteur droit, son hélice et ses blocs batteries sont brûlés et solidaires ;
 - le moteur gauche, son hélice et ses blocs batteries sont brûlés et dispersés ;
 - la caméra visuelle, son support et son électronique sont brûlés et solidaires.



Épave au sol



Moteur droit et ses batteries ainsi que la CUJ



Enregistreur

1.13. Renseignements médicaux et pathologiques

Le chef d'équipe et l'opérateur drone sont à jour de leur visite révisionnelle du personnel (VRP).

1.14. Incendie

Sans objet.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants

Sans objet.

1.16. Essais et recherches

Les expertises et études réalisées sont :

- l'exploitation des paramètres issus des stations sol et de l'enregistreur de bord ;
- l'exploitation et la réparation de la vidéo issue de la station SAM et SCV ;
- l'expertise du magnétomètre ;
- une étude d'inter-visibilité entre le VA et le TLD et une analyse de la qualité de liaison de données ;
- l'expertise de la carte autopilote.

1.17. Renseignements sur les organismes

1.17.1. Batterie Oisans

La BRB du 93^{ème} régiment d'artillerie de montagne : la batterie Oisans met en œuvre des systèmes DRAC au profit des autres unités. Elle a pour mission de :

- renseigner ;
- surveiller ;
- éclairer ;
- acquérir des objectifs.

Les règles et procédures d'exécution des vols de drones de la défense en circulation aérienne militaire en temps de paix sont régis par l'instruction DIRCAM n° 1550 entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2010. Les modalités d'organisation de l'activité aérienne pour chaque régiment mettant en œuvre des drones font l'objet de consignes permanentes opérationnelles (CPO, version de 2011 en vigueur lors de l'accident).

Une activité aérienne en conformité avec la réglementation n'est pas possible sur le site de Varcès. Ainsi, les séances d'entraînement en unité se limitent à l'ensemble des étapes de la préparation de la mission jusqu'aux tests moteurs du VA avant le lancement. L'activité aérienne du régiment est effectuée sur d'autres camps lorsque les vols sont possibles.

La modification des conditions d'utilisation du DRAC du 26 juillet 2013 N°559795/DEF/EMAT/PP/BPSA/OFP HELI/NP rend possible une activité à proximité du site, le régiment est en cours de recherche d'une zone propice à l'activité DRAC.

1.17.2. Contexte réglementaire et organisation de l'activité drones dans les zones LF-R138

Concernant l'activité DRAC au camp de Canjuers, l'anticollision est réalisée par ségrégation de l'espace aérien. Les vols sont effectués en CAM T sans suivi radar et sans organisme de contrôle de la circulation aérienne, dans un volume d'évolution restreint à un espace aérien réservé.

Les modalités d'organisation de l'activité aérienne sur le terrain du camp de Canjuers sont complétées par des consignes permanentes d'utilisation du terrain (CPUT, version du 12 février 2009 en vigueur le jour de l'accident) qui précisent notamment :

- les modalités d'activation des zones LF-R138 et LF- R138T ;
- les sites d'implantation et d'installation ;
- les volumes d'évolutions.

Dans le cadre de l'exercice, la zone LF-R138 est active les 3 et 4 septembre 2013.

Sur le site de Canjuers, des hélicoptères utilisent une route départementale pour matérialiser leur couloir aérien. La zone 4 est traversée par cette route. Avant de franchir la route, les opérateurs doivent en demander l'autorisation à l'officier 3D du camp. Cette consigne n'est pas formalisée mais est respectée.

1.18. Renseignements supplémentaires

1.18.1. Procédure en cas de perte de liaison de données

« En mode nominal, la station sol envoie une consigne de positionnement vers l'antenne directive en site et en azimuth, calculée directement à partir de la position courante de l'avion reçue via les messages de télémessure. Si la position de l'avion n'est plus connue (cas où les télémessures ne sont plus reçues), la station sol continue à positionner l'antenne directive pendant 10 secondes à partir d'une estimation de position de l'avion calculée au sol. Si au bout de 10 secondes, aucune nouvelle position de l'avion n'est transmise, l'antenne directive reste pointée dans la direction courante. En cas de perte de communication (panne simple) avec le sol pendant 10 secondes, le VA doit passer en mode dégradé système « perte de liaison de données (LD) ».

La première étape du mode dégradé système « perte de LD » consiste à monter en hélice décrivant un cercle de rayon 130 m au-dessus du point où la liaison a été interrompue et en tournant dans le vent d'une hauteur de 50 mètres, ou 2 minutes (si le VA n'a pas atteint les 50 m). Cette montée n'est pas effectuée si la perte LD survient alors que le VA est déjà en perte GPS. Le système comporte un dispositif permettant à l'antenne TLD de se recalculer en fonction du signal reçu sur la position de l'avion, y compris en mode dégradé (perte de liaison de données).

Si la liaison est rétablie, la mission reprend à partir de cette nouvelle altitude.

Si la liaison n'est pas rétablie, le VA revient automatiquement au point d'atterrissage programmé à vitesse minimale (17 m/s) et déclenche un atterrissage automatique. » Mat16 535/1

1.18.2. Cas particulier des doubles pannes

Certaines doubles pannes conduisent le VA à passer en mode « crash contrôlé ». Le tableau ci-dessous indique les combinaisons.

2 ^{ème} panne 1 ^{ère} panne	Perte LD	Panne moteur G	Panne moteur D	Perte GPS	Panne magnétomètre	Panne baromètre
Perte LD		X	X	X (si perte LD>15s)	X	
Panne moteur G	X		X			
Panne moteur D	X	X				
Perte GPS	X (si perte LD>15s)				X	X
Panne magnétomètre	X			X		
Panne baromètre				X		

Cas des doubles pannes

Le « crash contrôlé » se traduit par le braquage fixe des gouvernes et l'arrêt des moteurs pour passer en vol en spirale en piquer. Le VA s'écrase à la verticale du lieu de déclenchement (plus la dérive au vent).

1.18.3. Historique des cas similaires rencontrés

Trois cas de pertes de contrôle et d'écran figé ont été rapportés par les utilisateurs. Des expertises ont été menées sur ces événements. Pour deux d'entre eux, les causes de l'accident sont connues.

Le troisième a beaucoup de similarités avec cet événement. Il concerne le pod F102. Les opérateurs ont rendu compte que l'image de la caméra s'est figée et qu'une alarme perte de liaison autopilote est apparue. Le VA a poursuivi son vol et s'est écrasé par la suite.

Le scénario d'endommagement n'a pu être défini avec certitude. Les expertises menées ont révélé un court-circuit de l'alimentation d'entrée du pod. Une défaillance d'un composant du circuit d'alimentation de la carte autopilote en est à l'origine. Ce court-circuit a généré l'arrêt et la réinitialisation de l'autopilote entraînant la perte du VA. Ce type de panne a vraisemblablement empêché le déclenchement d'un crash contrôlé, conduisant le VA à poursuivre sa trajectoire sans contrôle jusqu'à son écrasement.

1.19. Techniques spécifiques d'enquête

Sans objet.

PAS DE TEXTE

2. ANALYSE

L'événement est une perte de contrôle de l'appareil avec figement des écrans de suivi trajectographique, sans alarme affichée.

L'analyse qui suit s'appuie sur les constatations, les témoignages des opérateurs et les résultats des expertises.

Elle présente la séquence d'événement, puis les causes de la perte de contrôle dans les domaines des facteurs humains, environnementaux et techniques.

2.1. Séquence d'événement

2.1.1. Journal des événements

L'analyse des paramètres et du journal d'alarme montre le déroulement d'événement suivant :

Heure	Événement
15h18min57s	Décollage
15h20min36s	Alarme qualité de liaison de données dégradée active durant 11 secondes
15h21min01s	Passage de P2
15h23min51s	Passage de P3
15h24min27s	Réalisation d'hippodromes
15h26min46s	Alarme qualité de liaison de données dégradée active durant 9 secondes
15h31min25s	Alarme qualité de liaison de données insuffisante active durant 9 secondes
15h32min05s	Alarme qualité de liaison de données dégradée active durant 10 secondes
15h33min22s	Alarme qualité de liaison de données dégradée active durant 10 secondes
15h33min24s	Reprise suivi de plan vol vecteur direction P4
15h34min01s	Alarme qualité de liaison de données dégradée active durant 11 secondes
15h38min24s	Début des hippodromes sur l'objectif
15h45min28s	Alarme qualité de liaison de données insuffisante active durant 10 secondes
Non enregistré	Alarme tension moteur droit perçue par les opérateurs durant environ 15 secondes, elle n'apparaît pas dans le journal des alarmes
Environ 1 min après	Alarme tension moteur droit perçue par les opérateurs durant environ 15 secondes, elle n'apparaît pas dans le journal des alarmes
15h50min02s	Le VA est envoyé sur P5, reprise du suivi du plan de vol
15h50min18s	Alarme qualité de liaison de données insuffisante active durant 11 secondes
15h51min36s	L'alarme tension moteur droit faible apparaît, elle dure 34 secondes*
15h52min15s	L'alarme tension moteur droit faible s'active durant 2 secondes*

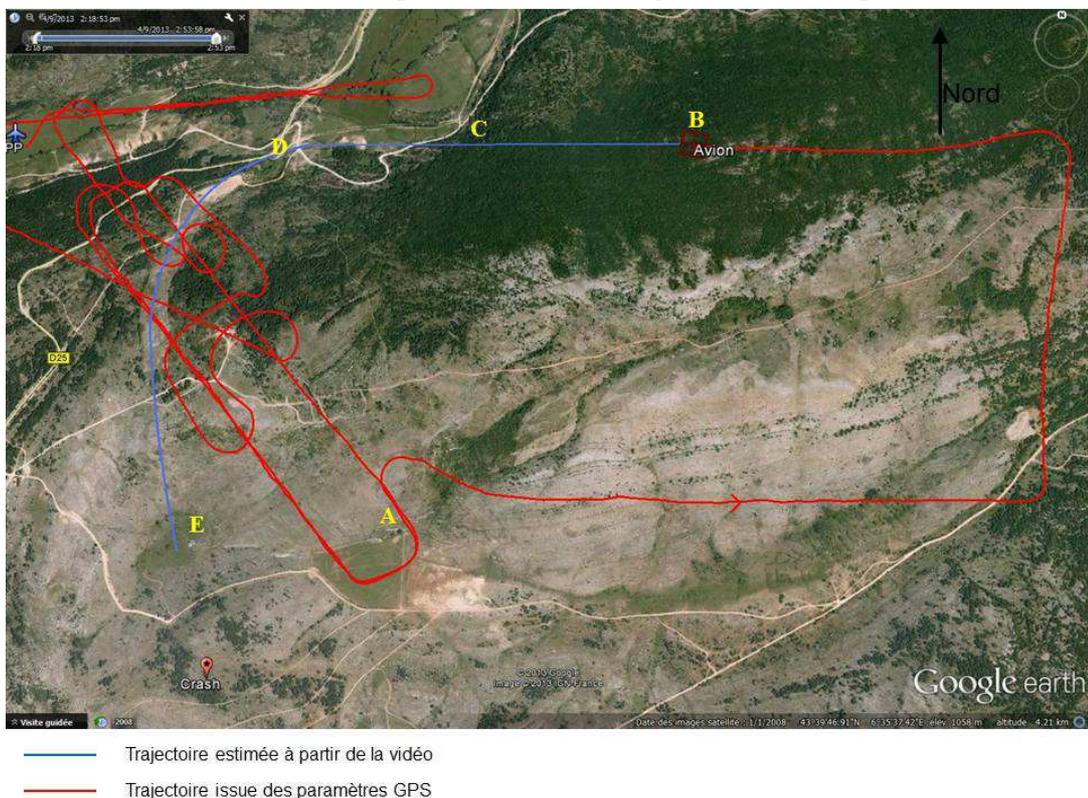
Heure	Evénement
15h52min18s	L'alarme tension moteur droit faible s'active durant 3 secondes*
15h52min23s	L'alarme tension moteur droit faible réapparaît, elle dure 24 secondes*
15h53min00s	Alarme qualité de liaison de données insuffisante apparait
15h53min07s	La commande retour sur le point de poser programmé est validée
15h54min00s	Arrêt des enregistrements sur les stations SAM et SCV et sur l'enregistreur de bord
15h56min00s	L'information état du logiciel en panne est notée dans le journal des alarmes

*Les alarmes tension moteur droit apparaissent lors de la phase de prise d'altitude pour rejoindre P6. Les batteries du moteur droit ont été plus sollicitées durant la mission, les hippodromes ayant été effectué dans le sens antihoraire.

L'analyse des données révèle que la transmission de données entre le VA et le TLD a continué 53 secondes après le passage de P6.

2.1.2. Analyse de la vidéo

Les stations SAM et SCV ont chacune enregistré la vidéo. La vidéo SCV s'arrête au bout de 28min38s. L'analyse de la vidéo sur la station sol SAM a permis de reconstituer la trajectoire et les attitudes de vol de l'aéronef après l'arrêt des enregistrements des paramètres.



Estimation de la trajectoire finale

La chronologie des faits marquants est la suivante :

Point	Heure	Temps vidéo	Faits marquants
A	15h47min30s	28min36s	Fin de la vidéo SCV
avant B			Le VA est en descente sur sa trajectoire vers le PPP ; les moteurs ne tournent pas ; quelques petites turbulences dues au relief
idem B			Fin de la télémétrie paramètre
B	15h54min00s	35min06s	Rotation de la CU vers la gauche (en 2 temps) pour un alignement dans l'axe du VA ; il semble y avoir un léger fléchissement de la trajectoire vers la gauche, donnant l'impression d'une légère dérive entre le cap du VA et la route estimée vers le PPP, non compatible avec la dérive provoquée par le vent. Cela peut aussi être dû à un effet « parallaxe » après rotation de la CU ou à la tolérance acceptée par l'autopilote autour de sa consigne de route
entre B et C			Mouvements plus prononcés du VA (en roulis et lacet) vraisemblablement provoqués par des turbulences dues au relief
C	15h54min14s	35min20s	Mises en route simultanées des moteurs droit et gauche
juste après C	15h54min24s	35min30s	Le VA semble vouloir tourner vers la droite (Φ estimé à 10°) pour réajuster sa route
entre C et D	15h54min37s	35min43s	Arrêts simultanés des moteurs droit et gauche. Les mouvements du VA en roulis et lacet s'amplifient
juste avant D	15h55min02s	36min08s	Mouvements importants du VA : en roulis (Φ_{\max} estimé à $\pm 20^\circ$) et en lacet (Ψ_{\max} estimé entre 20° et 30° à gauche et 10° ou moins à droite). Le VA donne l'impression de vouloir lutter contre une dérive à gauche pour rattraper sa route
D	15h55min10s	36min16s	Ces oscillations se terminent par un virage continu à gauche (Φ estimé à moins de 10°)
juste après D	15h55min21s	36min27s	Mise en route du moteur droit qui accentue un court instant le virage à gauche (augmentation de portance sur l'aile droite - Φ estimé entre 20 et 30°) avant la mise en route du moteur gauche qui vient stabiliser la trajectoire
	15h55min52s	36min58s	La VA continue de subir une dérive à gauche (léger dérapage). Il semble vouloir tourner vers la droite (Φ estimé à 10°) pour réajuster sa route
E	15h56min05s	37min11s	Fin de la vidéo

Conclusion :

Après le figement des écrans, l'autopilote semble contrôler la trajectoire du VA :
 - sur un plan de descente stable, ce qui permet d'écartier la défaillance du baromètre et des moteurs ;
 - sur un axe erroné, qui semble dériver vers la gauche sans certitude sur l'origine de la dérive.

2.2. Facteurs humains

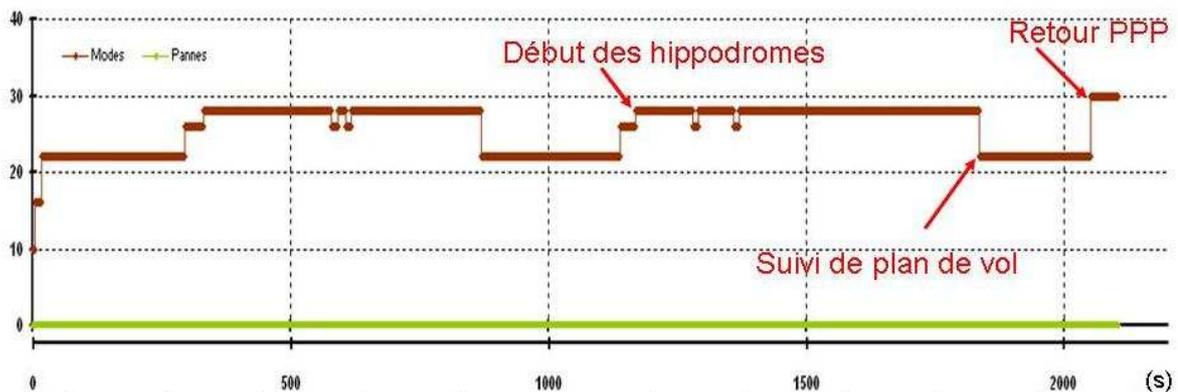
2.2.1. Préparation de mission

Lors de l'extraction des données des deux stations, un défaut d'enregistrement de la vidéo sur la station SAM a été constaté. Elle n'a pas pu être récupérée, les paramètres ont été extraits des deux stations. L'analyse du plan de vol révèle que les cartographies de la zone ont bien été chargées avant la mission et l'étape de compilation s'est déroulée sans erreur. Les gabarits de la zone de vol sont insérés afin d'être restitués en aide visuelle.

La préparation de mission effectuée par l'équipage est conforme à la méthode de travail enseignée.

2.2.2. Action de l'équipage

Après la commande de retour sur le PPP, il n'y a pas eu de modification du plan de vol par les opérateurs. Le dernier mode de fonctionnement enregistré sur les stations est retour sur le PPP.



Modes de fonctionnement du drone

La dernière action de l'équipage pour modifier la trajectoire est la commande de retour sur le PPP.

2.2.3. Réaction de l'équipage

Après deux minutes d'absence de réponse du système, temps estimé pour que le DRAC revienne sur site, le chef d'équipe décide de débrancher le TLD en espérant forcer le retour du VA. Cette coupure de la LD, non décrite dans le MAT16 535/1, a été enseignée aux régiments de montage pour forcer un retour du VA.

La panne décrite par l'équipage ne trouve aucune correspondance dans le manuel utilisateur.

L'analyse de la vidéo et l'extrapolation de la fin de trajectoire permettent de conclure que le VA n'est pas passé en mode « perte LD » suite à la coupure de l'alimentation de la batterie de la TLD.

Un dysfonctionnement de la chaîne qui contrôle cette barrière de sécurité est probable.

La coupure d'alimentation du TLD a néanmoins arrêté l'enregistrement vidéo.

Les actions de l'équipage suite à la panne n'ont probablement pas modifié le comportement du VA.

2.3. Facteurs environnementaux

Les conditions météorologiques et l'activité électromagnétique sur le site ne sont pas impliquées dans cet événement.

Les causes liées au domaine environnemental sont rejetées.

2.4. Facteurs techniques

2.4.1. Magnétomètre³

L'expertise du magnétomètre a révélé qu'il n'a subi aucun dommage lors de l'accident. Les valeurs obtenues lors de l'expertise sont conformes.

Il n'y a pas eu de défaillance du magnétomètre.

³ Magnétomètre : appareil qui sert à mesurer le champ magnétique.

2.4.2. Transmission de données

La liaison radio a fonctionné de manière nominale jusqu'à l'arrêt des enregistrements. Une très bonne corrélation a été constatée entre les valeurs enregistrées et des simulations *a posteriori*, que ce soit pour la propagation ou le pointage d'antenne.

Lors de l'arrêt de l'enregistrement, l'antenne n'est plus pilotée. La station sol ne reçoit plus les informations de position du VA mais elle continue à donner sa position. A ce moment-là, le VA est en rapprochement axial vers la station sol. La liaison a pu continuer à fonctionner, malgré un azimut figé. L'élévation elle aussi figée a très rapidement fait sortir le VA du lobe de l'antenne directrice. L'antenne omnidirectionnelle n'a pu prendre le relais, sa portée étant seulement de 1 km.

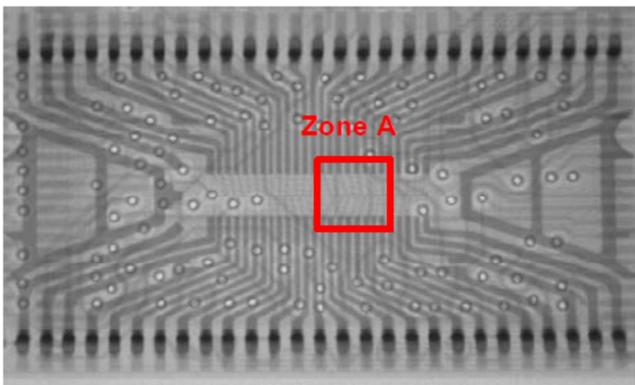
La liaison radio a été maintenue jusqu'à ce que l'appareil sorte de la zone de réception.

2.4.3. Carte autopilote

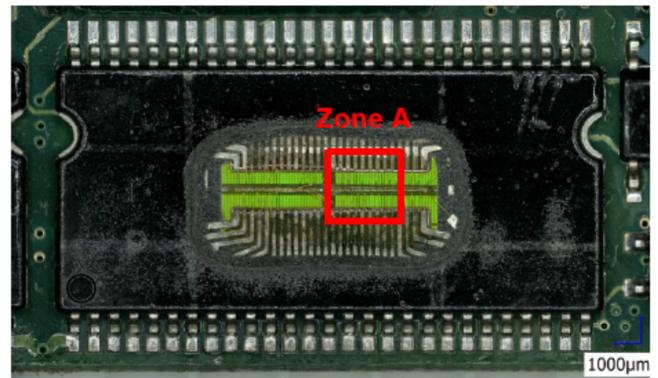
Des analyses optiques puis au rayon X ont été effectuées sur les cartes Wepilot, triton et leur carte interface constituant la carte autopilote.

D'après l'analyse optique ; l'état général des cartes est bon et semble exclure tout défaut significatif d'origine électrique.

L'analyse au rayon X a révélé qu'un *bonding*⁴ d'une des *Random access memory (RAM)* de la carte triton est défectueux. Ce fil d'or de 25 microns a probablement fondu à la suite d'un défaut électrique (une surtension). Les causes d'origine mécanique (choc) ont été exclues.

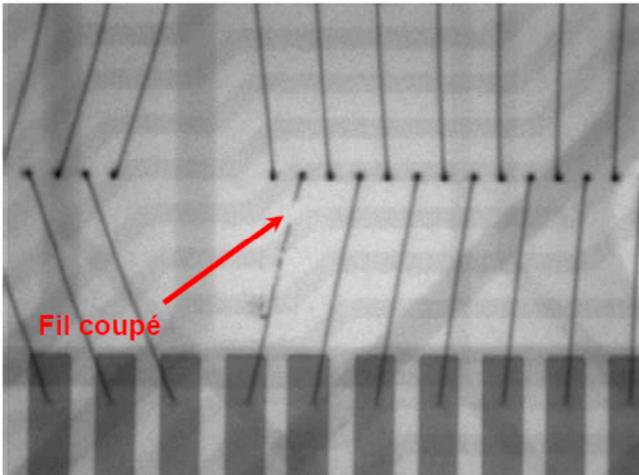


Vue du composant défaillant aux Rayons X

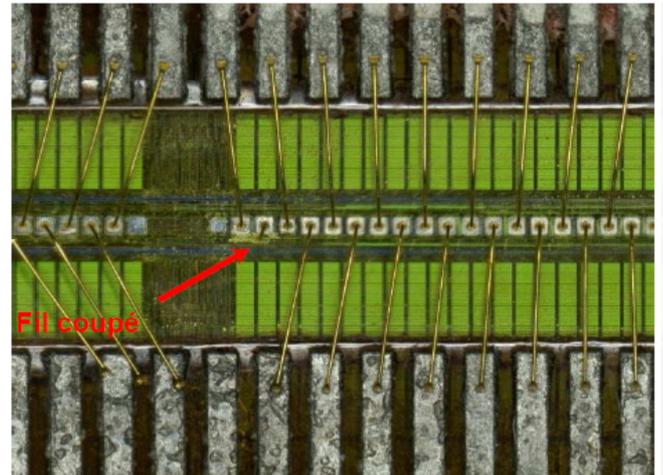


Vue optique du composant défaillant après ouverture

⁴Bonding : fil assurant la connexion entre les pattes du composant et le circuit en silicium à l'intérieur du composant.



Agrandissement au niveau de la zone A aux rayons X



Agrandissement au niveau de la zone A après ouverture

Le défaut détecté sur le composant *RAM* a amené à étudier l'implication de ce composant dans l'interaction des ensembles processeur, *FPGA*, *RAM*, *EEPROM* au cours du vol. D'après la documentation technique du composant, la patte défectueuse correspond à une patte d'alimentation d'un secteur mémoire. Il est probable que la détérioration est provoquée un défaut partielle des informations contenues dans cette mémoire (logiciel, données type « plan de vol », « position du PPP »...). Ce dysfonctionnement partiel n'a pas permis l'activation de la barrière de sécurité et le passage de l'appareil en mode crash programmé.

Le dysfonctionnement de la RAM suite à une surtension a entraîné la perte de contrôle de l'appareil.

PAS DE TEXTE

3. CONCLUSION

3.1. Eléments établis utiles à la compréhension de l'événement

L'événement est une perte de contrôle de l'appareil sans aucune alarme affichée.

La préparation de mission effectuée par l'équipage est conforme à la méthode de travail enseignée.

Les conditions météorologiques et l'activité électromagnétique sur le site ne présentent pas de facteurs limitatifs pour ce vol.

L'équipage n'a pas effectué de modification de la trajectoire.

L'analyse aux rayons X a révélé qu'un *bonding* d'une des *RAM* de la carte triton est défectueux.

3.2. Causes de l'événement

Une surtension dans la carte autopilote est à l'origine de l'événement. Elle a provoqué la fusion d'un *bonding* de la *RAM* contenant le logiciel et les données de l'autopilote. Cette dégradation de la mémoire est à l'origine de l'événement.

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

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

4.1.1. Distance de sécurité

Une distance de sécurité doit être appliquée par l'opérateur lors de la préparation de mission pour éviter que le VA ne tombe à l'extérieur de la zone prévue. Cette distance de sécurité est calculée dans des conditions de vitesse du vent et du VA en fonction de la hauteur de vol. Le VA s'est encastré dans un arbre situé en dehors de la zone.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

l'armée de terre, en relation avec la DGA, d'étudier une évolution des distances de sécurité.

4.1.2. Coupure de la liaison de donnée

La procédure appliquée par l'équipage lors de cet événement n'est pas décrite dans le manuel utilisateur. Ce fonctionnement dégradé a pour conséquence le passage du VA en mode crash contrôlé si une panne supplémentaire survient, rendant difficile la localisation du lieu de l'accident.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

l'armée de terre de s'assurer que les utilisateurs n'appliquent que les procédures du manuel utilisateur.

4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement

4.2.1. Formalisation de la consigne orale règlementant le survol de la route départementale

Une consigne orale régit le survol de la route départementale dans la zone 4 du camp de Canjuers. Elle s'ajoute aux textes règlementant l'utilisation des drones sur le site. Comme toute consigne orale, elle peut faire l'objet d'un oubli lors de la prise de consignes ou lors d'un remplacement.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

l'armée de terre de formaliser cette consigne par écrit dans les CPUT du site.