



RAPPORT TECHNIQUE

**Accident de l'Airbus A380
immatriculé F-HPJE**

**exploité par Air France le 30/09/2017
en croisière au-dessus du Groenland**

**Juin 2018 - Juin 2019
Phase III : campagne au sol
et récupération de pièce**



NOTE DE SYNTHÈSE

À la suite de la panne du moteur n°4 survenue à l'Airbus A380-861, immatriculé F-HPJE, en croisière au-dessus du Groenland le 30 septembre 2017, le bureau d'enquêtes danois sur les accidents aériens (AIB DK) a ouvert une enquête de sécurité, qu'il a déléguée au BEA. Le BEA représente la France, État de l'exploitant, d'immatriculation et de conception de l'aéronef. Des enquêteurs de l'AIB DK représentant le Groenland (un pays constitutif du royaume du Danemark), État d'occurrence, du NTSB, représentant les États-Unis d'Amérique, État du constructeur des moteurs, et du BST, représentant le Canada, État où l'équipage s'est dérouté, ont pris part à cette enquête de sécurité.

Des conseillers du constructeur Airbus, de l'exploitant Air France et du constructeur des moteurs Engine Alliance (une joint-venture entre General Electric et Pratt & Whitney) ont également pris part à l'enquête.

L'Airbus A380-861, exploité par Air France, effectuait le vol AF 066 en provenance de Paris (France) et à destination de Los Angeles (États-Unis d'Amérique). Il avait décollé de l'aéroport Paris - Charles-de-Gaulle le samedi 30 septembre 2017 vers 09 h 30 (UTC), avec 497 passagers et 24 membres d'équipage à son bord. À la suite d'une défaillance du moteur n°4 alors que l'avion montait au FL 370, l'équipage de conduite s'est dérouté vers l'aéroport de Goose Bay (Canada), où il a atterri à 15 h 42 (UTC) sans rencontrer d'autre incident.

Les dommages à l'aéronef étaient limités au moteur n°4 et à ses environs immédiats. Un examen visuel du moteur avait révélé que la soufflante, le premier ensemble tournant à l'avant du moteur, ainsi que l'entrée d'air et le carter de soufflante, s'étaient séparés en vol. Les données contenues dans l'enregistreur de paramètres (FDR) ont été utilisées pour déterminer la trajectoire et la position de l'aéronef lorsque la défaillance du moteur n°4 s'est produite et pour délimiter une zone de recherche afin de localiser les pièces qui s'étaient séparées de l'aéronef.

Un premier rapport, publié en mai 2019 (BEA, 2019)⁽¹⁾, décrit les deux premières phases de recherches :

- ❑ la Phase I, qui a consisté à rechercher et récupérer les pièces visibles à la surface de la calotte glaciaire. Celle-ci a démarré immédiatement après l'accident et s'est terminée le 12 octobre 2017, i.e. 12 jours après l'accident,
- ❑ la Phase II, constituée de deux opérations successives :
 - une campagne aérienne (Greensar), dédiée à l'utilisation de radars à synthèse d'ouverture (SAR – synthetic aperture radars) opérés par l'ONERA depuis un avion appartenant à l'AVDEF, afin de tenter de détecter et de localiser les pièces manquantes sur la calotte glaciaire, sous la neige et la glace,
 - une campagne au sol (Camp Recovery) menée par le GEUS, consistant à sonder les positions transmises par l'ONERA à l'issue de leur campagne aérienne puis à réaliser une recherche systématique à l'aide de géoradars (ou GPR, ground penetrating radars) étant donné le sondage non concluant autour des positions ONERA.

⁽¹⁾ https://www.bea.aero/uploads/tx_elyextendttnews/Rapport_Technique_du_F-HPJE_FR.pdf

Malgré l'ampleur du travail et des efforts investis dans les opérations décrites ci-dessus, les fragments du moyeu de soufflante n'étaient pas localisés à la fin juin 2018. Les informations obtenues durant la Phase II ont été analysées de manière approfondie et ont conduit à envisager la poursuite des travaux.

L'équipe de l'ONERA a poursuivi le traitement des images radar acquises au cours de l'opération GREENSAR après son retour en France. De nouveaux algorithmes spécifiques ont permis de détecter le moyeu de test (une pièce témoin intentionnellement enfouie à proximité de la zone de recherche à des fins de tests de détection et de calibration) en bande X, ce qui était un résultat prometteur par rapport à ce qui avait été jugé possible juste après la campagne aérienne.

À l'issue de leurs travaux, une cible de haute confiance et deux cibles moins saillantes ont été identifiées dans - ou très proche de - la zone de recherche. De plus, des pièces identifiées visuellement durant la Phase I, mais non récupérées, ont pu être rendues visibles en bande X, dans la zone des débris légers (en amont de la localisation de l'accident).

En parallèle, l'équipe de recherches au sol estimait qu'il était nécessaire de tester de nouveaux détecteurs, ayant une fauchée plus grande et une capacité de détection plus robuste, si de nouvelles recherches devaient s'organiser en 2019.

De son côté, Engine Alliance a réalisé des simulations numériques par Éléments Finis en dynamique rapide d'une rupture du moyeu de soufflante, basées sur un scénario de rupture du moyeu dans sa jante, et a pu obtenir des données raffinées relatives aux caractéristiques des fragments (masse et vitesse d'éjection en particulier). De nouveaux calculs balistiques ont été menés avec ces données mises à jour, afin de tenter de définir une zone de recherche à forte probabilité plus restreinte que la zone de recherche initiale, pour le cas où des recherches systématiques sans nouvelles cibles potentielles devaient être relancées.

Toutes ces activités ont été achevées fin 2018. À la suite de la mise en évidence de cibles prometteuses par l'ONERA et du développement d'un nouveau détecteur électromagnétique, la décision de retourner sur la calotte glacière a été prise fin février 2019 pour une campagne de recherche prévue au printemps, en mai 2019.

Cette campagne de printemps (Phase III) a été compliquée par des retards liés à la météo, mais une détection au sol a toutefois été obtenue en toute fin de campagne à la position de la cible de haute confiance mise en évidence par l'ONERA. Une campagne d'extraction a été organisée, qui s'est déroulée en juin 2019.

L'ensemble de ces efforts a eu pour résultat l'extraction et la récupération d'un fragment du moyeu de soufflante, avec quelques fragments d'aubes encore solidaires, le 30 juin 2019. Ce fragment fera à l'issue l'objet d'examens métallurgiques approfondis.

L'objectif de ce rapport est de présenter les différentes tâches menées durant l'année juin 2018 – juin 2019, incluant la campagne du printemps 2019 et la phase d'extraction.

Ces tâches étaient les suivantes (voir [Fig. 1](#)) :

- ❑ définition d'une zone de recherche pour la Phase III
 - Simulation numérique de la défaillance
 - Mise à jour des calculs balistiques
 - Analyse des données d'imagerie radar⁽²⁾
- ❑ évaluation de nouveaux moyens de détection
 - RECCO®⁽³⁾
 - chiens renifleurs
 - détecteurs électromagnétiques (EM)
- ❑ campagne au sol Phase III et extraction du fragment

Un chapitre final se propose de discuter des enseignements acquis durant cette période totale de 21 mois de recherches, dans un but de partage d'expérience et afin de faciliter de futures opérations de recherche, si un évènement similaire venait à se reproduire.

⁽²⁾ Données issues de la Phase II.

⁽³⁾ RECCO® est un système électronique de recherche de victimes d'avalanches

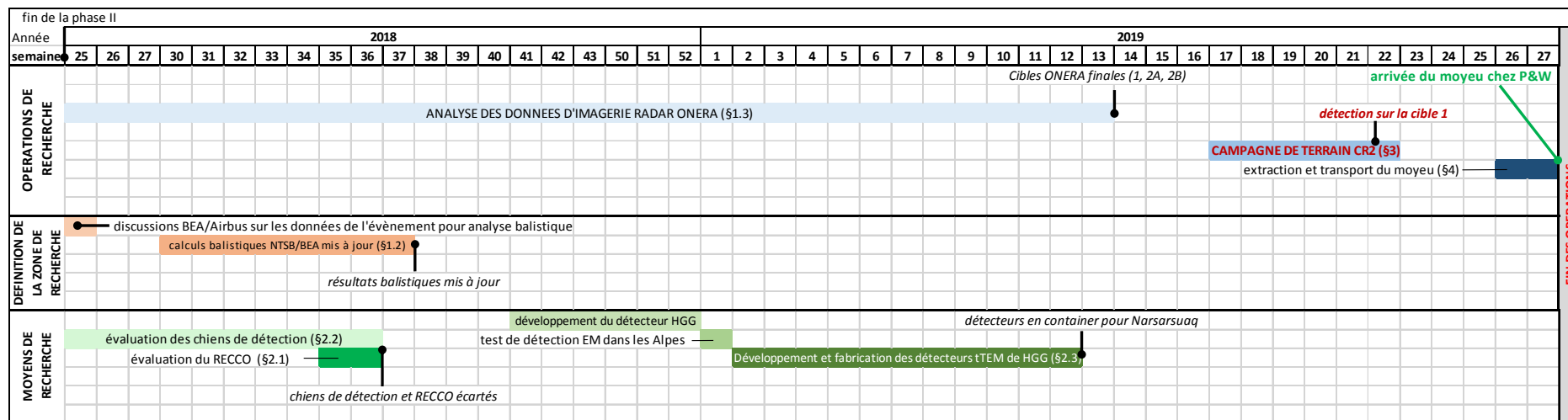


Fig. 1 : Déroulement des recherches de la Phase III, de juin 2018 jusqu'à la fin des opérations⁽⁴⁾

⁽⁴⁾ HGG : Groupe d'HydroGéophysique (HydroGeophysics Group) du département de Géosciences de l'Université d'Aarhus.
tTEM: Système tracté d'acquisition de données électromagnétiques transitoires dans le sol, développé par HGG.

TABLE DES MATIÈRES

NOTE DE SYNTHÈSE	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS	8
1 - DÉFINITION DE LA ZONE DE RECHERCHE PHASE III	11
1.1 Simulation de la défaillance du moteur	11
1.2 Mise à jour des calculs balistiques	13
1.2.1 Données raffinées	13
1.2.2 Mise à jour des calculs balistiques	20
1.3 Analyse d'imagerie radar	26
1.3.1 Généralités	26
1.3.2 Motivations du traitement multi-vues massif	27
1.3.3 Difficultés techniques en multi-vues massif	28
1.3.4 Problèmes de recalage (absolu) des images	29
1.3.5 Problèmes liés au recalage de la profondeur	30
1.3.6 Problèmes liés au mouvement de surface	30
1.3.7 Problèmes liés à l'évaluation du rapport signal sur bruit	31
1.3.8 Résultats	32
1.4 Imagerie optique par satellite	35
2 - ÉVALUATION DE NOUVEAUX MOYENS DE DÉTECTION	38
2.1 RECCO	39
2.2 Chiens renifleurs	40
2.3 Détecteurs électromagnétiques (EM)	41
2.3.1 Description du tTEM et axes d'améliorations	42
2.3.2 Développement et test du SnowTEM	45
2.3.3 Conclusion sur l'évaluation du détecteur EM	50
2.4 Conclusion sur les moyens de détection et la stratégie de campagne de recherche	51
3 - CAMPAGNE PHASE III – CAMP RECOVERY 2	52
3.1 Planning et logistique	52
3.2 Campagne de recherche au sol	54
3.3 Signal positif	57
4 - EXTRACTION	59
4.1 Généralités	59

5 - ENSEIGNEMENTS	65
5.1 Sécurité	65
5.2 Organisation	67
5.3 Moyens de détection	69
5.4 Extraction	73
5.5 Conditions météorologiques	75
6 - CONCLUSION	76
RÉFÉRENCES	78

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1 : déroulement des recherches de la Phase III, de juin 2018 jusqu'à la fin des opérations	5
Fig. 2 : scénario de rupture du moyeu dans la jante, simulé en supprimant des éléments dans un fond d'alvéole d'aube	11
Fig. 3 : simulation de rupture dans la jante (à droite), cohérente avec les dommages observés sur le moteur de l'accident (à gauche) – source : EA	12
Fig. 4 : résultats de simulation de rupture du moyeu dans la jante, cohérents avec les dommages observés sur le moteur (source: EA)	12
Fig. 5 : comparaison entre données de position GPS (bleu) et IRS (violet) à Goose Bay (en haut) et à Paris Charles-De-Gaulle (en bas)	15
Fig. 6 : calcul des données FMS à partir des données GPS et IRS (source : Airbus)	15
Fig. 7 : comparaison entre positions de l'évènement : localisation mise à jour (FMS commandant de bord, bleu ciel), localisation initiale (GPS, bleu foncé), position prise en compte par Airbus pour calculs balistiques (blanc). La ligne verte matérialise la trajectoire FMS de l'avion, la ligne violette sa trajectoire IRS	16
Fig. 8 : comparaison entre altitude barométrique (ou altitude pression, en bleu) et altitude GPS (orange)	17
Fig. 9 : paramètres d'altitude enregistrés au moment de la défaillance du moteur (13 h 49 mn 18 s).	19
Fig. 10 : données de la NOAA (source Airbus) montrant le profil de température en fonction de l'altitude à 12 h 00 UTC, 67,5°N 31,5°W. La ligne rouge représente le profil standard ISA et la ligne bleu représente les valeurs rapportées à cette date et heure	19
Fig. 11 : calcul des zones de chute pour les deux vitesses (57 et 133 m/s) et les deux angles d'éjection (5 et 11 heures)	21
Fig. 12 : calcul des zones de chute des deux fragments. Chaque simulation a considéré une éjection d'un fragment avec un angle radial de 4, 6 et 11 heures. Les positions 4 et 6 heures ont été choisies pour délimiter la position probable du débris éjecté à 5 heures, en tenant compte des incertitudes liées aux dommages observés sur le moteur. La région grise représente la zone de recherche calculée par le NTSB début 2018	23
Fig. 13 : zone de recherche décalée (en rouge) par rapport aux calculs d'Ariane de fin 2017 (en gris)	24
Fig. 14 : zones de recherche primaires (en rouge) et secondaires (en orange) mises à jour	25
Fig. 15 : zone de recherche finale mise à jour. La zone primaire (en rouge) mesure 4,4 km ² , la secondaire (rouge + orange) 8,1 km ² , et la zone totale après dilatation (bleu foncé) mesure 17 km ²	25
Fig. 16 : comparaison de la fonction de densité de probabilité du niveau de pixels pour du fouillis seul (clutter), en rouge, et pour du fouillis plus une cible à 10 % du niveau du fouillis, en vert. À gauche, pour une seule vue (single look) et, à droite, pour l'équivalent de 18 vues indépendantes. Pour un seuil (ligne mixte) donné, la surface hachurée en vert donne la probabilité de non-détection (ND) et la surface hachurée en rouge donne celle des fausses alarmes (FA)	27
Fig. 17 : 432 vues en une image composite en bande X, considérant un fouillis radar lambertien (à gauche, avec contraste augmenté pour amplifier les discontinuités entre sous-bandes/vues) et considérant un fouillis radar s'éloignant de la loi de Lambert selon une fonction polynomiale de degré 2 de l'angle d'incidence (à droite)	32

Fig. 18 : comparaison entre les profils en bande X du candidat #1 de directions opposées (233°, en haut à gauche et 053°, en haut à droite). Lorsque l'on compare le profil de sous-images obtenues de directions opposées, le pic d'intensité doit correspondre si l'objet est à la profondeur attendue (point rouge, en bas). Les caractéristiques qui ne sont pas à la profondeur attendue (ici la baisse d'intensité liée à la présence d'air dans la crevasse) ne vont pas de pair (flèches grises) du fait de la perspective	33
Fig. 19 : candidat (pixels brillants) pouvant correspondre à un fragment du moyeu sur l'image finale en bande X, avec amélioration du contraste pour impression. La ligne horizontale sombre est une crevasse, sous un pont de neige de 6 m	34
Fig. 20 : localisation des candidats ONERA 1, 2a and 2b par rapport à la zone de recherche	34
Fig. 21 : exemple d'image en bande UHF (polarisation verticale) illustrant la présence des crevasses dans la zone de recherche (délimitée par la ligne noire). Les localisations des cibles ONERA sont symbolisées par les plots jaunes	35
Fig. 22 : images Pléiades datant du 28 mai 2018 – les drapeaux sont visibles depuis l'espace (deux points gris en bas à droite). Un décalage de 207 m est observé entre leur localisation réelle (carrés bleus, positions enregistrées sur site par GPS) et leurs positions sur les images satellites	36
Fig. 23 : images Pléiades datant du 18 mai 2018. Aucun décalage n'est observé entre la localisation réelle des drapeaux telle que mesurée sur site (points bleus) et leur localisation sur les images satellites (taches grises)	36
Fig. 24 : images Pléiades du 28 mai 2018. La position réelle du campement est symbolisée par la tente orange. Les traces dans la neige (ovale bleu) matérialisent l'emplacement du campement sur l'image satellite	37
Fig. 25 : images Pléiades du 18 mai 2018. La position réelle du campement est symbolisée par la tente orange. Les traces dans la neige (ovale bleu) matérialisent l'emplacement du campement sur l'image satellite	37
Fig. 26 : localisation de la cible ONERA la plus prometteuse (point bleu), avec en arrière-plan l'image Pléiade du 11 octobre 2017. Aucun objet n'est visible sur l'image dans cette zone	38
Fig. 27 : chien renifleur avant (gauche) et après (droite) intervention sur la calotte glaciaire (source: AIB DK)	41
Fig. 28 : photo et schéma général du système tTEM (source: HGG)	42
Fig. 29 : photo de la configuration de test : le fragment de moyeu de test est placée à 2 m du centre du cadre de l'émetteur (source: HGG)	43
Fig. 30 : signaux mesurés durant les tests à Funder. Source: HGG	45
Fig. 31 : localisation initiale du test, le Breithorn Plateau au centre, avec le Breithorn (4 164 m), à gauche. Vue du Klein Matterhorn (petit Cervin). La remontée mécanique « Gobba di Rollin » est visible à droite. Des crevasses, en contrebas du plateau, sont nettement visibles	46
Fig. 32 : localisation finale du site de test - les remonte-pentes les plus proches sont matérialisés en bleu	47
Fig. 33 : localisation de la ligne électrique (lignes rouges) et de la mesure du bruit (point vert)	48
Fig. 34 : mesure réalisée avec SnowTEM – à proximité de la ligne électrique (vert), loin de la ligne électrique (gris) et à Funder (noir)	49
Fig. 35 : SnowTEM tracté par une motoneige durant le test à Zermatt, par conditions de faible visibilité pendant une tempête de neige	49
Fig. 36 : travaux de libération de l'un des deux systèmes SnowTEM après une tempête de neige	54
Fig. 37 : campement des recherches au sol - Photo: Rune Ellerup Kraghede	55

Fig. 38 : localisation du signal de la cible 1 (cercle rouge), et des crevasses à proximité (quatre drapeaux oranges à gauche et quatre drapeaux noirs à droite). Les crevasses sont orientées est-ouest. Les localisations des crevasses en dehors des marqueurs noirs et oranges sont incertaines. La distance entre le centre de la cible et la lèvre de la crevasse marquée en noir est de 2 m. Celle entre la cible et la lèvre de la crevasse marquée en orange est de 5 m. La crevasse en noir a une largeur de 4 m, un pont de neige de 6 m d'épaisseur. La crevasse en orange a une largeur de 4 m, un pont de neige de 8 m d'épaisseur. En bas de la photo de gauche à droite, les traces de FrostyBoy sont à peine visibles. Source: Thue Bording (HGG)	57
Fig. 39 : localisation de la détection (étoile rouge) – les disques jaunes représentent les localisations des cibles ONERA. Les bandes blanches sont les crevasses telles que vues sur les images UHF. Les traits rouges représentent les détections de lèvres de crevasses lors de Camp Recovery 2	59
Fig. 40 : prévisions météorologiques du 22 juin sur la zone de recherche, source : windy.com	61
Fig. 41 : prévisions météorologiques du 27 juin sur la zone d'extraction, source : windy.com	61
Fig. 42 : photo prise d'hélicoptère du site d'extraction, tel que décrit dans (Mankoff, et al., 2020). Les zones (A et A') en rouge foncé entre les drapeaux marquent les localisations connues de crevasses détectées par GPR et DGNSS. Les lignes pointillées démarquent les zones sûres en blanc et les zones non sûres en roses, déterminées par données GPR, cartographie UHF (Fig. 21) et sondage extensif de la neige ainsi que par les incertitudes sur la localisation des crevasses à partir de leur distance aux crevasses connues. (B) Rampe de sortie de la fosse d'extraction. (C) Contreplaqué utilisé pour recouvrir la fosse la nuit et éviter son remplissage par la neige. (D) Corde de sécurité traversant une crevasse entre l'îlot du campement au nord et l'îlot de travail au sud. (E) Traineau. (F) Treuil et sa plateforme. (G) Générateur utilisé pour alimenter le treuil. (H) Perches en bambou marquant le câble d'alarme à ours polaires entourant le campement. (I) Chauffage Herman Nelson, tuyau et fût de carburant. (J) zone d'atterrissage de l'hélicoptère. Photo par Austin Lines	62
Fig. 43 : opération de fonte de la neige et de la glace autour de la pièce à 4 m de profondeur. Photo par Arnar Ingi Gunnarsson	63
Fig. 44 : secouriste Islandais en train de faire fondre la glace. Photo par Dirk van As, Greenland Guidance	64
Fig. 45 : chargement de la caisse du moyeu de soufflante dans l'avion de transport, un Antonov 12	65
Fig. 46 : position de l'évènement et premières zones de recherche. L'arrière-plan est une image Landsat 8 du sud du Groenland. Les zones rouges et jaunes ont été communiquées à Air Greenland pour les recherches en hélicoptère	65
Fig. 47 : débris retrouvé par Air Greenland (plot jaunes). Le premier plan est une image UHF de la zone, acquise lors de la campagne radar aérienne d'avril 2018. Les crevasses sont clairement visibles en blanc. L'arrière-plan est une image TerraSar X de la zone.	66
Fig. 48 : véhicule autonome FrostyBoy (source: Austin P. Lines – PRE)	71
Fig. 49 : motoneige tractant le GPR MALÅ durant la première campagne au sol (source: GEUS)	72
Fig. 50 : congères de neige recouvrant l'équipement durant un épisode de fort vent	76

1 - DÉFINITION DE LA ZONE DE RECHERCHE PHASE III

1.1 Simulation de la défaillance du moteur

Fin juin 2018, Engine Alliance a présenté des informations détaillées provenant de simulations numériques LS-Dyna de la rupture du moyeu. Engine alliance a élaboré un modèle LS-Dyna du module de soufflante GP7000 afin d'évaluer les différents scénarios de rupture proposés et d'étayer les informations obtenues à partir des observations sur le moteur.

L'ensemble modélisé par Éléments Finis inclut la partie rotor basse pression du moteur (carter de soufflante, carter intermédiaire, compresseur basse pression, y compris certaines structures fixes), la turbine basse pression, et les supports de roulements basse pression. Les modèles physiques sur lesquels s'appuie le modèle Éléments Finis LS-Dyna utilisent des modèles matériau calibrés (élasticité, visco-plasticité et mécanique de l'endommagement) et des techniques et procédures de modélisation validées pour les programmes de développement des moteurs P&W. Ces validations sont réalisées par corrélation entre résultats de calculs et d'essais, en particulier lors d'essais de perte d'aube (Fan Blade Off, FBO) et d'ingestion d'oiseaux.

Les lois de comportement des matériaux utilisées dans cette analyse sont élasto-plastiques. Le modèle n'est pas un modèle du moteur complet, mais consiste en une sous-partie du moteur dans le but d'évaluer le comportement du moyeu de soufflante et de son environnement au sein du module de soufflante. Du fait de ces limitations, la validité de l'estimation du comportement de l'ensemble considéré n'est admise que pour les 20 à 30 premières millisecondes après le début de la séquence de rupture. Cette durée permet toutefois de simuler les événements depuis la rupture initiale de la pièce jusqu'au moment où les fragments de moyeu (pour les cas où le moyeu se rompt) pénètrent dans le carter de rétention du moteur.

La simulation LS-Dyna a pour objectif de comprendre la dynamique de dispersion des pièces du moteur, consécutive à une rupture du moyeu. LS-Dyna n'étant pas un code de mécanique de la rupture, il a été nécessaire d'amorcer artificiellement l'évènement en « forçant » la rupture initiale de la pièce. L'hypothèse de départ pour la simulation a été de considérer une rupture du moyeu dans la jante (Fig. 2). Ce scénario n'est pas considéré comme le seul probable, mais il a l'avantage de permettre de simuler une rupture complète du moyeu. Ceci a été réalisé numériquement en supprimant des éléments dans un fond d'alvéole d'aube.

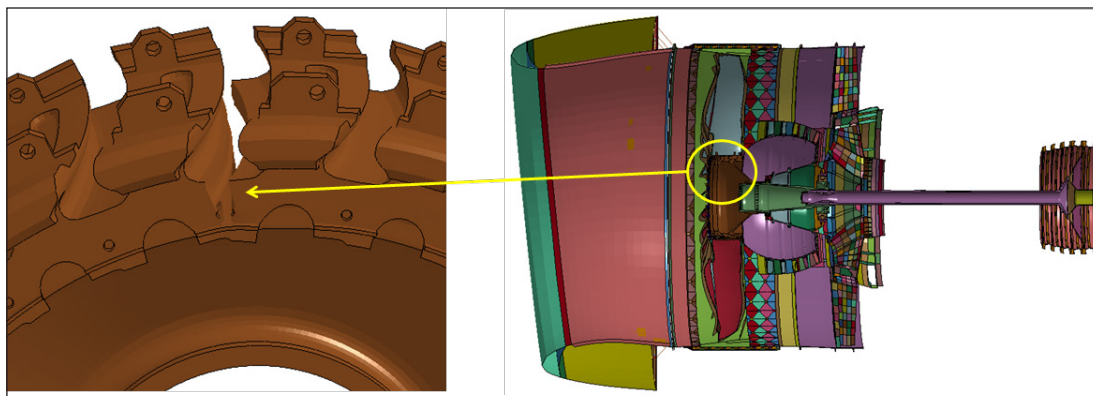
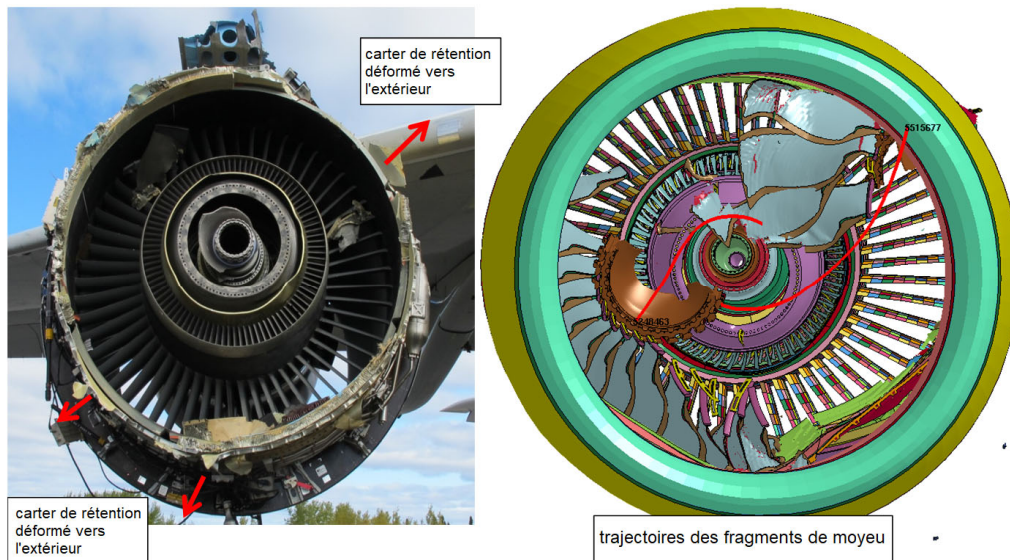


Fig. 2 : Scénario de rupture du moyeu dans la jante, simulé en supprimant des éléments dans un fond d'alvéole d'aube

Il convient de noter que le scénario de rupture dans la jante englobe tout scénario dont le résultat serait une rupture complète du moyeu : la rupture intervient en effet d'abord dans la jante dans tous ces scénarios.

Les dommages collatéraux et la fragmentation de pièces associées à la rupture du moyeu dans la jante en simulation sont cohérents avec les dommages observés sur le moteur n°4. En particulier, les dommages observés sur le carter de rétention, sur les couches de Kevlar®, sur la face avant du tambour du compresseur basse pression et sur les aubes de soufflantes retrouvées au sol au Groenland et dans le moteur (Fig. 3) ont conforté ce scénario.



Source: EA

Fig. 3 : simulation de rupture dans la jante (à droite), cohérente avec les dommages observés sur le moteur de l'accident (à gauche)

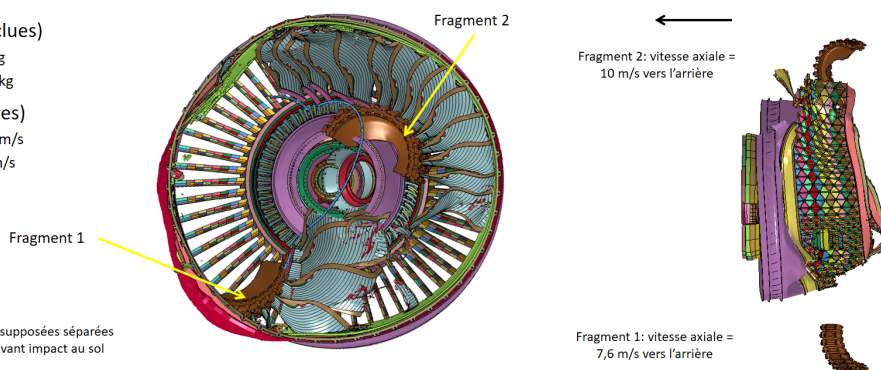
La simulation LS-Dyna a été utilisée pour déterminer les masses, tailles, angles et vitesses d'éjection probables des fragments du moyeu afin de raffiner les calculs balistiques et la zone de recherche sur la calotte glaciaire du Groenland.

Analyse de rupture du moyeu → 2 fragment majeurs

- Masses (aubes exclues)
 - Fragment 1: 91 kg
 - Fragment 2: 127 kg
- Vitesses (résultantes)
 - Fragment 1: 133 m/s
 - Fragment 2: 57 m/s

Orientation pivotée par rapport au fichier d'origine pour aligner le petit fragment avec le trou dans le Kevlar® à 5 heures

Note: toutes les aubes sont supposées séparées des fragments de moyeu avant impact au sol



Source: EA

Fig. 4 : Résultats de simulation de rupture du moyeu dans la jante, cohérents avec les dommages observés sur le moteur

La [Fig. 4](#) illustre le scénario qui a été considéré comme étant le plus cohérent avec les dommages observés sur le moteur (ceinture de Kevlar®, carter de rétention, dommages aux cloisons, etc.). Il s'agit en fait d'une demi-révolution de l'image de droite de la [Fig. 3](#) pour laquelle la position angulaire de la rupture du moyeu était choisie arbitrairement. Celle-ci a été recalée afin que les dommages correspondent à ceux observés sur le moteur n°4.

D'après la simulation, un premier fragment (appelé dans la suite Fragment 1), pesant 91 kg (200 lbs), a été éjecté à une vitesse de 133 m/s (435 ft/s) d'une position angulaire entre 4 et 6 heures, en regardant le moteur de l'arrière vers l'avant. Un deuxième fragment (Fragment 2), pesant 127 kg (281 lbs), a été éjecté à une vitesse de 57 m/s (186 ft/s) de la position angulaire approximative à 11 heures. D'après la simulation et l'expérience du constructeur, toutes les aubes étaient supposées s'être séparées des fragments du moyeu avant que ceux-ci n'impactent le sol.

Dès lors, deux fragments de moyeu furent recherchés au lieu de trois supposés initialement à partir des calculs menés lors de la Phase II. Le premier représentait environ deux cinquièmes d'un moyeu complet, le second, trois cinquièmes.

1.2 Mise à jour des calculs balistiques

1.2.1 Données raffinées

En support aux phases de recherche I et II, le NTSB, le BEA et Airbus ont réalisé des calculs balistiques afin de déterminer une zone probable de chute des fragments du moyeu.

Ces premiers calculs ont été menés relativement tôt dans l'enquête, et les données sur lesquelles ils s'appuyaient n'ont pas été raffinées davantage du fait de contraintes temporelles.

Après les phases I et II, les données du vol de l'évènement ont fait l'objet d'une étude plus approfondie. Il en est ressorti que la localisation initiale de l'évènement utilisée pour les calculs balistiques par Airbus ne correspondait pas exactement à la position de l'avion au moment de la défaillance du moteur. La cause de ce décalage n'a pas pu être déterminée.

De plus, grâce aux simulations LS-Dyna, de nouvelles informations sur les vitesses d'éjection des fragments étaient disponibles, permettant possiblement de réduire la zone de recherche.

Pour ces raisons il a été décidé de consolider les hypothèses utilisées pour les calculs de trajectoires balistiques des débris afin de relancer des calculs avec ces nouvelles données.

1.2.1.1 Position de l'avion au moment de l'évènement

Parmi les données enregistrées dans le FDR (flight data recorder), trois sources sont disponibles pour localiser l'avion :

- ☐ GPS
- ☐ IRS (inertial reference system)
- ☐ FMS (flight management system), combinaison des données GPS et IRS.

Initialement, le BEA avait choisi d'utiliser les données de position GPS du FDR pour déterminer la position de l'évènement et de les utiliser comme point de départ pour les calculs balistiques. Les données IRS présentaient un décalage latéral de 80 m par rapport aux positions réelles, aussi bien à l'aéroport de Paris Charles-De-Gaulle qu'à l'aéroport de Goose Bay (voir [Fig. 5](#)), tandis que les positions GPS étaient cohérentes sur ces deux aéroports.

Le paramètre à utiliser pour positionner l'avion, parmi les données FDR, était donc un sujet de discussion si l'on souhaitait raffiner les coordonnées de l'évènement dans le cadre d'une nouvelle phase de recherche. En effet, même si les données GPS sont très précises en termes de position, Airbus explique que sa datation peut l'être beaucoup moins, jusqu'à atteindre des retards de 2,2 secondes. Ceci s'explique par le taux de rafraichissement des données GPS, d'une seconde, de la présence de latence, et de la fréquence d'enregistrement du paramètre au FDR. Il peut en résulter un décalage dans la position longitudinale de l'avion.

La position IRS est précise durant le décollage seulement, lorsque tous les systèmes sont initialisés correctement. Elle peut présenter des incohérences latérales durant le vol. Elle est rafraichie tous les 80 ms.

La position FMS est basée sur les positions GPS et IRS. Du fait du taux de rafraichissement de la position IRS, la datation de la position FMS peut atteindre des retards jusqu'à 1,39 secondes.

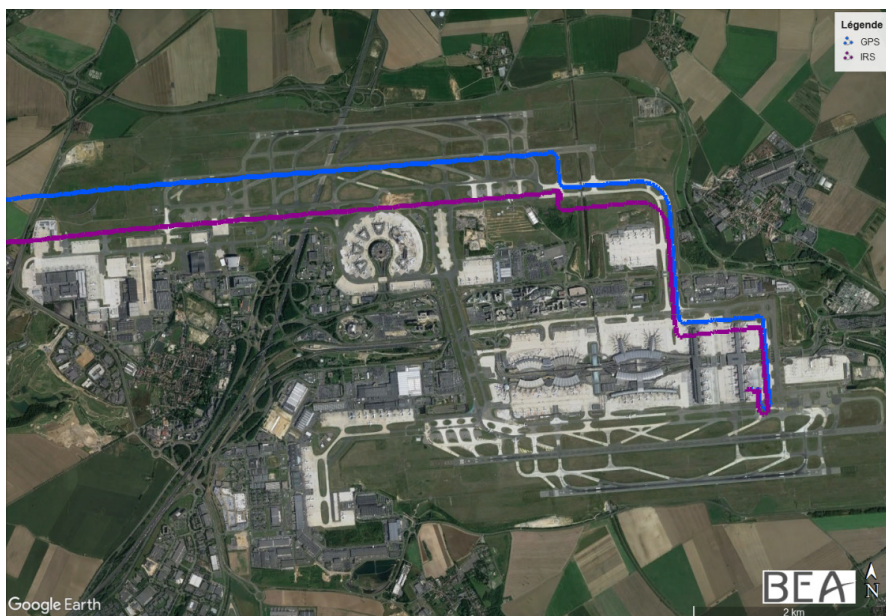
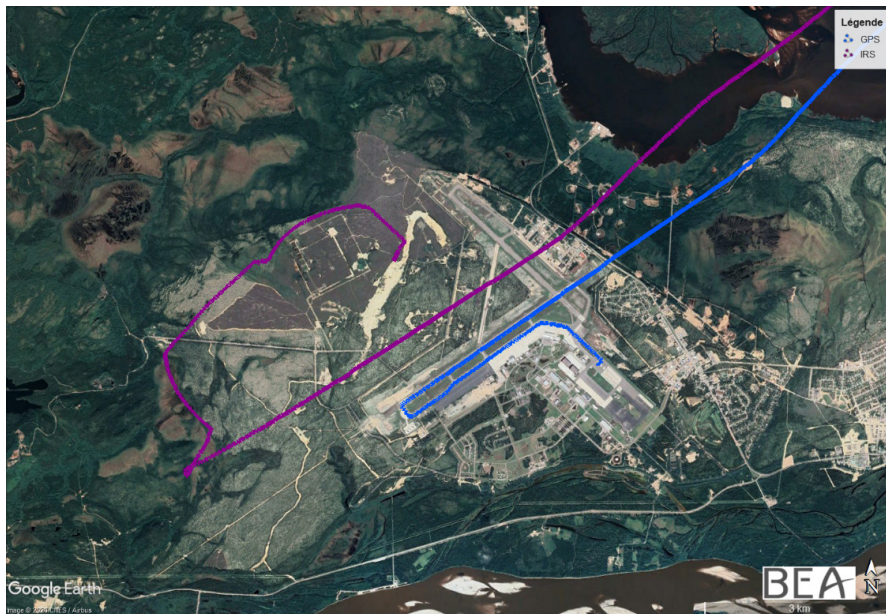
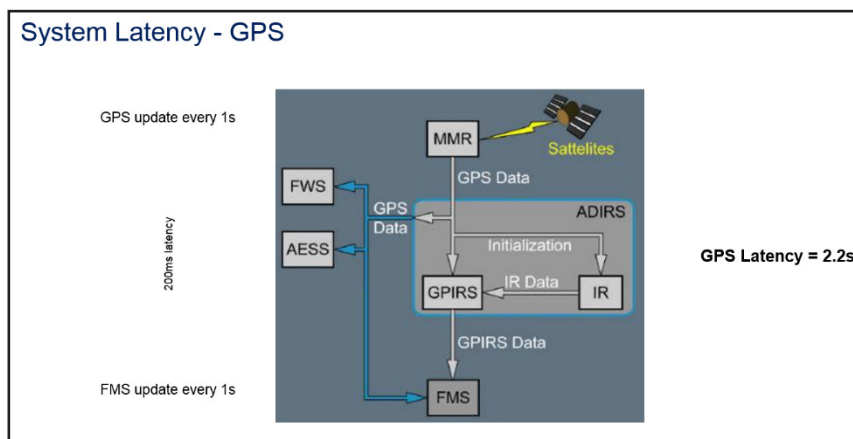


Fig. 5 : Comparaison entre données de position GPS (bleu) et IRS (violet) à Goose Bay (en haut) et à Paris Charles-De-Gaulle (en bas)



Source : Airbus

Fig. 6 : Calcul des données FMS à partir des données GPS et IRS

Il a été décidé, conjointement avec Airbus, d'utiliser les données FMS pour localiser l'évènement car celles-ci se basent sur les données spatiales GPS, plus précises en positionnement, et sur les données IRS, qui ont un taux de rafraichissement plus élevé. Le paramètre de position FMS côté commandant de bord (CDB) a finalement été utilisé pour localiser l'évènement.

La localisation de l'évènement mise à jour (bleu ciel, [Fig. 7](#)) est donc :

61.744080°, -46.823104° at 13h49m18.506s⁽⁵⁾

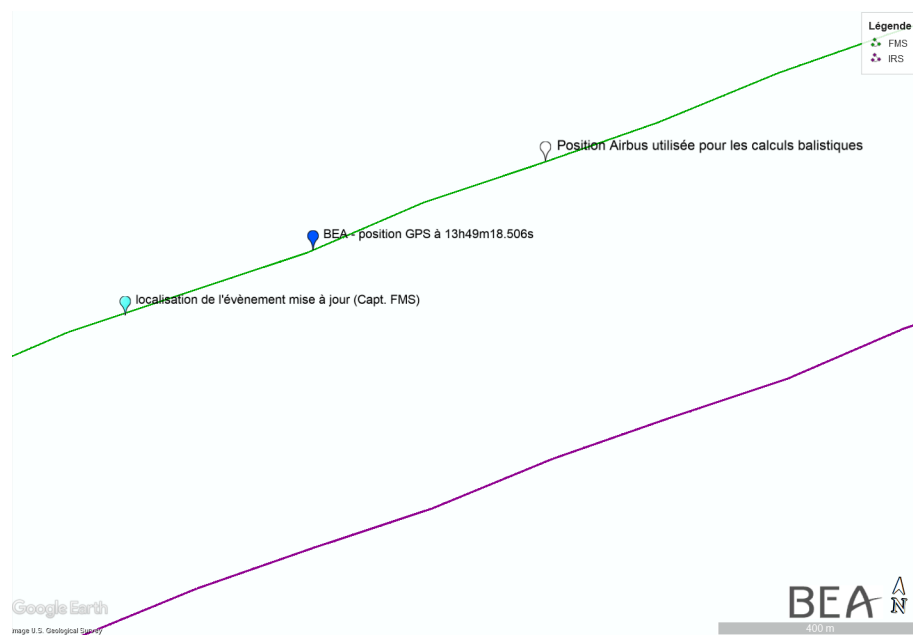


Fig. 7 : Comparaison entre positions de l'évènement : localisation mise à jour (FMS commandant de bord, bleu ciel), localisation initiale (GPS, bleu foncé), position prise en compte par Airbus pour calculs balistiques (blanc). La ligne verte matérialise la trajectoire FMS de l'avion, la ligne violette sa trajectoire IRS.

La distance entre la localisation mise à jour (FMS, bleu ciel) et la position initiale (GPS, bleu foncé) de l'évènement était de 385 m. La distance entre la localisation mise à jour de l'évènement et la position utilisée par Airbus pour ses calculs balistiques était de 870 m.

1.2.1.2 Altitude géométrique de l'avion au moment de l'évènement

L'altitude géométrique de l'avion lorsque la défaillance moteur est intervenue a également fait l'objet de discussions.

L'altitude pression est généralement utilisée en croisière, en référence au modèle d'atmosphère standard (1013 hPa au niveau de la mer). Pour améliorer la précision des calculs balistiques, il était nécessaire de bien connaître l'altitude géométrique de l'avion ainsi que l'altitude du terrain, en tant que données d'entrée du problème. En d'autres termes, il était nécessaire de connaître la hauteur de l'avion au-dessus du sol.

⁽⁵⁾ le déclencheur considéré pour identifier l'évènement était le premier pic d'accélération latérale, voir ([BEA, 2019](#)).

Différentes altitudes sont enregistrées dans les données FDR. L'altitude pression et l'altitude GPS ont été comparées pour vérifier leur cohérence et ainsi déterminer la hauteur de l'avion au moment de l'évènement.

Sur la [Fig. 8](#), l'altitude GPS présente des variations au cours du vol, en particulier durant la phase de croisière, tandis que le niveau de vol (mesuré en termes d'altitude pression) était constant. La comparaison entre ces deux altitudes n'était pas aisée.

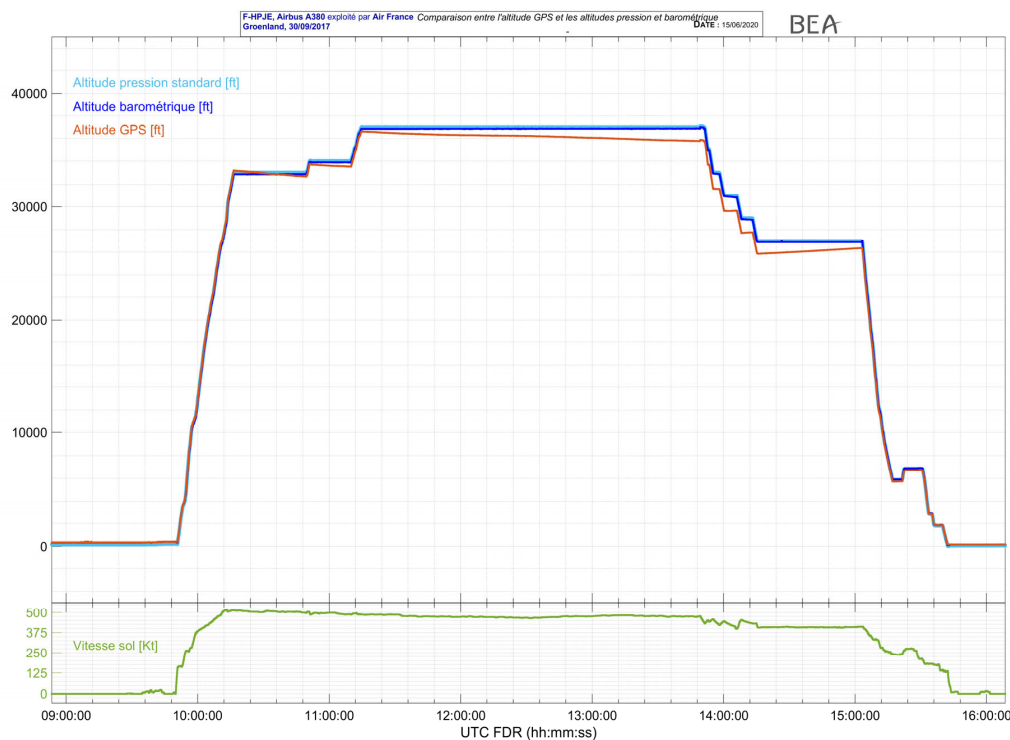


Fig. 8 : Comparaison entre altitude barométrique (ou altitude pression, en bleu) et altitude GPS (orange)

L'altitude GPS correspond à une altitude au-dessus du géoïde terrestre. L'altitude pression correspond à une altitude obtenue par mesure de la pression statique extérieure lorsque l'altimètre est calé sur 1013 hPa, en supposant que le profil de l'atmosphère suit le modèle d'atmosphère standard. Cela signifie qu'il est nécessaire d'appliquer des corrections de calage altimétrique (QNH) et de température pour obtenir l'altitude géométrique à partir de l'altitude pression. Ces corrections se font en supposant que l'atmosphère au moment de l'évènement au-dessus du Groenland suit les mêmes variations que l'atmosphère standard. Si le profil d'atmosphère présente une variation de température par exemple, ces corrections ne sont plus valides.

La température statique enregistrée au FDR indiquait des différences avec l'atmosphère standard internationale (*ISA, International Standard Atmosphere*) ou Δ_{ISA} , différences qui n'étaient pas constantes au cours du vol.

Altitude GPS

Un spécialiste des GNSS contacté par le BEA a indiqué qu'au-delà de 60° de latitude (l'évènement était localisé à approximativement 61,7°N 46,8°O), la couverture GNSS peut montrer des limites significatives. Ces limitations ne sont pas dues au fait que le récepteur GNSS ne voit pas beaucoup de satellites, mais plutôt qu'il n'y a pas beaucoup de satellites strictement à sa verticale. La précision de l'altitude GNSS disponible dépend du récepteur, du nombre de satellites, de la disponibilité d'une fonction d'amélioration des performances de type EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) et du type de données enregistrées. Il est possible que l'amélioration de fonction GNSS présente des lacunes dans la région du Groenland.

Correction de l'altitude pression

Des corrections ont été appliquées à l'altitude pression enregistrée au FDR afin de la comparer à l'altitude GPS. L'aérodrome le plus proche de l'évènement était celui de Narsarsuaq, code UAK. Le 30 septembre 2017, le QNH à UAK à 01 h 50 UTC était de 995,2 hPa, signifiant qu'une correction de - 500 ft devait être appliquée à l'altitude pression pour correspondre au QNH. Malgré cette correction, l'altitude barométrique calculée était significativement différente de l'altitude GPS. Des corrections de température étaient donc potentiellement nécessaires et le QNH local était potentiellement différent de celui à Narsarsuaq. Aussi, Δ_{ISA} n'était pas constant et il semble probable que l'atmosphère ne suivait pas un profil d'atmosphère standard.

Airbus a été sollicité afin d'évaluer la correction à appliquer à l'altitude barométrique pour obtenir l'altitude géométrique vraie. Airbus a répondu que l'obtention d'une altitude géométrique à partir de mesures d'altitudes barométriques à proximité du pôle Nord était délicate, du fait de la différence significative entre le profil de l'atmosphère local et le modèle d'atmosphère standard. Afin d'aider à la détermination de cette altitude vraie, Airbus a fourni un export de données provenant de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) datant de septembre 2017 (voir [Fig. 10](#)). Ces données sont valables pour une localisation située à 950 km de l'évènement, et à 12 h 00 UTC, l'évènement s'étant produit à 13 h 49 mn 18 s UTC.

La [Fig. 10](#) montre une inversion de température à environ 30 000 ft. Ceci confirme qu'appliquer une correction de température n'est pas trivial et peut être biaisé étant donné que l'atmosphère à l'endroit de l'évènement ne suit pas le modèle d'atmosphère standard.

Les données de la NOAA donnaient, pour une altitude standard barométrique de 37 080 ft :

- ☐ une altitude MSL ⁽⁶⁾ de 35 840 ft à 06 h 00 UTC
- ☐ une altitude MSL de 35 760 ft à 12 h 00 UTC
- ☐ une altitude MSL de 35 720 ft à 18 h 00 UTC

La valeur d'altitude fournie par la NOAA de 35 760 ft à 12 h 00 UTC est cohérente avec l'altitude GPS enregistrée au moment de l'évènement, **35 840 ft**.

Même si l'altitude GPS peut montrer des limitations aux hautes latitudes, la cohérence entre les valeurs d'altitudes de la NOAA et les altitudes GPS enregistrées a conforté le choix de l'altitude GPS comme valeur pour l'altitude géométrique au moment de la défaillance du moteur.

⁽⁶⁾ Mean Sea Level, niveau moyen de la mer.

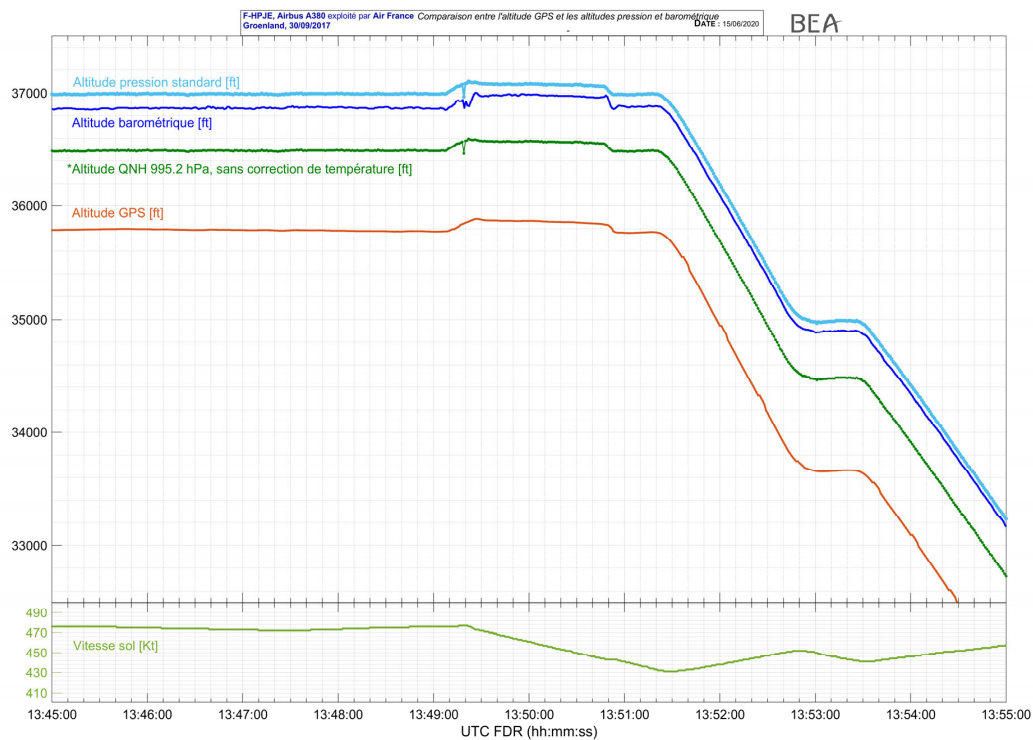


Fig. 9 : Paramètres d'altitude enregistrés au moment de la défaillance du moteur (13 h 49 mn 18 s)

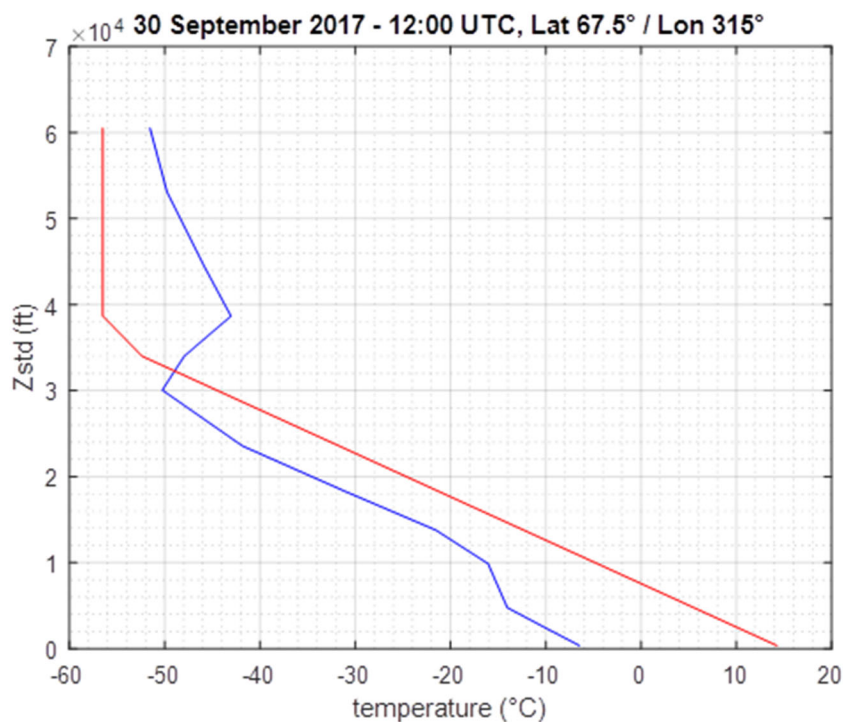


Fig. 10 : Données de la NOAA (source Airbus) montrant le profil de température en fonction de l'altitude à 12 h 00 UTC, 67,5°N 31,5°W. La ligne rouge représente le profil standard ISA et la ligne bleu représente les valeurs rapportées à cette date et heure

1.2.1.3 Élévation du terrain

L'élévation du terrain dans la zone de recherche présente des variations de +/- 1 m qui sont fonction des chutes de neige, des périodes de fonte, des mouvements du glacier, etc.

L'altitude terrain a été estimée dans un premier temps par le GEUS, en utilisant des données issues de BedMachine⁽⁷⁾, une cartographie topographique et bathymétrique du Groenland, et d'ArcticDEM⁽⁸⁾, un modèle numérique d'élévation de terrain (ou Digital Elevation Model, DEM).

GEUS a confirmé les données estimées une fois sur site en mars 2018 à l'aide d'un GPS. L'altitude moyenne de la zone de recherche était approximativement de 6 070 ft MSL, soit 1 850 m. La partie nord-est du champ de débris se situait à 1 950 m tandis que l'extrémité sud-ouest de la zone de recherche s'élevait à 1 800 m. Ces valeurs ont été confirmées lors de l'analyse des données radar par l'ONERA.

1.2.1.4 Profondeur des fragments

Durant la Phase II, la profondeur des fragments sous la surface a été estimée entre 2 et 3 m. Ces valeurs prenaient en compte la profondeur de pénétration due à l'impact des fragments avec la surface de la calotte glaciaire, plus une saison de chutes de neige. En vue de la campagne du printemps 2019, en d'autres termes un an après la Phase II, une saison additionnelle de chutes de neige devait être prise en considération pour estimer la profondeur réactualisée des fragments. En se basant sur une accumulation de neige entre 1 et 1,5 m en une saison, la profondeur actualisée des fragments a été estimée entre 3 et 4,5 m.

1.2.2 Mise à jour des calculs balistiques

1.2.2.1 Calculs balistiques du BEA

À partir des vitesses d'éjection initiales issues de la simulation LS-Dyna et des données raffinées (paragraphe 1.2.1), le BEA a calculé de nouvelles trajectoires balistiques pour les deux scénarios obtenus (éjection aux positions angulaires 5 heures et 11 heures sur le moteur) et les deux tailles de fragment. L'objectif était de vérifier la cohérence entre les cibles détectées lors des acquisitions radar aériennes et les résultats des calculs balistiques. Les hypothèses initiales de taille de débris et d'angle d'éjection sont résumées dans la [Table 1](#).

Des inconnues persistent quant à la forme des débris (présence ou non d'aubes de soufflante, géométrie réelle, etc.) et à leur comportement durant leur chute (rotation sur elle-même, présence d'un effet Magnus). Pour ces raisons, seules les régions ayant la probabilité la plus élevée d'y retrouver les fragments ont été considérées.

	Fragment 1	Fragment 2
Masse	91 kg	127 kg
Vitesse (résultante)	133 m/s	57 m/s
Angle d'éjection	11 heures	5 heures
Vitesse (axiale vers l'arrière)	7.6 m/s	10 m/s

Table 1 : Caractéristiques des fragments du moyeu au moment de la rupture

⁽⁷⁾ Morlighem, M., C. Williams, E. Rignot, L. An, J. E. Arndt, J. Bamber, G. Catania, N. Chauché, J. A. Dowdeswell, B. Dorschel, I. Fenty, K. Hogan, I. Howat, A. Hubbard, M. Jakobsson, T. M. Jordan, K. K. Kjeldsen, R. Millan, L. Mayer, J. Mouginot, B. Noël, C. O'Cofaigh, S. J. Palmer, S. Rysgaard, H. Seroussi, M. J. Siegert, P. Slabon, F. Straneo, M. R. van den Broeke, W. Weinrebe, M. Wood, and K. Zinglensen. 2017. BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multi-beam echo sounding combined with mass conservation, *Geophysical Research Letters*. 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL074954>

⁽⁸⁾ Porter, Claire; Morin, Paul; Howat, Ian; Noh, Myoung-Jon; Bates, Brian; Peterman, Kenneth; Keese, Scott; Schlenk, Matthew; Gardiner, Judith; Tomko, Karen; Willis, Michael; Kelleher, Cole; Cloutier, Michael; Husby, Eric; Foga, Steven; Nakamura, Hitomi; Platson, Melisa; Wethington, Michael, Jr.; Williamson, Cathleen; Bauer, Gregory; Enos, Jeremy; Arnold, Galen; Kramer, William; Becker, Peter; Doshi, Abhijit; D'Souza, Cristelle; Cummins, Pat; Laurier, Fabien; Bojesen, Mikkel, 2018, "ArcticDEM", <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse, V1, [Accessed Fall 2017].

La valeur moyenne de 235 kg/m^2 a été utilisée comme rapport masse/surface, paramètre nécessaire au calcul balistique, compte-tenu de la masse et de la taille du moyeu.

Concernant le coefficient de trainée, la borne inférieure (autour de 0,05) correspondait à un profil aérodynamique certainement trop éloigné de celui des fragments recherchés. Un coefficient de trainée de 0,9 a été choisi pour la borne supérieure, une barre cylindrique ayant un coefficient de trainée de 1 et un disque plat de 0,78.

Enfin, pour prendre en compte les incertitudes décrites précédemment (rapport masse/surface, présence ou non d'un effet Magnus, coefficient de trainée, etc.), une erreur de $\pm 2 \%$ a été rajoutée sur la distance de chute.

Des contraintes logicielles ont nécessité que les calculs soient menés en utilisant un rapport masse sur surface par trainée ($W_t/C_D S$). Celui-ci se situait entre 270 kg/m^2 et $5\,000 \text{ kg/m}^2$. Les zones de chute probable des objets recherchés sont présentés sur la [Fig. 11](#).

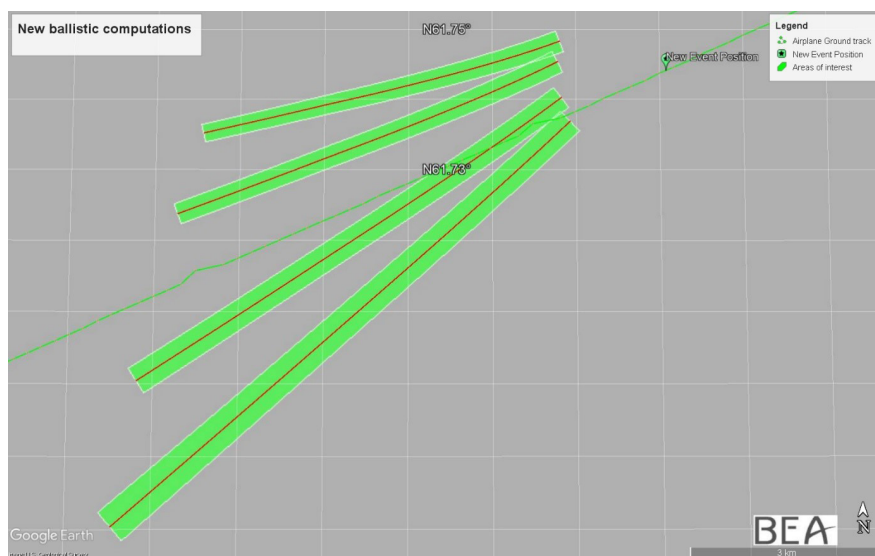


Fig. 11 : calcul des zone de chute pour les deux vitesses (57 et 133 m/s) et les deux angles d'éjection (5 et 11 heures).

1.2.2.2 Calculs balistiques du NTSB

Le NTSB a mené une nouvelle itération sur ses coefficients balistiques des fragments recherchés, connaissant à présent les vecteurs vitesses provenant de la simulation LS-Dyna ([paragraphe 1.1](#)) et en prenant en compte les données raffinées du [paragraphe 1.2.1](#). En général, le coefficient balistique ou le coefficient de trainée est estimé à partir de l'expérience vis-à-vis de pièces similaires. Le NTSB a participé à deux essais balistiques au début des années 80 lors desquels les coefficients balistiques ont été calculés à partir du temps de chute mesuré. De plus, au cours des années, lorsque le NTSB a récupéré des éléments d'épaves, leurs coefficients balistiques ont pu être déduits en comparant leur position réelle au sol et leur position théorique calculée.

En tenant compte de la forme attendue des fragments, le NTSB a utilisé une plage de coefficients balistiques basée sur les calculs suivants :

Le fragment 1 était supposé représenter 38 % d'un moyeu complet, avec sa liaison mécanique à l'arbre manquante. Il est fort probable que le type de chute avec prise en compte de la trainée se situe entre une chute stable, à plat, avec la face avant du fragment vers le bas, et une chute en tournant autour son axe longitudinal, face avant en premier. Il est probable que la répartition de la masse sur la circonférence soit constante et que le fragment ait une certaine portance (i.e. puisse « voler »).

$$W_t = 91 \text{ kg (200 lbs)}$$

Dessus vers le bas :

$$S^{(9)} = 0,38 (2L\pi r)$$

$$S = 576,5 \text{ in}^2 = 4,0 \text{ ft}^2$$

$$C_D = 0,9$$

Face avant vers le bas :

$$S = 0,38(\pi r^2 - \pi r^2)$$

$$S = 133,8 \text{ in}^2 = 0,93 \text{ ft}^2$$

$$C_D = 1,1$$

$$W/C_D S = 201/(0,9 * 4,0) \text{ à } 201/(1,1 * 0,93)$$

$$W/C_D S = 55,83 \text{ à } 196,5 \text{ lb/ft}^2$$

⁽⁹⁾ S représente une surface de référence spécifique pour le calcul du coefficient de trainée. Cette surface de référence est choisie dans le repère du fragment considéré pour faciliter les calculs.

Le fragment 2 était supposé représenter 62 % du moyeu complet, avec sa liaison mécanique à l'arbre encore partiellement présente. Il est fort probable que sa chute se produise face avant vers le bas, avec un léger angle.

$$W_t = 127 \text{ kg (280 lbs)}$$

$$S = 0,62(\pi r^2 - \pi r^2)$$

$$S = 0,62 (3,14159) * (17^2 - 13,3^2) = 218,4 \text{ in}^2 (1,52 \text{ ft}^2)$$

$$C_D = 0,9 \text{ to } 1,2 \text{ selon l'angle de chute (note : 1,2 provient de la surface augmentée présentée au flux d'air)}$$

$$W/C_D S = 280/(1,2 * 1,52) \text{ à } 280/(0,9 * 1,52)$$

$$W/C_D S = 153,5 \text{ à } 204,7 \text{ lb/ft}^2$$

La [Fig. 12](#) présente les calculs balistiques mis à jour par le NTSB. La région grise est la région de recherche obtenue par calcul début 2018, telle que décrit dans le rapport ([BEA, 2019](#)). Chaque segment de couleur illustre la zone de chute obtenue avec les nouvelles données (mise à jour de la localisation de l'évènement, masses et vitesses d'éjection simulées, plage de coefficients balistiques, angles d'éjection). Globalement, la zone de recherche s'est décalée vers l'ouest comparativement à celle de début 2018. Ces calculs ne tiennent pas compte d'un quelconque décalage lié au mouvement du glacier.

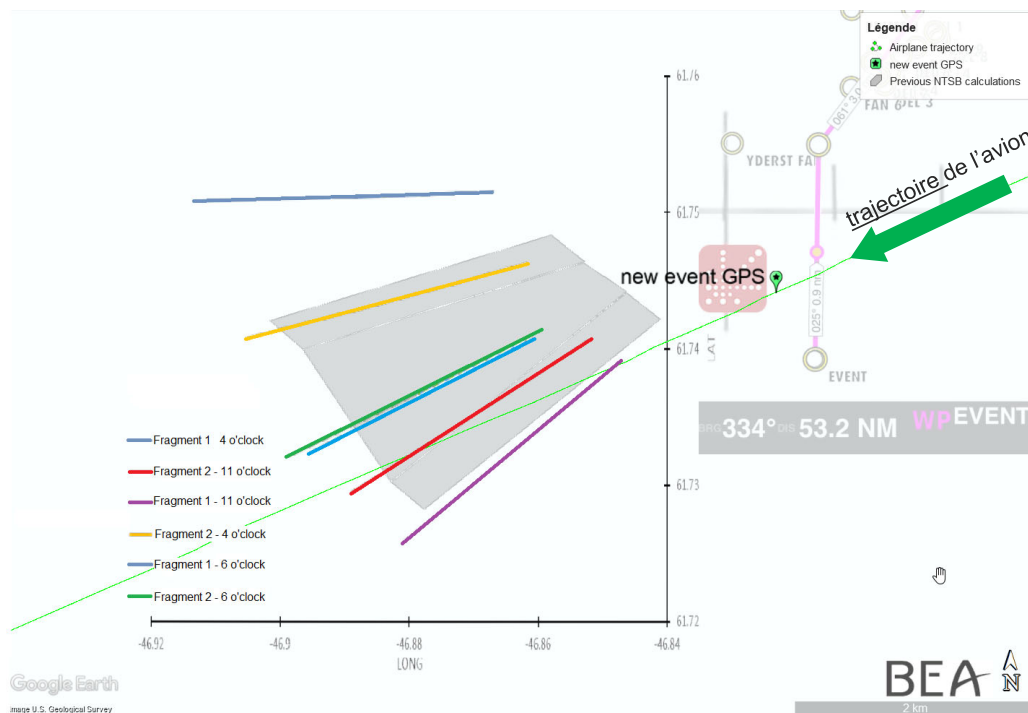


Fig. 12 : Calcul des zones de chute des deux fragments. Chaque simulation a considéré une éjection d'un fragment avec un angle radial de 4, 6 et 11 heures. Les positions 4 et 6 heures ont été choisies pour délimiter la position probable du débris éjecté à 5 heures, en tenant compte des incertitudes liées aux dommages observés sur le moteur. La région grise représente la zone de recherche calculée par le NTSB début 2018.

1.2.2.3 Calculs balistiques d'Airbus

Différents jeux de données étaient disponibles en tant qu'hypothèses de départ concernant la séparation des fragments du moteur et leur trajectoire : observations des dommages sur le moteur, résultats de la simulation LS-Dyna, données de vol enregistrées. Les masses, géométries, vitesses et angles d'éjection des fragments ont été estimés à partir de la simulation LS-Dyna et des dommages sur le moteur. La localisation de l'évènement ainsi que l'altitude et la vitesse de l'avion étaient déduits des données de vol enregistrées. Cependant, la localisation de l'évènement a été mise à jour après la Phase II ([paragraphe 1.2.1](#)) et le besoin de mener de nouveaux calculs balistiques a été discuté à cette occasion.

Il a toutefois été estimé inutile de conduire ces nouveaux calculs avec la méthode Airbus, car les hypothèses prises au moment des premiers calculs (fin 2017) étaient suffisamment proches des données finales. La seule différence était la localisation de l'évènement, qui a été décalée approximativement de 800 m le long de la trajectoire de l'avion, comme discuté dans le [paragraphe 1.2.1.1](#).

Les résultats de fin 2017 ont donc été décalés d'approximativement 800 m. Ce décalage ne prenait pas en compte de mouvement du glacier. La position initiale de la zone de recherche Airbus a cependant été conservée en tant que zone de recherche secondaire ([Fig. 13](#)).

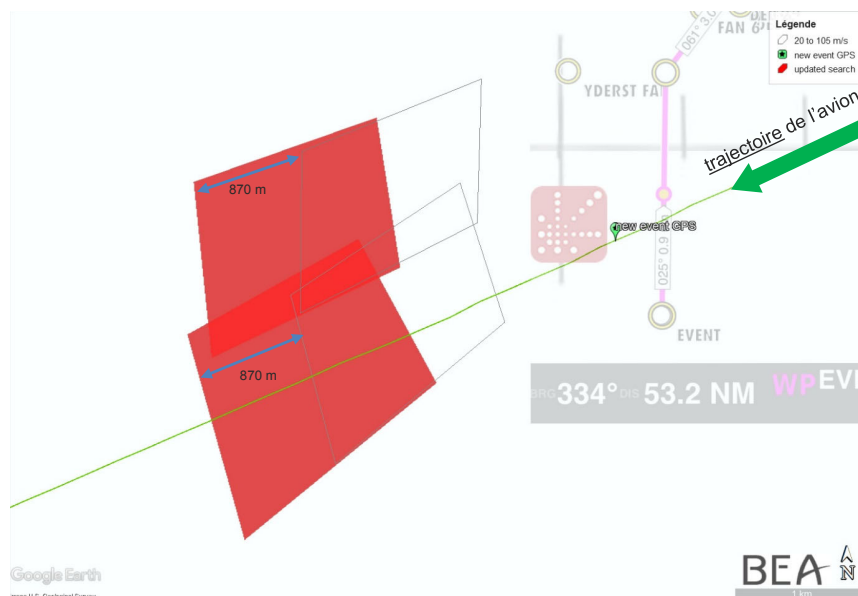


Fig. 13 : Zone de recherche décalée (en rouge) par rapport aux calculs d'Ariane de fin 2017 (en gris)

1.2.2.4 Mise à jour de la zone de recherche

Une mise à jour de la zone de recherche a été proposée compte tenu des résultats de la simulation LS-Dyna, du réajustement de la localisation de l'évènement, et des légères modifications apportées par les nouveaux résultats de calculs balistiques. Cette zone de recherche devait avoir une taille suffisamment raisonnable pour pouvoir être sondée par des moyens au sol lors d'une campagne de recherche systématique d'une durée de 4 semaines.

Comme pour la Phase II (BEA, 2019), une superposition des différents résultats balistiques a été considérée afin de définir des zones de recherche primaires et secondaires.

Les régions en rouge sur la [Fig. 14](#) sont les régions où les résultats de calcul d'Airbus et du NTSB se superposent. Il convient de noter que les résultats du BEA étaient très similaires à ceux du NTSB. Les zones oranges sont les zones où seul l'un des deux calculs, le calcul réajusté d'Airbus ou celui du NTSB, prédit la présence d'un fragment de moyeu.

Une zone étendue englobant les zones rouge et orange a été définie (bleu ciel sur la [Fig. 15](#)) afin de tenir compte des incertitudes sur les données d'entrée.

Aucune de ces zones ne tenait compte d'un quelconque décalage liée au mouvement du glacier. En d'autre termes, ces zones étaient calculées et n'étaient valables que pour la date de l'évènement.

Pour prendre en compte ce décalage, une dilatation a été appliquée à la zone bleu ciel (zone bleu foncé sur la [Fig. 15](#)). Cette dilatation représentait environ 200 m vers l'ouest et 200 m vers le sud, et était appliquée sur les extrémités ouest et sud de la zone, afin de rester conservatif (elle n'était pas appliquée sur l'extrémité nord-est).

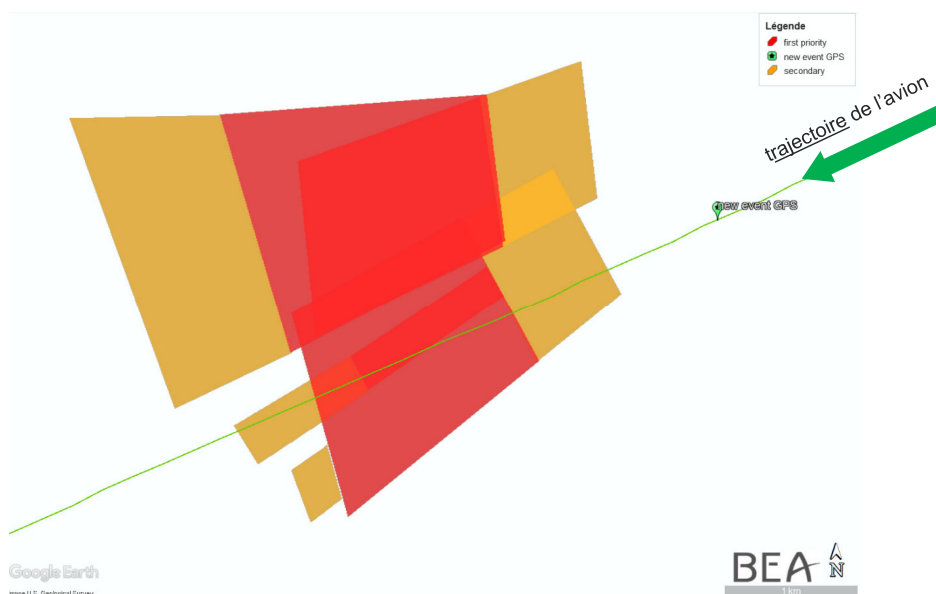


Fig. 14: Zones de recherche primaires (en rouge) et secondaires (en orange) mises à jour

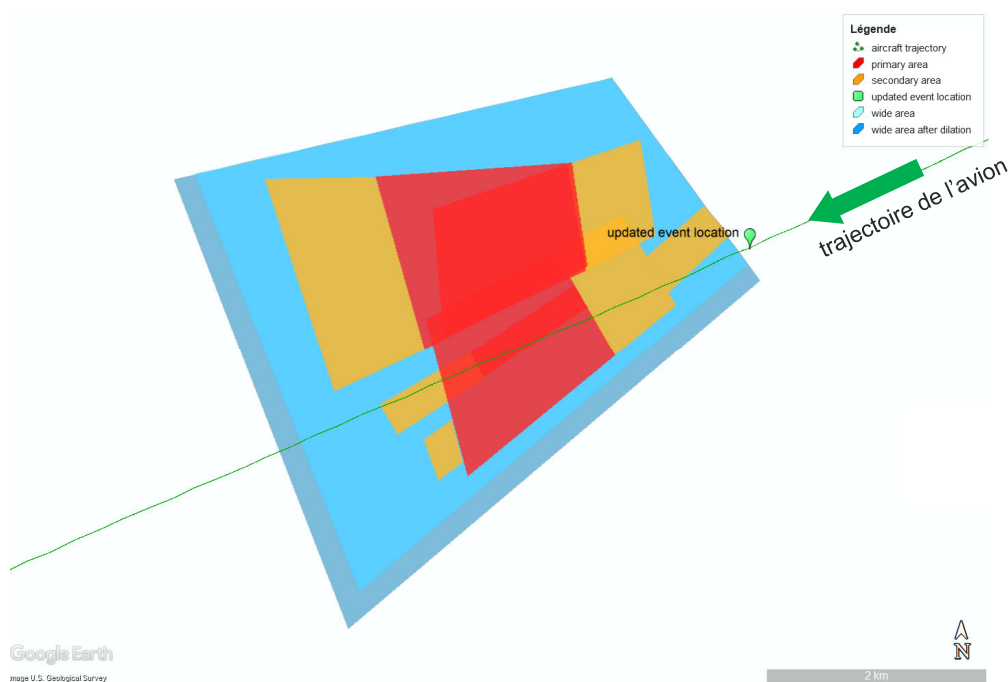


Fig. 15 : Zone de recherche finale mise à jour. La zone primaire (en rouge) mesure $4,4 \text{ km}^2$, la secondaire (rouge + orange) $8,1 \text{ km}^2$, et la zone totale après dilatation (bleu foncé) mesure 17 km^2

1.3 Analyse d'imagerie radar

1.3.1 Généralités

Le traitement initial des images en bandes X, L et UHF acquises durant la campagne d'acquisition d'images radar réalisée en avril 2018 n'a pas permis de détection convaincante de fragment de moyeu. Ceci était dû d'une part au niveau élevé du fouillis radar⁽¹⁰⁾ et d'autre part à la faible section équivalent radar de la cible en bandes basse fréquence ou de la forte atténuation de l'écho de la cible en bandes haute fréquence.

Pourtant, la poursuite du post-traitement a montré que le moyeu de test enfoui intentionnellement sous 1,2 m de neige à proximité de la zone de recherche pouvait être détecté en bande X, mais avec un rapport signal sur bruit très faible (l'écho de la cible n'était que de 10 % du niveau du fouillis radar pour un pixel donné).

Afin de détecter de façon fiable les fragments recherchés avec un taux de faux positifs raisonnablement faible, les fluctuations d'amplitude aléatoire (appelées chatoiement, ou speckle) du fouillis radar devaient être ramenées bien en-deçà du niveau de l'écho de la cible. Ainsi, l'image devait être analysée en « multi-vues » (typiquement un équivalent d'au moins 100 vues était nécessaire, voir paragraphe [1.3.2](#)). Cela a été rendu possible parce que plusieurs vues indépendantes pouvaient être calculées pour chaque polarisation de chaque acquisition, et parce que le programme d'acquisition comportait plusieurs directions (caps) et plusieurs angles d'incidence.

Des précautions devaient être prises pour compenser les fluctuations générées par l'antenne, les bruits thermiques et les bruits système, et les ambiguïtés et déformations géométriques inhérentes à la géométrie radar dans l'image composite finale (qui est la somme totale de 432 images SAR).

L'application d'un filtre à taux de fausse alarme constant, suivi d'une inspection visuelle des alarmes restantes ont mené à l'établissement d'une liste de positions candidates des fragments de moyeu (ainsi que de plusieurs débris légers de moteur non récupérés).

⁽¹⁰⁾ Le fouillis radar est composé des échos parasites revenant de cibles qui sont par définition inintéressantes pour l'opérateur radar. Il est constitué d'échos d'énergie retournés par le sol, par la mer, par les précipitations, par les aéronefs, par les échos se situant au-delà de la portée utile du radar ou de tout autre phénomène obscurcissant le signal recherché comme le bruit de fond.

Le prochain paragraphe décrit les problèmes liés au traitement multi-vues massif d'images SAR lorsqu'on l'on se concentre sur des objets sous la surface, dans un environnement non-lambertien⁽¹¹⁾ présentant une rétrodiffusion élevée et qui dérive lentement.

1.3.2 Motivations du traitement multi-vues massif

La zone de recherche de la Phase II mesurait environ 5 km par 5 km, et la vérification de chaque alarme représentait un certain coût : après la phase d'acquisition des données radar, chaque localisation potentielle nécessitait de pelleter deux tonnes de neige. Une telle activité, dans un environnement polaire hostile, à haute altitude (1 850 m) est une tâche éprouvante, même pour des explorateurs polaires bien entraînés. Le SAR est intrinsèquement un détecteur d'onde cohérent, ses images sont donc affectées par le speckle. En d'autre termes, l'intensité de chaque pixel sur une surface uniforme est distribuée aléatoirement, selon la loi de Raleigh (courbe en forme de cloche sur la Fig. 16, à gauche).

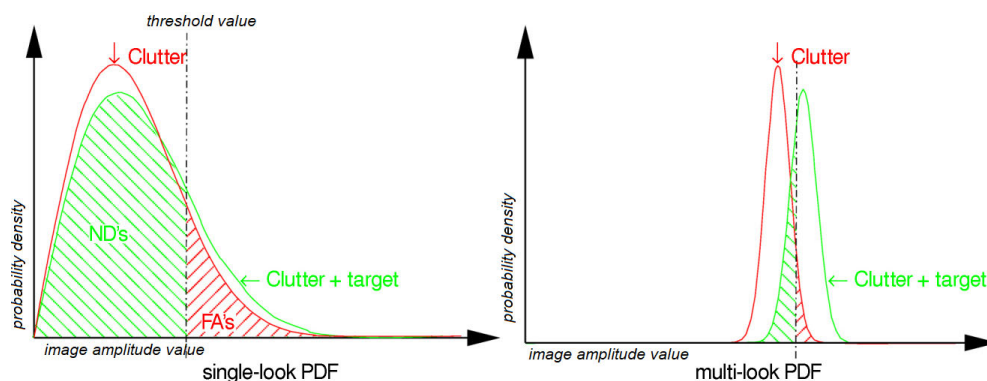


Fig. 16 : Comparaison de la fonction de densité de probabilité du niveau de pixels pour du fouillis seul (clutter), en rouge, et pour du fouillis plus une cible à 10 % du niveau du fouillis, en vert. À gauche, pour une seule vue (single look) et, à droite, pour l'équivalent de 18 vues indépendantes. Pour un seuil (ligne mixte) donné, la surface hachurée en vert donne la probabilité de non-détection (ND) et la surface hachurée en rouge donne celle des fausses alarmes (FA).

La détection du fragment en bande X a été un défi : lorsque l'écho de la cible ajoute 10 % au fouillis radar, il modifie la distribution aléatoire de l'intensité de la courbe rouge vers la courbe verte, Fig. 16 à gauche. Un seuil de détection (ligne pointillée rouge sur la Fig. 16) pour une image donnée génèrerait une forte probabilité de non-détection (ND, zone hachurée en vert sur la Fig. 16) ou une forte probabilité de fausses alarmes (FA, zone hachurée en rouge), ou les deux.

La technique de multi-vues consiste à considérer la moyenne des intensités provenant de mesures indépendantes, ce qui amène à une forme de cloche plus étroite, et donc à des probabilités plus faibles de ND ou de FA pour un seuil choisi entre le niveau du fouillis radar et celui du fouillis auquel s'ajoute le signal de la cible. Ceci est illustré sur la Fig. 16 à droite, avec 18 mesures indépendantes (les zones hachurées sont beaucoup plus petites).

Le multi-vues spatial (moyenne de pixels voisins) consiste à prendre la moyenne de mesures indépendantes voisines provenant de la même image, et à comparer entre eux des groupes de pixels contenant le fouillis et la cible et des groupes de pixels contenant le fouillis seul.

⁽¹¹⁾ La loi de Lambert décrit la diffusion uniforme d'une onde radio incidente dans le demi-espace supérieur d'une surface. Il en résulte que la luminosité apparente d'une surface varie avec le cosinus de l'angle d'incidence en imagerie optique (et avec la cotangente en imagerie radar). Les surfaces rugueuses diffusent généralement les ondes radio selon cette loi, du moins lorsqu'on l'on se situe hors des conditions de réflexion spéculaire. Dans le contexte d'un radar à visée latérale, l'angle d'incidence se situe typiquement dans la plage utile de 10° à 80°, de ce fait les procédures standard de correction pour les images radio ont été élaborées dans le cadre de la loi de Lambert. La calotte glaciaire ce comporte cependant très différemment (en bande X, la luminosité de surface peut diverger de plus de 4 dB de la loi de Lambert) car les ondes radio sont majoritairement réfléchies depuis l'intérieur de la couverture neigeuse (et marginalement depuis la surface) et sont affectées par des phénomènes de réfraction et d'atténuation dans les deux directions. Une équivalence de la calotte glaciaire en imagerie optique serait une opale, dont le reflet irisé est également fortement non-lambertien, ce qui explique son aspect étrange.

Hors, du fait de la petite taille de la cible (moins de 4 pixels de 20 cm, le diamètre du moyeu entier étant autour de 80 cm), cette méthode s'est avérée inefficace.

Si l'on cherche à obtenir la moyenne de plus d'une douzaine de pixels voisins, de plus en plus de pixels n'ayant que le fouillis seul seront inclus, ayant pour effet une convergence de la distribution des densités vers la courbe rouge au lieu de la courbe verte, diminuant les probabilités de FA et de ND. C'est pourquoi des mesures indépendantes au voisinage du même pixel, mais sur des images différentes, doivent être utilisées pour calculer cette moyenne. Pour une acquisition donnée en bande X, deux actions peuvent être réalisées :

- ❑ La moyenne des images des 4 polarisations peut être utilisée (les champs électriques horizontal et vertical sont émis alternativement et les deux sont détectés) : c'est équivalent à trois mesures indépendantes (la « loi de réciprocité » assure une symétrie d'inversion temporelle entre émission horizontale / détection verticale et émission verticale / détection horizontale).
- ❑ Des images dont la visée est légèrement en avant ou en arrière de l'axe de l'antenne peuvent être obtenues par calcul, et utilisées dans la moyenne. La largeur du faisceau de l'antenne en bande X limite le nombre d'images possibles à 6.

En conclusion, 24 images équivalentes à 18 mesures indépendantes peuvent être obtenues à partir d'une seule acquisition en bande X (i.e. le nombre équivalent de vues, ou NEV est de 18).

La zone de recherche du moyeu de soufflante était couverte par 6.108 pixels. Une probabilité de ND à 30 % et un taux de FA de 10 % auraient mené à des millions de fausses alarmes, avec 30 % de chances de manquer la vraie cible. Il était donc nécessaire d'augmenter le NEV à plus de 100 en prenant la moyenne des images de toutes les acquisitions disponibles, dans le but d'atteindre un taux de FA (par pixel) qui se situe dans la gamme 10^{-8} à 10^{-7} considérée comme suffisamment faible pour compenser le nombre élevé de pixels dans la zone de recherche.

1.3.3 Difficultés techniques en multi-vues massif

La taille des fragments recherchés n'était pas connue avec certitude. Ils proviennent d'un moyeu de 80 cm de diamètre, leur taille est donc probablement inférieure.

Le niveau de défocalisation de la cible, lié à la diffusion électromagnétique dans la couche de neige/glace qui la recouvre, n'était pas connu. Il a donc été décidé de construire une image en multi-vues haute résolution (i.e. sans moyenne spatiale) à partir de toutes les acquisitions disponibles en bande X, et d'effectuer la moyenne spatiale ultérieurement, en se basant sur la taille de l'élément structurant (SE) du « filtre à taux de fausses alarmes constant » dit filtre « haut-de-forme »⁽¹²⁾. Différentes valeurs (trois, cinq et sept pixels) ont été testées pour le diamètre du SE.

La bande X a fait l'objet d'acquisition selon quatre caps (parallèlement et perpendiculairement à la trajectoire du F-HPJE), avec pour chaque cap, trois bandes d'acquisitions et un recouvrement d'un tiers entre chaque bande adjacente. Pour deux caps, l'angle de dépression de l'antenne était de 30°. Pour les deux autres caps (perpendiculairement aux deux premiers), l'acquisition a été faite deux fois avec un angle de dépression de 50°, en anticipation de l'usage d'une application d'interférométrie⁽¹³⁾. Le nombre total d'acquisitions s'élevait à 18, pour un total de 432 images « simple vue » à compiler.

⁽¹²⁾ Le filtre « haut de forme » fait référence à plusieurs techniques de filtrage d'espaces réel ou d'espaces de Fourier. Le nom « haut de forme » provient de la forme du filtre, une fonction rectangulaire, lorsqu'il est observé dans le domaine dans lequel le filtre est construit.

⁽¹³⁾ InSAR, pour Interferometric synthetic aperture radar, ou radar à synthèse d'ouverture interférométrique.

La loi de fusion permettant de minimiser le speckle est relativement directe et dépend du rapport signal sur bruit (SNR, pour signal to noise ratio). Le poids de chaque composant doit être proportionnel à $SNR/(SNR+1)$, où SNR doit être vu comme étant le rapport « fouillis sur bruit ».

L'astuce finale réside dans le fait que les deux images cross-polaires (H_v et V_h) doivent être moyennées de manière incohérente avant d'être combinées aux autres, permettant ainsi une amélioration de 3 dB du SNR.

Hormis les difficultés de calcul liées à la synthèse et au mapping des images aux coordonnées du sol (les images sont initialement référencées par des coordonnées de distance obliques liées au radar) et au stockage de 432 images de 25 000 par 25 000 pixels chacune et de leurs données annexes, la principale difficulté venait du recalage des images (acquises selon différents caps et géométries) et l'évaluation du rapport signal sur bruit.

1.3.4 Problèmes de recalage (absolu) des images

Des réflecteurs de calibration avaient été déposés à la limite de la zone de recherche deux semaines avant la campagne ONERA par une équipe du GEUS, à des fins de recalage des images. L'un des réflecteurs (la sphère de Luneburg, orientée au zénith) s'était retrouvée sous la neige au milieu de la campagne ONERA. Ceci associé au fait que la zone de recherche était extrêmement homogène, a empêché l'utilisation des points de liaison pour recalibrer les images de différentes acquisitions.

Par chance, l'unité de navigation inertielle (INU, inertial navigation unit) hybride de l'ONERA (un GPS différentiel) a pu fournir une trajectoire de haute précision (10 cm à l'horizontal et 20 cm en vertical dans le cas nominal), ce qui a permis une résolution en azimuth de 10 cm sur une distance de 5 km, sans nécessité d'autofocus.

Grâce à un système de réinjection et d'enregistrement de l'impulsion transmise en même temps que les données radar ainsi qu'une fenêtre de réception pendant laquelle seul le bruit est enregistré, les décalages possibles des délais internes au radar ont pu être calibrés à une fraction de nanoseconde près. Cela permet une précision de géolocalisation absolue des images de l'ordre de 50 cm sans points de référence.

Cela suppose bien entendu que l'altitude du terrain soit connue. Dans ce contexte, le modèle d'élévation du terrain a été évalué à partir de données ICESat⁽¹⁴⁾. Le modèle a été localement corrigé par quelques mesures GPS de surface précises, réalisées durant la campagne du GEUS, et par quelques profils altimétriques verticaux de la surface obtenues par mesures SAR.

Cependant les pièces recherchées n'étaient pas à la surface mais enfouies sous deux à trois mètres de neige et de glace, dont l'index de réfraction n'est pas connu (mais se situe probablement entre 1,25 et 1,35 dans les premiers mètres). Même si l'altitude terrain était bien connue, la distance exacte entre l'émetteur radar et la pièce ne l'était pas précisément. Et comme le SAR est un radar à visée latérale, l'incertitude verticale génère elle-même des incertitudes en latitude et longitude quant à la position de la pièce.

⁽¹⁴⁾ Le modèle d'élévation du terrain ICESat a été fourni par le Centre Géospatial Polaire, bourses NSF OPP 1043681, 1559691 & 1542736.

1.3.5 Problèmes liés au recalage de la profondeur

La profondeur réelle des fragments du moyeu était inconnue durant la phase de post-traitement des données radar. Malgré tout, plusieurs autres débris provenant du moteur ont été détectés pendant ce processus, dont certains avaient été repérés visuellement sur la glace durant la Phase I, mais n'avait pas pu être récupérés.

Il avait été établi, à partir de la campagne d'acquisition SAR et de l'évaluation de l'épaisseur de la couche de neige qui s'était déposée entre la Phase I et la Phase II, que la profondeur des fragments se situait certainement entre 0 et 1 m de profondeur de plus que celle des autres débris, c'est-à-dire 1 à 2 m sous la surface au moment de la campagne d'acquisition radar.

Une modélisation par simulation numérique de la réfraction de la couche située au-dessus de la pièce, considérée comme un média homogène à indice de réfraction constant, a montré que pour un angle de dépression de 30° de l'antenne, l'effet de la réfraction sur la cible est, à moins d'un pixel près, le même que si la cible se trouvait dans l'air (média d'indice 1) mais à une altitude inférieure à celle de la surface (à une profondeur apparente sous celle-ci).

Ainsi pour ces acquisitions, la profondeur « apparente » a pu être mesurée (mesures stéréo) en appariant les points correspondant aux gros débris connus dans deux images acquises avec des visées opposées. Les images ont alors pu être recalées en biaisant le DEM par la valeur de profondeur apparente ainsi trouvée.

Lorsque l'angle de dépression de l'antenne était de 50°, l'angle d'incidence variait davantage au sein de la même bande de fauchée, générant un décalage vertical de la profondeur apparente aux deux extrémités de la bande de fauchée, et un décalage horizontal légèrement supérieur à un pixel.

Cela se produisait à la frontière de la bande de fauchée, où l'illumination de l'antenne est faible, et l'angle d'incidence plus élevé (un angle d'incidence plus élevé induit une zone éclairée par l'antenne plus restreinte). Il a donc été considéré que le poids de l'image correspondante serait très faible, et l'impact du décalage horizontal et son effet général sur la localisation de la pièce négligeable.

En conclusion, deux « profondeurs apparentes » pour chacune des deux valeurs d'angle de dépression de l'antenne ont été obtenues en moyennant les mesures sur chacun des débris connus. Ces deux valeurs ont été utilisées pour recaler toutes les images.

1.3.6 Problèmes liés au mouvement de surface

Les images en bande X ont été acquises au cours de deux vols séparés de cinq jours, durant la Phase II, en avril 2018. La lente dérive de la calotte glaciaire vers l'océan, à une vitesse approximative de 60 m par an en moyenne selon des mesures satellitaires dans la zone de recherche, se traduit par un décalage significatif de quatre pixels sur les images radar.

La comparaison entre les positions des réflecteurs mesurées lors de leur mise en place et leurs positions mesurées 13 puis 18 jours plus tard à partir des images SAR de l'ONERA était conforme aux grandeurs globales, mais mettait en évidence des gradients locaux plus élevés qu'attendu (60 m / an au niveau du moyeu de test intentionnellement enfoui, mais 100 m / an au niveau de la sphère de Luneburg).

Ces gradients élevés étaient corroborés par le maillage dense de crevasses nord/sud, résultant probablement de ruptures de cisaillement du fait d'une différence des vitesses supérieure à la limite de plasticité de la glace ($\sim 2,10^{-2}$ / an).

En ce qui concerne les « multi-vues », les données du second vol ont été simplement décalées d'une valeur de dérive moyenne mesurée, la différence restante ne représentant qu'un pixel au plus.

1.3.7 Problèmes liés à l'évaluation du rapport signal sur bruit

Une fois les images géométriquement recalées, la combinaison optimale d'images « simple vue » dépend du rapport signal sur bruit (SNR). L'évaluation précise du SNR nécessite une bonne évaluation du niveau de bruit (principalement du bruit thermique) et du niveau de fouillis radar.

Pour aboutir à ce résultat, il a été nécessaire d'améliorer le processeur SAR pour qu'il calcule des éléments complémentaires comme le bruit thermique dans l'image calculé à partir de la fonction de densité de puissance de bruit (PDF du bruit) du signal brut et des éléments du processeur comme l'égalisation des bandes, la compensation du diagramme d'antenne, le gain du processeur, etc.

La PDF du bruit a été évaluée à partir des enregistrements de bruit seul effectués après chaque émission dans une fenêtre dédiée avant le premier retour radar (nadir). Étant donné que la calotte glaciaire est presque plate, le premier écho radar correspond à l'écho nadir qui est le point situé à la verticale de l'avion, point de la surface effectivement le plus proche du radar. Avant cet écho, le seul signal enregistré par le système est du bruit thermique.

L'évaluation du niveau du fouillis est critique aussi bien pour une pondération optimale des images caractérisées par des niveaux de bruit différents et pour normaliser les variations de la rétrodiffusion liées à l'angle d'incidence qui, si on ne les corrige pas, introduisent dans l'image multi-vues des discontinuités très nettes sur les bordures ([Fig. 17](#)).

Les variations du niveau du bruit de fouillis avec l'angle d'incidence ont été modélisées pour chaque polarisation par un polynôme du second degré. Ce modèle de fouillis a été utilisé pour combiner les 432 images et former l'image multi-vues qui est utilisée pour la recherche de la pièce. Quatre images composites correspondant chacune à une direction d'acquisition ont aussi été formées pour permettre d'évaluer la profondeur d'enfouissement de la pièce.

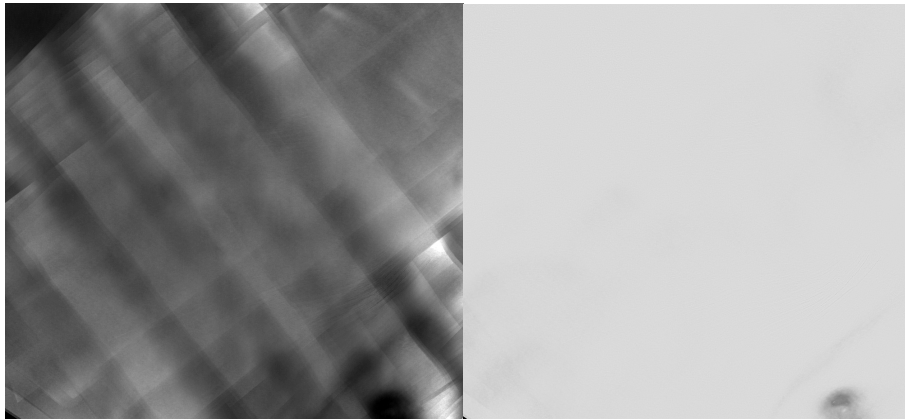


Fig. 17 : 432 vues en une image composite en bande X, considérant un fouillis radar lambertien (à gauche, avec contraste augmenté pour amplifier les discontinuités entre sous-bandes/vues) et considérant un fouillis radar s'éloignant de la loi de Lambert selon une fonction polynomiale de degré 2 de l'angle d'incidence (à droite)

1.3.8 Résultats

La détection de cible a été menée via un filtre « haut de forme » appliqué sur l'image composite finale, dont le seuil était choisi légèrement au-dessous du niveau mesuré du moyeu de test enfoui par le GEUS.

Plusieurs tailles de l'élément structurant (SE haut) du filtre de trois, cinq et sept pixels ont été testées pour s'accommoder des incertitudes sur la taille réelle des fragments et sur la défocalisation de l'image de la cible liée à l'hétérogénéité de la couche de neige et de glace. Une centaine de positions candidates ont été obtenues. Elles ont été examinées individuellement : dans un premier temps, les alarmes qui sont apparues juste sur la lèvre d'une crevasse ont été éliminées. Cette opération n'est pas évidente, car en fonction de la position dans la zone de recherche, la profondeur des lèvres des crevasses peut différer significativement de la profondeur de mise au point (les ponts de neige qui bouchent les crevasses peuvent être d'une épaisseur plus élevée ou plus faible que la profondeur de mise au point). Cette différence de profondeur peut faire en sorte que des lèvres de crevasse se superposent à la position de certaines cibles.

La visibilité de la cible dans différentes directions et la comparaison de sa position avec les positions des lèvres des crevasses a permis dans ce cas de conserver des positions candidates proches de lèvres de crevasses (mais pas sur ces lèvres). Cette étape s'est révélée cruciale car le fragment de moyeu retrouvé était effectivement positionné à seulement un mètre de la lèvre d'une crevasse, dont le pont de neige s'arrêtait seulement deux mètres au-dessous (cette configuration a représenté un défi pour la phase de récupération – voir paragraphe 4).

Dans un second temps, les candidats dont la position variait entre différentes directions et dont la profondeur n'était pas cohérente avec celle attendue pour les fragments ont également été éliminés ([Fig. 18](#)).

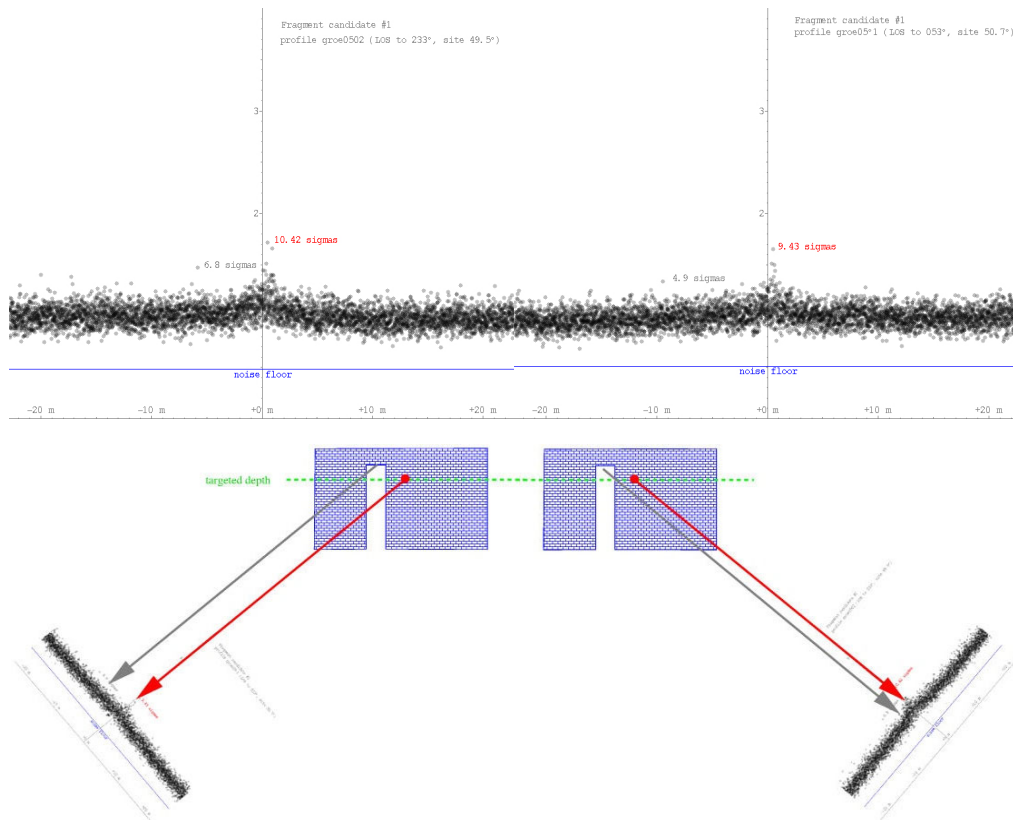


Fig.18 : Comparaison entre les profils en bande X du candidat #1 de directions opposées (233°, en haut à gauche et 053°, en haut à droite). Lorsque l'on compare le profil de sous-images obtenues de directions opposées, le pic d'intensité doit correspondre si l'objet est à la profondeur attendue (point rouge, en bas). Les caractéristiques qui ne sont pas à la profondeur attendue (ici la baisse d'intensité liée à la présence d'air dans la crevasse) ne vont pas de pair (flèches grises) du fait de la perspective.

1.3.8.1 Résultats en bande X : détection du fragment du moyeu

À la fin du post-traitement (une fois toutes les corrections précédemment décrites appliquées), un seul candidat subsistait (Fig. 19). Du fait de sa position dans un champ de crevasses relativement dense, et également parce que les modélisations de l'incident prévoyaient plusieurs fragments, des candidats « secondaires » ont été identifiés en assouplissant les critères de recherche en particulier en diminuant le seuil du filtre.

La campagne du GEUS de mai 2018 avait permis le sondage exhaustif de 5 % de la zone de recherche à l'aide d'un GPR (durant 3 semaines), sans rien trouver. Il a donc été considéré qu'une alarme obtenue durant le post-traitement se situant dans ces 5 % était certainement une fausse alarme. Le seuil du filtre a alors été ajusté juste au-dessus de la première fausse alarme de cette zone des 5 %.

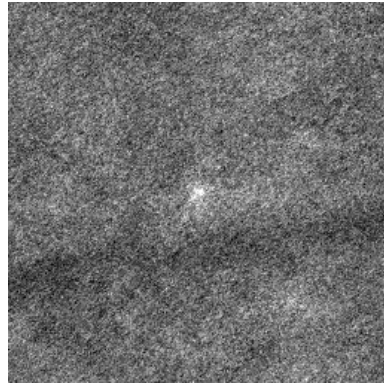


Fig. 19 : Candidat (pixels brillants) pouvant correspondre à un fragment du moyeu sur l'image finale en bande X, avec amélioration du contraste pour impression. La ligne horizontale sombre est une crevasse, sous un pont de neige de 6 m

Les coordonnées WGS 84 des cibles obtenues, à la date du 6 avril 2018 (c'est-à-dire sans prendre en compte une quelconque dérive liée au mouvement du glacier) sont les suivantes (voir [Fig. 20](#)) :

#1: 46,85348° O, 61,73563° N
#2a: 46,89025° O, 61,75220° N
#2b: 46,85370° O, 61,75392° N

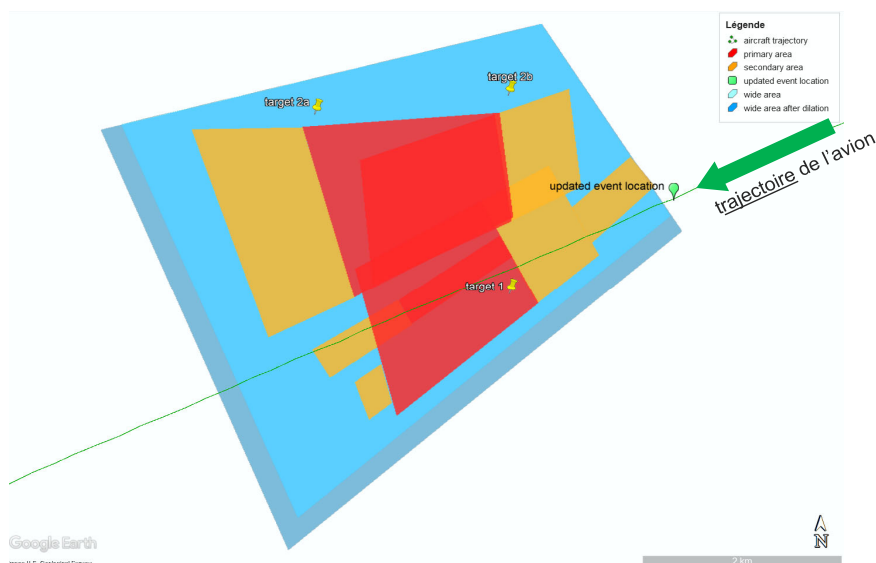


Fig. 20 : Localisation des candidats ONERA 1, 2a and 2b par rapport à la zone de recherche

1.3.8.2 Résultats en bandes L et UHF

Pendant la préparation et le déroulement de la campagne de recherche au sol, les données en bandes L et UHF ont été retraitées par l'ONERA en utilisant la même approche que celle décrite plus haut pour la bande X.

Le contraste obtenu en bande L était trop faible pour détecter les pièces efficacement. Malgré tout, les trois candidats obtenus en bande X ont été évalués : le candidat principal était visible en bande L, mais aucun des deux autres candidats secondaires ne l'était.

Le retraitement des données en bande UHF n'était pas terminé lorsque la campagne de recherche démarra, mais les résultats partiels n'étaient pas encourageants en ce qui concerne la détection de fragments de moyeux (les débris les plus saillants n'étaient pas ou très peu visibles).

Les mesures UHF ont cependant été critiques pour la récupération du moyeu de fragment localisé : du fait d'une pénétration plus profonde dans le sol, les crevasses étaient bien mieux détectées en bande UHF. La cartographie détaillée des crevasses obtenues grâce aux images UHF (Fig. 21) a permis à l'hélicoptère de planifier son atterrissage dans une zone sûre, entre des crevasses, pour l'installation du campement de l'expédition et a permis à l'équipe au sol d'anticiper les problèmes de sécurité durant la Phase III de recherches et durant la phase d'extraction.

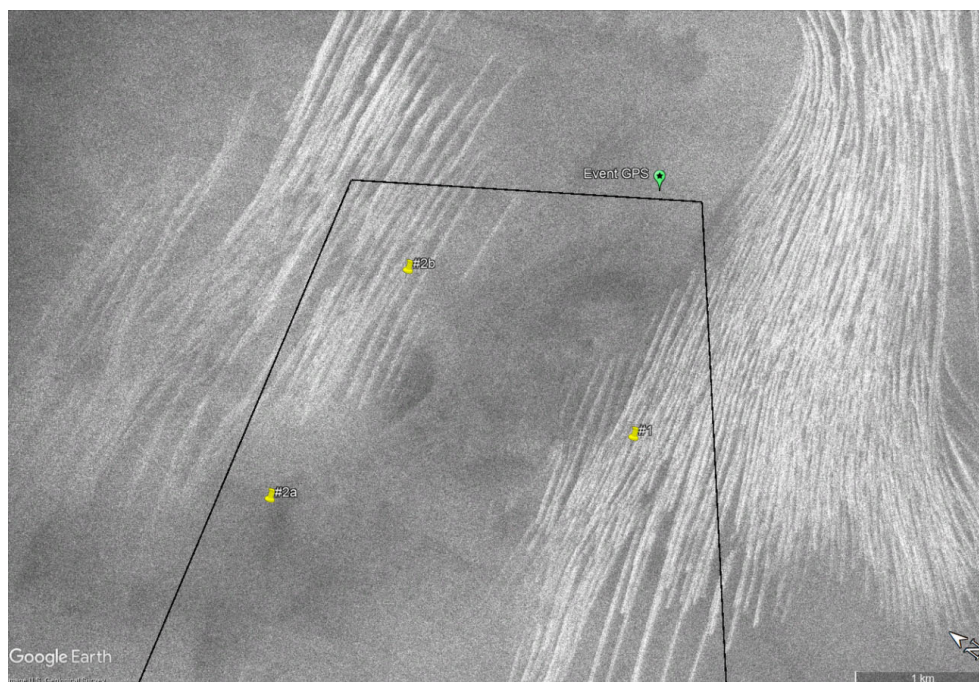


Fig. 21 : Exemple d'image en bande UHF (polarisation verticale) illustrant la présence des crevasses dans la zone de recherche (délimitée par la ligne noire). Les localisations des cibles ONERA sont symbolisées par les plots jaunes

1.4 Imagerie optique par satellite

En préparation de la future potentielle campagne au sol et une fois les résultats prometteurs de l'ONERA obtenus, il a été jugé nécessaire de réexaminer les images Pléiades de la zone de recherche. Deux objectifs étaient poursuivis :

- ❑ connaissant la position de la cible ONERA la plus prometteuse, il était intéressant de ré-observer les images datant d'immédiatement après l'évènement, afin de vérifier si la pièce pouvait y être visible et de confirmer sa localisation,
- ❑ le GEUS avait changé la position du moyeu de test enfoui durant la campagne au sol de la Phase II (Camp Recovery) à des fins de test et de calibration ; à la fin de cette campagne, sa position avait été matérialisée par des drapeaux en bambou avant qu'ils ne quittent le site. Deux groupes de drapeaux indiquaient la localisation du moyeu de test, qui se trouvait pile entre les deux. Il était intéressant de savoir si les drapeaux étaient toujours visibles depuis l'espace afin de récupérer facilement le moyeu de test et d'estimer la dérive du glacier entre la Phase II et la Phase III.

Les images Pléiades sont des images optiques par satellite ayant une résolution jusqu'à 50 cm. Pour être exploitables, les images doivent être prises par temps clair au-dessus de la région d'intérêt, voir (BEA, 2019) pour plus d'informations.

Trois jeux d'images ont été considérés : le premier était un jeu d'images prises au plus proche de l'évènement, lorsque le premier ciel découvert après l'évènement permettait d'avoir des images exploitables et de voir le sol. Elles ont été acquises le 11 octobre 2017.

Le second jeu de données a été acquis le 18 mai 2018, pendant la première campagne de recherches au sol, Camp Recovery (CR1), et le 28 mai 2018, soit juste après. Les dernières images ont été prises les 17, 19, 21 et 26 avril 2019, un an après CR1 et juste avant la seconde campagne au sol (Camp Recovery 2, CR2).

Le premier jeu d'images était le plus proche de l'évènement, c'est-à-dire que si la pièce était encore à la surface à cet instant, elle devait être visible sur ces images. Lorsque les images de mai 2018 ont été examinées, un décalage a été observé entre les coordonnées des deux groupes de drapeaux qui matérialisaient la présence du moyeu de test laissé sur le camp, sur les images satellites et leurs coordonnées réelles (Fig. 22).

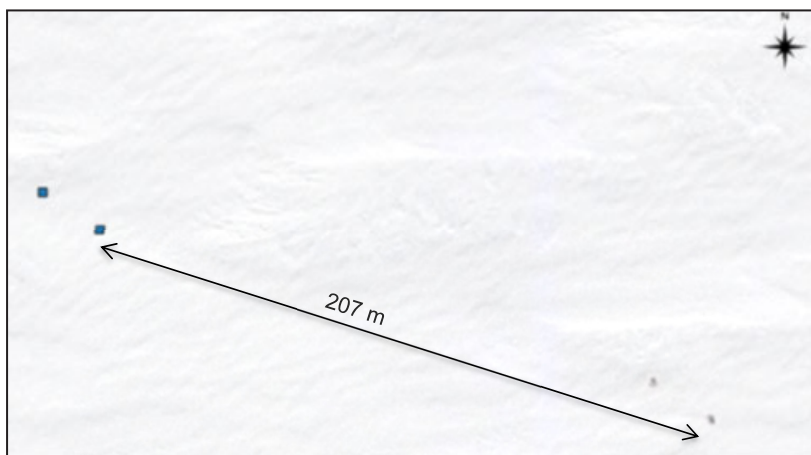


Fig. 22 : Images Pléiades datant du 28 mai 2018 – les drapeaux sont visibles depuis l'espace (deux points gris en bas à droite). Un décalage de 207 m est observé entre leur localisation réelle (carrés bleus, positions enregistrées sur site par GPS) et leurs positions sur les images satellites.

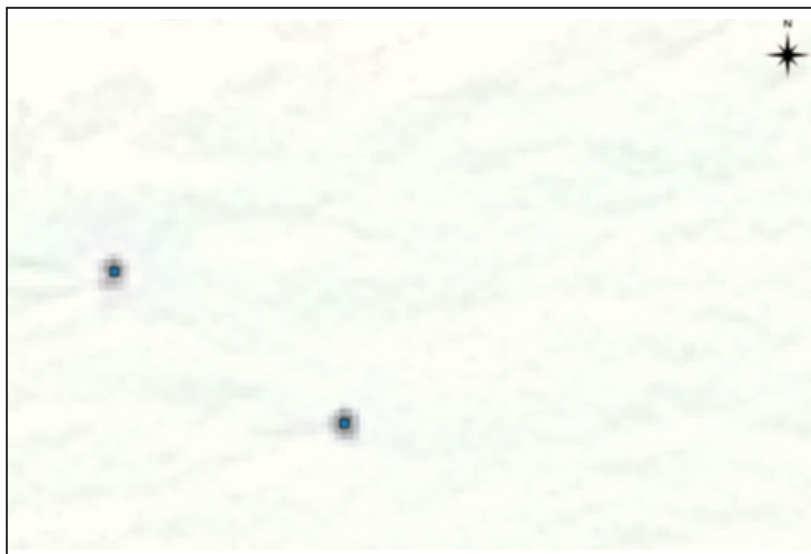


Fig. 23 : Images Pléiades datant du 18 mai 2018. Aucun décalage n'est observé entre la localisation réelle des drapeaux telle que mesurée sur site (points bleus) et leur localisation sur les images satellites (taches grises).

Ce décalage n'était pas visible sur les images du 18 mai (Fig. 23) lorsque l'on observait les drapeaux seulement. Cependant, lorsque l'on observait la localisation du campement, un décalage apparaissait également entre sa localisation réelle et sa position sur les images satellites (Fig. 24 et Fig. 25). Ce décalage dépassait 100 m.

L'explication obtenue par Airbus était qu'il n'y avait pas suffisamment de caractéristiques stationnaires visibles (telles que des rivières, des côtes ou des lacs) sur les images permettant de les recaler correctement aux coordonnées terrestres. Il n'était donc pas possible d'obtenir de coordonnées GPS précises d'un quelconque objet visible sur ces images satellites.

Malgré ces inconvénients, l'image du 11 octobre 2017 a été réexaminée en se concentrant sur la région autour de la position de la cible ONERA la plus prometteuse. Aucun objet n'a pu y être visuellement détecté (Fig. 26). En effet, l'image a été prise après plusieurs jours de couverture nuageuse. Des chutes de neige durant cette période auront rendu invisible tout objet présent à la surface.

Pour finir, les images d'avril 2019 ont été examinées à la recherche des drapeaux matérialisant la présence du moyeu de test. Aucun drapeau n'était plus visible, signifiant qu'ils étaient soit enfouis sous la neige, soit qu'ils avaient été balayés par le vent.

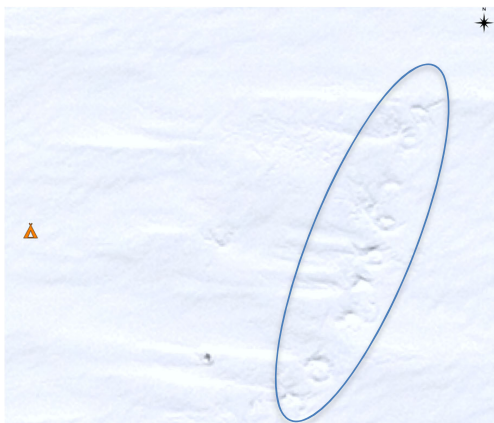


Fig. 24 : Images Pléiades du 28 mai 2018. La position réelle du campement est symbolisée par la tente orange. Les traces dans la neige (ovale bleu) matérialisent l'emplacement du campement sur l'image satellite

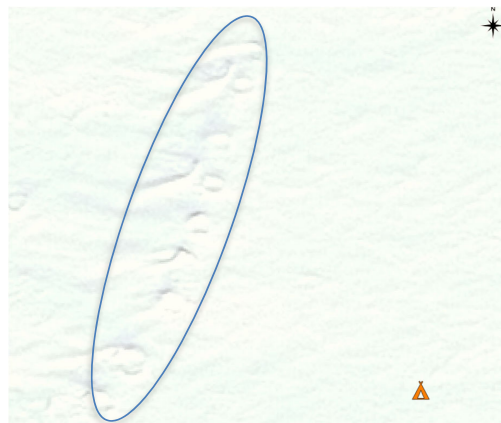


Fig. 25 : Images Pléiades du 18 mai 2018. La position réelle du campement est symbolisée par la tente orange. Les traces dans la neige (ovale bleu) matérialisent l'emplacement du campement sur l'image satellite



Fig. 26 : Localisation de la cible ONERA la plus prometteuse (point bleu), avec en arrière-plan l'image Pléiade du 11 octobre 2017. Aucun objet n'est visible sur l'image dans cette zone

2 - ÉVALUATION DE NOUVEAUX MOYENS DE DÉTECTION

L'une des conclusions de la Phase II des recherches étaient que « le GPR générerait beaucoup de faux positifs et de faux négatifs et avait une empreinte faible, ce qui en faisait un choix sous-optimal de moyen de détection pour une recherche sur une zone étendue » (Mankoff, et al., 2020). Mankoff ajouta qu'il restait un instrument acceptable si la zone de recherche est restreinte et si des acquisitions multiples dans des directions croisées pouvaient être réalisées – c'est-à-dire dans le cas d'une levée de doute de positions pré-localisées, ou d'une recherche locale.

De plus, même si le moyen de test était correctement détecté sur les images radar à la fin de la Phase II, le risque de ne pas avoir de nouvelle cible ONERA de haute confiance devait être considéré à cette époque.

Pour ces raisons et dans le cas où il devait y avoir une nouvelle campagne de recherche au sol dans une zone étendue, des moyens de détections plus efficaces, ayant une fauchée plus grande et une réponse plus robuste, étaient nécessaires avant de lancer cette Phase III.

Différentes nouvelles options ont été considérées pour une détection améliorée et sont détaillées ci-après. Les intérêts se sont focalisés sur les systèmes de détection de victimes d'avalanches, les chiens de détection et les détecteurs électromagnétiques

2.1 RECCO

Le système RECCO⁽¹⁵⁾ est un système commercial, sur étagère, mûr, utilisé pour la recherche de victimes d'avalanches. Il est disponible en version portable et en version héliportée.

(15) <http://recco.com/>

Les réflecteurs RECCO sont des transpondeurs passifs légers qui ne nécessitent ni énergie, ni activation pour fonctionner. Ils consistent en une diode et une antenne. Ils sont intégrés dans les produits de plus de 150 marques, tels que vestes, pantalons, casques, sacs à dos, protection dorsales, bottes, émetteurs-récepteurs, montres et harnais.

Le détecteur RECCO émet un signal radar directionnel. Lorsque le signal radar rencontre le réflecteur RECCO, il est renvoyé en écho au détecteur et indique à l'opérateur la direction du réflecteur. Plus le réflecteur est proche du détecteur, plus le signal retour est fort, ce qui permet à l'opérateur de localiser précisément le réflecteur.

La version portable peut localiser des réflecteurs RECCO à une distance allant jusqu'à 80 m dans l'air et 20 m à travers de la neige compactée, soit environ 30 m en pratique à travers la neige d'une avalanche.

La version pour hélicoptère peut couvrir de grandes surfaces rapidement. En opérant à une hauteur de 100 m avec une fauchée au sol de 100 m, il est possible de sonder 1 km² en six minutes.

Dans le cas du moyeu de soufflante, l'inconnue était la suivante : personne ne savait comment le système se comportait avec un objet en l'absence de réflecteur RECCO. De plus, le système ne pouvait pas être modifié ni amélioré dans le but de détecter une pièce en titane. Cependant, un test pouvait s'organiser simplement et rapidement.

Un test avec le système RECCO a été réalisé chez le constructeur en Suède, en septembre 2018, avec un morceau du moyeu de test. Le moyeu de test en titane a effectivement renvoyé un signal, mais uniquement lorsque le détecteur RECCO portable et le moyeu se trouvaient dans une orientation spécifique. De plus, ce signal ne s'est produit que parce que le signal émis a rebondi sur le moyeu, puis sur le métal de la veste de l'opérateur, puis enfin sur le récepteur qui a ensuite alerté l'opérateur qu'un objet avait été détecté. Cet usage détourné se servant de l'opérateur (ou d'une motoneige par exemple) comme intermédiaire est un mode acceptable d'utilisation, mais est trop dépendant de cette orientation, sur laquelle on ne peut pas s'appuyer lorsqu'il s'agit du moyeu réel recherché.

Lorsque le détecteur RECCO est utilisé avec des objets qui n'ont pas de réflecteur RECCO, les détections sont meilleures lorsque différents types de métaux sont présents et en contact entre eux (par exemple, des équipements électroniques dont les cartes comportent plusieurs métaux différents, ou des clés sur un porte-clés).

Étant donné que le fragment de moyeu retrouvé comportait plusieurs métaux autres que du titane, il est possible que le système RECCO portable ait été un excellent détecteur pour ce type de recherche : il est portable, léger, abordable, sur étagère, a un champ de détection élevé et un mécanisme de retour du signal idéalement adapté aux recherches étendues.

2.2 Chiens renifleurs

Les chiens ont un sens olfactif bien supérieur aux humains et peuvent détecter des odeurs très peu marquées. Les chiens renifleurs (ou chiens de détection) sont des chiens qui sont entraînés à rechercher des corps et des objets enterrés, en détectant des « altérations » d'odeur causées par quelques parties par million de molécules odorantes.

Les objets peuvent être aussi divers que des explosifs, des drogues illicites, des restes d'animaux sauvages, de l'argent, du sang, des fluides organiques tels que du carburant ou du pétrole, ou des appareils électroniques de contrebande tels que des téléphones portables illicites. Les chiens renifleurs sont également utilisés pour rechercher des victimes d'avalanche.

Selon la police danoise, lorsqu'un objet pénètre dans le sol et jusqu'à ce qu'il s'arrête, il génère une perturbation le long de son chemin conduisant à une concentration d'oxygène (dans de petites poches d'air) plus importante qu'à son voisinage. Cette présence plus importante d'oxygène peut amorcer un processus de dégradation des matériaux dans le sol (dans la neige par exemple) qui peut générer une odeur. C'est en réalité l'augmentation locale de la concentration en oxygène qui crée indirectement une odeur que les chiens peuvent détecter car plus la quantité d'oxygène est grande, plus le processus de dégradation possible est élevé, et donc plus l'odeur à détecter sera prégnante pour le chien.

En 2006, un Beechcraft Baron BE58, immatriculé G-BXNG, a fait un atterrissage forcé sur la calotte glaciaire du Groenland à la suite d'une panne moteur et de l'impossibilité de passer l'hélice en drapeau. L'AIB DK a publié un rapport d'enquête de sécurité relatif à cet accident non-mortel⁽¹⁶⁾. L'épave de l'avion ainsi qu'un fût de carburant vide, utilisé pour le sauvetage du pilote par hélicoptère à l'époque de l'évènement, ont été laissés sur le site.

⁽¹⁶⁾ <https://en.havarikommissionen.dk/aviation-archive/2006/06-510-255/>

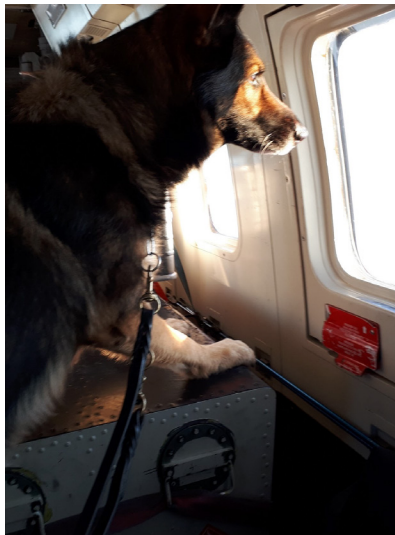
Fin 2017, la police danoise a répondu à ce qui semblait être le signal d'une balise de détresse (ELT, *emergency locator transmitter*) provenant de la calotte glaciaire. La police a déployé une équipe sur site en hélicoptère, dont deux chiens dirigés par deux policiers. Les deux chiens ont signalé la présence d'un objet enfoui à deux reprises. Ils avaient reçu un entraînement spécial dédié à la détection d'objets enterrés, ce qui signifie qu'ils réagissaient aux odeurs dans les zones « altérées » par une fouille, par un objet tombé ou par quelque chose se décomposant, etc.

La localisation correspondait à celle du Baron, à présent enfoui sous la neige, et du fût de carburant abandonné (en prenant en compte la dérive du glacier). L'excavation a été tentée mais du fait d'un manque de ressources, elle s'est arrêtée à un mètre sous la surface, et la balise a finalement cessé d'émettre. Il est probable que la batterie, en émettant un signal « batterie faible », ait entraîné l'activation de la balise.

Lorsque l'emploi de chiens renifleurs a été considéré pour localiser les fragments du moyeu de soufflante, les discussions avec la police danoise ont abouti à la proposition de méthodologie suivante : les chiens devaient être entraînés à travailler dans des conditions hivernales ; ils sonderaient la zone selon des traces de recherche en « S » en couvrant 15 x 100 m² par heure et par chien. La précision de leur détection serait de 2 x 2 m², sur la base du retour d'expérience disponible. Le temps de recherche effectif serait limité à trois heures par jour dans la zone de recherche.

Une condition supplémentaire était la mise à disposition d'un abri chauffé pour les chiens, qui devait être utilisé toutes les heures (il pouvait s'agir de l'hélicoptère, d'une tente chauffée, d'un container chauffé). La campagne de recherche serait basée sur des vols aller-retour journaliers, ou sur un campement sur site.

Étant donnée la surface que peut couvrir un chien, quatre chiens pourraient sonder une surface de $0,18 \text{ km}^2$ en dix jours. Comme la taille minimale de la zone de recherche systématique était estimée à 5 km^2 , la solution des chiens renifleurs a dû être écartée.



Source: AIB-DK

Fig. 27 : Chien renifleur avant (gauche) et après (droite) intervention sur la calotte glaciaire

2.3 Détecteurs électromagnétiques (EM)

Des détecteurs électromagnétiques avaient été évalués pour la Phase II de recherche, voir (BEA, 2019), mais ils avaient été écartés car les résultats étaient jugés insuffisants à cette époque. Les GPR (ou géoradars) étaient supposés être plus efficaces, mais ne se sont finalement pas révélés optimaux pour une recherche systématique. C'est pourquoi la technologie électromagnétique a été reconsidérée pour la Phase III.

Des scientifiques du Groupe d'HydroGéophysique (HGG⁽¹⁷⁾) de l'Université d'Aarhus, au Danemark, ont développé tTEM (towed transient electro-magnetic sensor, ou détecteur transitoire électromagnétique tracté), une méthode d'acquisition de données électromagnétiques transitoires au sol, dans le but de couvrir la gamme de profondeur de 0 à 30 m en 3D. Cette vaste section du sous-sol n'est couverte par aucune autre méthode géophysique efficace.

En réalité, le système peut « voir » plus profondément que cela, jusqu'à plus de 70 m, avec une distance entre mesures de 3 à 4 m. Les distances de fonctionnement typiques entre les lignes de sondage sont de 10 à 20 m, ce qui permet d'acquérir une « image » 3D complète du sous-sol.

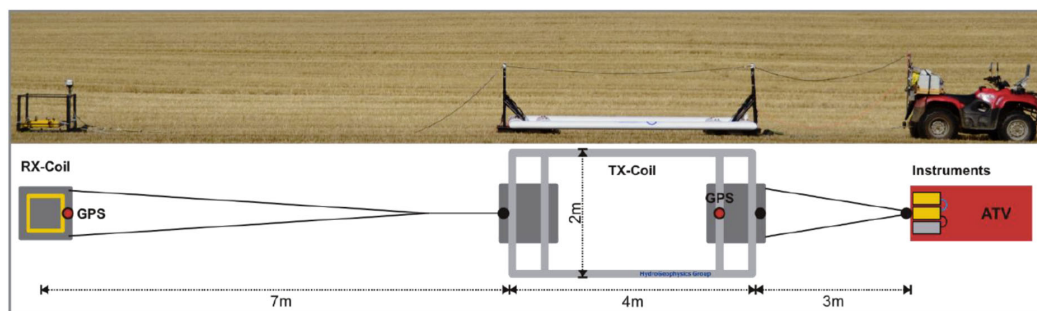
⁽¹⁷⁾ <http://hgg.au.dk/>

Le système tel qu'il existait initialement était rapide à mettre en œuvre et facilement utilisable par une équipe de deux opérateurs. Il consistait en un solénoïde émetteur et un solénoïde récepteur, tractés par une véhicule tout-terrain. Les solénoïdes étaient montés sur des traineaux à patins afin de pouvoir être opérés y compris dans des champs agricoles très accidentés. Une version stationnaire de l'instrument avait en outre déjà été utilisée dans un environnement glaciaire lors de campagnes de terrain en Antarctique.

Le système tTEM a été intégré dans la suite logicielle d'Aarhus pour le traitement et le rapport des données.

HGG a été contacté et interrogé sur la capacité qu'aurait tTEM à détecter un morceau de moyeu de soufflante en titane enfoui sous la neige et la glace. Leur premier sentiment était que sa détection serait improbable du fait de la taille et de la nature de la pièce. Les scientifiques ont malgré tout profité de la présence d'un fragment de moyeu de test au GEUS à Copenhague pour réaliser un test de détection : la pièce, posée au sol, était à peine détectable, son signal se situant au niveau du bruit. La capacité du système à détecter la pièce réelle sous la neige passa toutefois d'improbable à très probable moyennant quelques développements et adaptations.

2.3.1 Description du tTEM et axes d'améliorations



Source: HGG

Fig. 28 : Photo et schéma général du système tTEM

Le fonctionnement de base du système tTEM repose sur une émetteur qui, soudainement éteint, introduit des courants de Foucault dans le sol (Fig. 28). Ces courants de Foucault créent un champ magnétique secondaire, dont la décroissance est mesurée par le solénoïde récepteur à la surface. Les caractéristiques de ce champ secondaire contiennent des informations sur les caractéristiques électriques du sous-sol.

Un test de détection avec le système en l'état a été effectué sur un site de Funder, près de Silkeborg, au Danemark, dont la résistivité était relativement élevée. L'objectif était d'obtenir des conditions de mesures se rapprochant le plus possible de celles sur la glace et la neige.



Source: HGG

Fig. 29: Photo de la configuration de test : le fragment de moyeu de test est placée à 2 m du centre du cadre de l'émetteur

Le système restait immobile tandis que la pièce de test était déplacée autour de lui pour évaluer le signal de réponse aux différentes positions (voir [Fig. 29](#)). Comme la pièce ne pouvait pas être positionnée sous le système tTEM, elle a été placée sur le côté, ce qui est une position moins sensible que directement au-dessous en termes de détection. Dans le cas réel, le système se déplacerait au-dessus de la pièce.

La conclusion tirée de ce test est que le moyeu de test pouvait être détecté par un système du type du tTEM. Cependant, le rapport signal sur bruit (SNR) devait être amélioré d'un facteur estimé de dix pour pouvoir s'assurer d'une détection à une distance de 5 m.

Sur le site de test, le signal du sol était faible, mais toujours beaucoup plus élevé que ce qui était attendu au Groenland, la glace et la neige ayant une conductivité électrique très faible. En d'autres termes, toutes les opérations nécessaires pour soustraire le signal terrestre aux résultats ne seraient pas nécessaires au Groenland et les incertitudes introduites par cette opération seraient évitées.

Comme expliqué précédemment, le moyeu de test se trouvait sur le côté de l'émetteur lors du test de détection. Dans une situation réelle, la pièce recherchée serait sous l'émetteur et le couplage électromagnétique étant plus élevé en dessous que sur le côté de l'émetteur pour une distance donnée, la configuration des recherches réelles devait être favorable.

Le fragment de moyeu de test représentait environ la moitié de la taille présumée des fragments manquants recherchés au Groenland : il représentait un cinquième d'une pièce à l'échelle 93 %, tandis que les pièces à rechercher représentaient plutôt les deux cinquièmes d'une pièce à l'échelle un dans un cas et les trois cinquièmes dans l'autre cas (voir [paragraphe 1.1](#)). D'après les effets d'échelle en électromagnétisme, il a été estimé que le signal des fragments manquants réels serait environ le double de celui de la pièce de test.

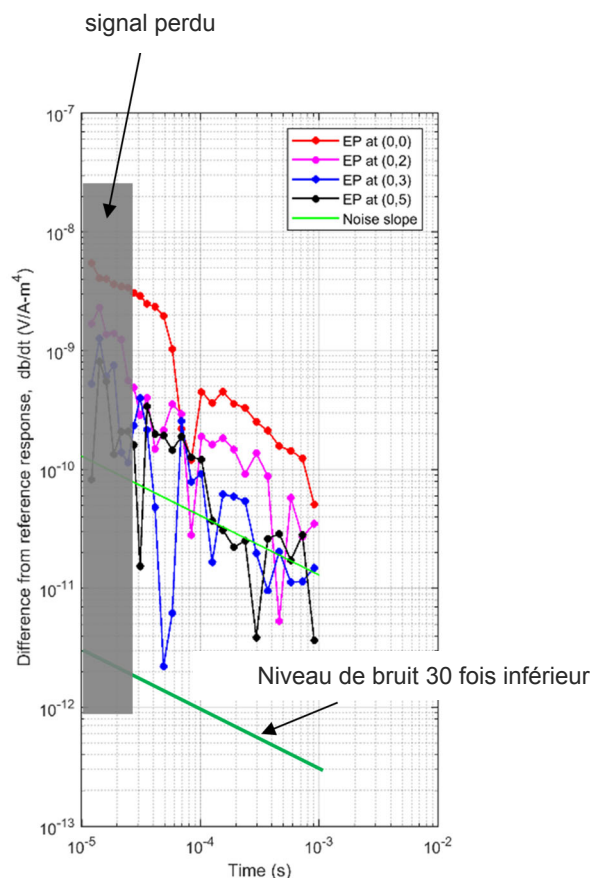
Comme la profondeur à laquelle se trouvaient les pièces recherchées et leurs caractéristiques étaient fixées, la seule façon d'améliorer le SNR était d'améliorer le système de détection lui-même. Les développements suivants ont été identifiés :

- ❑ Augmenter le moment de l'émetteur, en ajoutant des tours au solénoïde, ce qui devait augmenter également la durée de l'interruption. Comme le signal de la pièce de test était détectable en dehors des temps très précoces, cela était néanmoins acceptable. Le moment devait pouvoir être multiplié par quatre environ.
- ❑ Augmenter davantage le moment de l'émetteur en augmentant la surface du solénoïde. Un facteur deux devait pouvoir être atteint.
- ❑ Abaisser le niveau de bruit du récepteur, en ajoutant plus de tours au solénoïde. Cela devait diminuer la bande passante du solénoïde, mais encore une fois, en raison des caractéristiques des pièces recherchées, ce n'était pas crucial. Le bruit devait pouvoir être réduit d'un facteur estimé de quatre à six.
- ❑ Ajuster le déclenchement du signal pour ces pièces particulières. Le bruit devait pouvoir être diminué d'un nouveau facteur de 1,5 à 2.

Au total, les modifications devaient pouvoir améliorer considérablement le SNR, mais ceci devait être contrebalancé par une capacité de stockage des données moindre dans les conditions réelles, du fait du mouvement de déplacement (remorquage) du système pour couvrir la zone de recherche. Avec les développements décrits ci-dessus, une amélioration du SNR d'environ un facteur de 10 à 15 était attendue, compte tenu du fait que les pièces recherchées devaient avoir une meilleure réponse que le moyeu de test.

La [Fig. 30](#) présente le signal obtenu lors des tests de détection effectués à Funder avec le système tTEM en l'état et avec le fragment de moyeu de test. La ligne vert clair représente le niveau de bruit sur ce site. Les points et lignes rouges, roses, bleus et noirs sont les signaux mesurés lorsque la pièce de test était située à 0, 2, 3 et 5 m respectivement du centre du solénoïde de l'émetteur. La ligne vert foncé représente le niveau de bruit estimé au Groenland, en tenant compte de toutes les améliorations détaillées ci-dessus (les sources de bruit naturel au Groenland devraient être similaires ou inférieures à celles de Funder). La zone grise est la partie du signal qui serait perdue en raison du mouvement du système sur la zone mesurée.

Les chances de détecter un fragment de moyeu à 5 mètres sous la surface ont été estimées comme suffisamment raisonnables, sous couvert des améliorations décrites ci-dessus. En conséquence, il a été décidé de lancer ces développements.



Source: HGG

Fig. 30 : Signaux mesurés durant les tests à Funder

2.3.2 Développement et test du SnowTEM

Le développement de SnowTEM, la version améliorée de tTEM selon les propositions décrites au [paragraphe 2.3.1](#), a été lancé début octobre 2018. Un test en conditions représentatives était planifié pour début janvier 2019 afin de pouvoir décider d'un go/no-go en vue d'une potentielle campagne de recherche au sol au printemps 2019 avec ce détecteur. La seule période permettant de se rendre sur la calotte glaciaire étant avril/mai, et pour des raisons logistiques, une décision devait être prise trois mois avant.

Le test consistait à enfouir le moyeu de titane de test sous la neige dans un environnement glaciaire, passer au-dessus avec le système SnowTEM et collecter des données permettant d'estimer la distance maximale de détection de la pièce enfouie.

Le développement de SnowTEM, sa fabrication et son test, le tout en trois mois, représentaient un véritable challenge. De plus, en cas de succès du test, il avait été décidé de construire deux systèmes identiques pour la campagne de recherche afin de disposer d'un système de secours. Les deux systèmes pouvaient être utilisés en même temps, permettant une couverture maximale de la zone. En cas de défaillance de l'un des systèmes, des pièces de rechanges seraient disponibles, et au moins l'un des deux systèmes fonctionneraient encore.

La localisation du test devait être aussi représentative que possible de l'environnement du Groenland. Un test au Groenland a été considéré, mais le coût aurait été prohibitif. De plus, sans considérer le coût, la tenue du timing aurait nécessité un test au milieu de l'hiver, ce qui ajoutait un niveau considérable de complications.

Les conditions nécessaires à ce test étaient de pouvoir enfouir la pièce de test sous la neige et/ou la glace, mais également de ne pas avoir de roche ou de sol à moins de 20 m en épaisseur. Un glacier représentait donc la localisation parfaite pour réaliser ce test. Les températures devaient également être similaires aux conditions pouvant être rencontrées durant la campagne au Groenland, même si HGG avait déjà pu opérer avec succès un système similaire durant des campagnes de terrain en Antarctique. Le comportement du matériel devait être vérifié à très basses températures, même si ce n'était pas un sujet d'inquiétude majeur.

Afin d'avoir des températures basses et un glacier sur lequel travailler, il a été décidé de se rendre à Zermatt, en Suisse. Un glacier, le Breithorn Plateau, a été identifié entre le Klein Matterhorn (petit Cervin) et le Breithorn ([Fig. 31](#)). L'avantage principal résidait dans le fait qu'il était accessible en télécabines et remonte-pente, alors que son altitude était supérieure à 3 800 m (il s'agit en effet du point le plus élevé accessible en remontées mécaniques en Europe).



Fig. 31 : localisation initiale du test, le Breithorn Plateau au centre, avec le Breithorn (4 164 m), à gauche. Vue du Klein Matterhorn (petit Cervin). La remontée mécanique « Gobba di Rollin » est visible à droite. Des crevasses, en contrebas du plateau sont nettement visibles.

2.3.2.1 Test à Zermatt

Le test a été réalisé du 14 au 29 janvier 2019. Il a été piloté par le GEUS, qui s'est chargé de la coordination avec les autorités de Zermatt, le service de recherche et de sauvetage local, et le service des pistes afin d'organiser le transport du détecteur, l'accès au site de test, le conseil et la sécurité de l'équipe sur place. Cette coordination était essentielle afin de s'assurer que le test était réalisé dans une zone appropriée tout en respectant un créneau autorisé relativement court.

La différence majeure entre ce qui a été planifié et ce qui s'est réellement produit consiste en un changement dans la localisation du site de test : du fait de forts vents attendus la semaine du test, les guides locaux ont jugé dangereux de travailler sur le Breithorn Plateau. Un site de test de remplacement a été proposé par les autorités locales : il s'agissait d'un glacier à une altitude plus basse et mieux protégé du vent. Le glacier se situait au pied du Theodulhorn, entre deux remonte-pentes (voir [Fig. 32](#)). L'épaisseur de glace était estimée à bien au-delà de 20 m. Les deux remonte-pentes étaient situés à une distance d'environ 200 m de part et d'autre du site. À cette distance, ils ne représentaient pas d'inquiétude pour HGG vis-à-vis du détecteur, n'étant pas supposés créer de signal indésirable.

L'équipe du test a été amenée sur site en dameuse. Celle-ci a servi à creuser et enfouir la pièce sous la neige. Deux mètres de neige recouvraient la glace du glacier (sur la calotte glaciaire du Groenland, deux hivers avaient probablement recouvert la pièce de trois mètres de neige, sans compter la profondeur liée à l'impact). Il a été décidé de ne pas creuser plus, de poser la pièce de test directement sur la glace, puis de la recouvrir de trois mètres de neige. Tester la distance maximale de détection avec la pièce à trois mètres de profondeur en sondant avec le SnowTEM non directement au-dessus de la pièce mais à une légère distance de sa verticale était jugé acceptable. C'était une configuration conservatrice, dans le sens où la sensibilité du détecteur est moins bonne lorsque la pièce est décalée sur le côté que lorsqu'elle se situe juste à la verticale du détecteur pour une distance donnée.

Il s'est avéré très avantageux de pouvoir disposer de la dameuse et de sa cabine à proximité du site de test, pour pouvoir protéger l'équipe des éléments durant certaines parties de la journée : les températures extérieures ont atteint -19°C , avec des vents jusqu'à 40 kt.

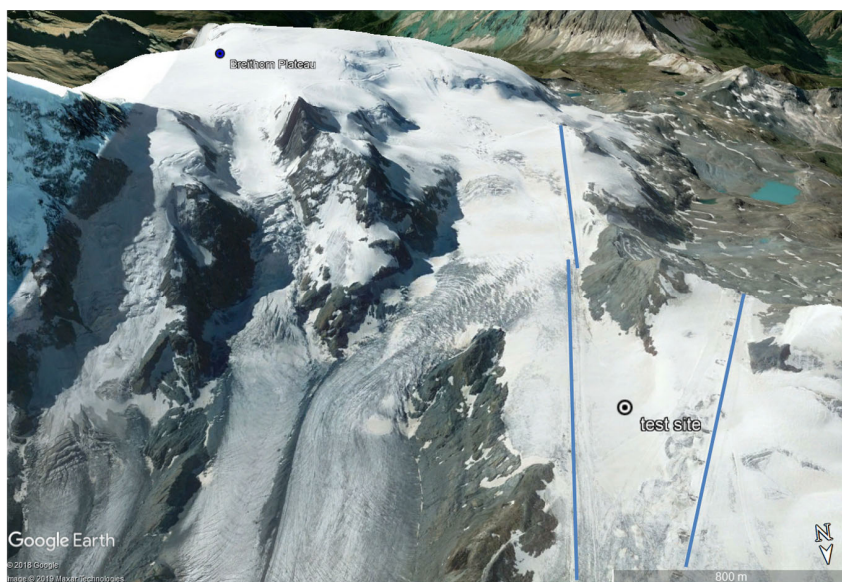


Fig. 32 : Localisation finale du site de test - les remonte-pentes les plus proches sont matérialisés en bleu

2.3.2.2 Difficultés, résultats, et étapes suivantes

Il est assez rapidement devenu clair que ce test serait infructueux : le niveau de bruit s'est avéré bien supérieur à ce qui était attendu sur le site de test. Il a fallu du temps pour pouvoir affirmer avec certitude que le bruit mesuré sur site était lié à la localisation du site elle-même et non à un dysfonctionnement du matériel.

Lors des premières mesures, le système n'avait pas détecté la pièce. Aucun signal n'était obtenu au-dessus du niveau de bruit, alors même que le SnowTEM était stationnaire juste à la verticale de la pièce. La cause de ce bruit a été identifiée comme provenant d'une ligne électrique présente à une distance de 500 m au plus proche du site de test. Cette ligne n'avait initialement pas été identifiée, les préoccupations étant concentrées sur les remontées mécaniques. Pour confirmer ceci, des mesures ont été réalisées en se déplacement vers et depuis cette ligne électrique. Il s'est avéré que plus la mesure était proche de la ligne, plus le niveau du bruit était élevé. Ces résultats sont présentés sur la [Fig. 34](#).

Une analyse spectrale du bruit a montré que pour les mêmes fenêtres temporelles, le niveau de bruit de fond était supérieur de 35 à 40 dB à Zermatt qu'à Funder. Un test à Funder au Danemark a été reproduit après le test à Zermatt, et les résultats obtenus avant le test à Zermatt (voir [paragraphe 2.3.1](#)) ont été confirmés.

Le test à Zermatt a toutefois permis de valider le bon comportement mécanique du détecteur tracté par une motoneige sur un terrain qui était, en certains points, similaire à la zone de recherche au Groenland. En particulier, le système s'est particulièrement bien comporté lorsqu'il devait passer par-dessus des sastrugi⁽¹⁸⁾, avec des vitesses d'avancement atteignant 20 km/h ([Fig. 35](#)). La force nécessaire pour tracter le détecteur a également été mesurée. La valeur maximale de 150 kg a été atteinte.

(18) ligne de crête tranchante et irrégulière sur une étendue de neige résultant de l'érosion causée par le vent, de la saltation de particules de neige et de leur dépôt.



Fig. 33 : Localisation de la ligne électrique (lignes rouges) et de la mesure du bruit (point vert)

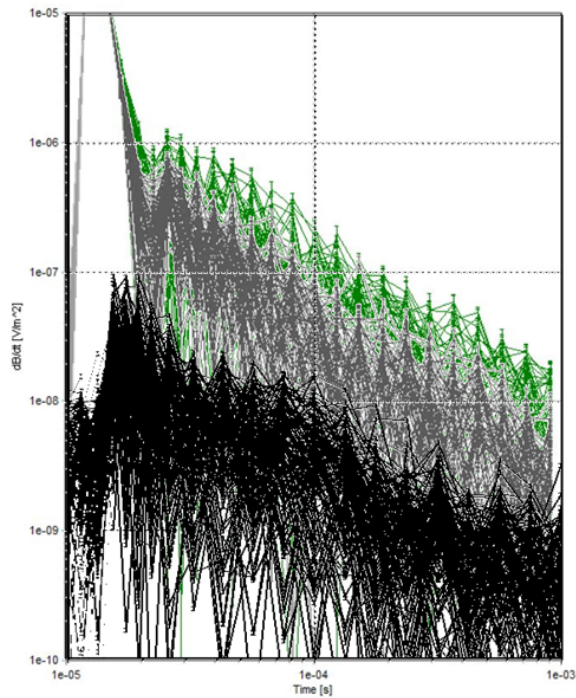


Fig. 34: Mesure réalisée avec SnowTEM – à proximité de la ligne électrique (vert), loin de la ligne électrique (gris) et à Funder (noir).



Fig. 35 : SnowTEM tracté par une motoneige durant le test à Zermatt, par conditions de faible visibilité pendant une tempête de neige.

2.3.2.3 Test en Suède

Les résultats du test à Zermatt n'ont pas été conclusifs et n'ont rien ajouté aux tests initiaux réalisés à Funder (Danemark). Il a donc été décidé de monter un test du SnowTEM en dernière minute, sous la neige. Un premier site a été choisi en Suède, qui s'est révélé finalement inaccessible. La recherche d'un site alternatif a été mise en œuvre dans des délais courts imposés pour la tenue du test. Le site choisi avait une réponse géologique significative, produisant un bruit de fond. Même si le bruit était faible (à peu près le niveau de Funder), le signal de la pièce de test était encore une fois noyé dans le signal du sol. Le résultat de ce test, une fois de plus, était infructueux.

2.3.2.4 Modélisation numérique et améliorations proposées

De retour au Danemark avec quelques incertitudes, HGG a effectué des simulations numériques afin d'appréhender plus précisément la réponse à attendre des fragments de moyeux réels, estimés être deux fois plus grands que le moyeu de test utilisé pour les tests de détection.

La modélisation a montré qu'une pièce deux fois plus grande que le moyeu de test résulterait en une augmentation de la force du signal d'un facteur deux, ce qui ajouterait un mètre à la distance de détection.

L'influence de la distance entre l'émetteur et le récepteur a également été étudiée. Sur la base d'une analyse numérique, le signal augmenterait d'un facteur deux si la distance était réduite de 6,8 m à 4,5 m. Des gains significatifs semblaient accessibles via des modifications simples du système.

Des tests en mouvement ont été effectués à Funder sur la base de la configuration testée à Zermatt. Le détecteur était déplacé d'avant en arrière, avec une distance à la pièce d'essai croissante. Dans cette configuration, la pièce était détectée jusqu'à 5 m de distance depuis le centre du récepteur, lorsqu'il passait à côté. Sur la base de cette expérience, une dernière amélioration a été proposée, visant à ajouter un solénoïde récepteur supplémentaire. La distance de détection pourrait être améliorée et l'espacement entre lignes de mesures pourrait être augmentée d'un à deux mètres.

2.3.3 Conclusion sur l'évaluation du détecteur EM

Le détecteur SnowTEM développé par HGG a été testé à différents endroits entre octobre 2018 et février 2019. L'objectif des premiers tests à Funder (Danemark) était de déterminer si une pièce en titane pouvait être détectée par ce système et à quelle distance. Cela a amené à considérer des développements afin d'augmenter le rapport signal sur bruit. À Zermatt (Suisse), l'objectif était de tester la détection d'une pièce de titane enfouie sous la neige sur un glacier avec un système amélioré. Le détecteur était tracté par une motoneige afin d'évaluer également son comportement mécanique dans des conditions similaires à ce qui pouvait être rencontré durant la phase de terrain au Groenland. Le test de détection à Zermatt est resté infructueux du fait de niveaux de bruits inattendus, mais le comportement mécanique du système s'avérait satisfaisant. Un dernier test a été monté rapidement en Suède afin d'évaluer la détection sous la neige, mais celui-ci n'amena pas d'information supplémentaire du fait de la présence d'un signal élevé du sol. Toutefois, les tests ont permis de tirer des conclusions importantes :

- ❑ le moyeu de test pouvait être détecté à une distance de 5 m du centre de l'émetteur. Il a été estimé que la masse des fragments de moyeu recherchés était approximativement deux fois celle du moyeu de test. Des simulations ont montré qu'un gain d'un mètre sur la distance de détection pouvait être attendu de ces différences de taille et de masse.

- ❑ Les traineaux construits pour transporter l'émetteur et le récepteur se sont bien comportés sur les sastrugis de neige. La force nécessaire pour tracter les traineaux a été mesurée durant les tests à Zermatt par une cellule de force. Un maximum de 150 kg a été atteint, ce qui pouvait être réduit si nécessaire en réduisant la friction du traineau principal. L'utilisation d'un robot était envisagée pour tracter un détecteur durant la potentielle campagne de recherche. Ce robot avait une capacité théorique de traction de 100 kg, mais aucun test n'a pu être réalisé avec le robot tractant SnowTEM du fait de contraintes de disponibilités, logistiques et de planning.
- ❑ Le faible SNR rencontré à Zermatt était dû à la présence de lignes électriques à proximité du site de test. En l'absence de lignes électriques (comme au Groenland), le SNR devrait permettre de détecter la pièce à une distance de 5 m (6 m attendu avec les fragments réels). Cela a pu être confirmé par les tests à Funder, même si le bruit de fond à Funder est a priori plus élevé qu'au Groenland.
- ❑ Aucun test où la pièce de test était enfouie sous la neige n'a été conclusif. Toutefois, la neige et la glace se comportent tel un « espace libre » et leur résistivité est au moins la même sinon plus élevée que le sol de Funder.

2.4 Conclusion sur les moyens de détection et la stratégie de campagne de recherche

Fin février 2019, le système SnowTEM était le seul et unique système considéré comme capable d'être opéré dans l'environnement de la zone de recherche et de détecter un fragment de moyeu de soufflante en titane sous la neige dans le cadre d'une recherche systématique, avec un niveau de confiance raisonnable. Après les tests à Funder, à Zermatt et en Suède et après une phase de modélisation numérique, HGG a proposé un dernier ensemble de modifications. Par rapport à la configuration utilisée à Zermatt, la structure de l'émetteur serait augmentée et passerait de 4 x 3 m à 4 x 4 m. Le nombre de tours du solénoïde de l'émetteur augmenterait également de 3 à 4, et la puissance de l'alimentation serait augmentée. Un solénoïde récepteur supplémentaire serait également ajouté. Avec ces nouveaux changements, le SNR augmenterait d'un facteur 1,8 et l'écart entre les lignes de mesures serait augmenté de 1 à 2 m. La distance entre l'émetteur et le récepteur serait raccourcie afin d'augmenter la réponse du signal de la cible par un facteur supplémentaire de 2.

Pour toutes ces raisons, il a été considéré comme acceptable de lancer une nouvelle campagne de recherche au Groenland au printemps 2019. Il y avait de bonnes chances pour que SnowTEM détecte l'un des fragments manquants jusqu'à une distance de 5 à 6 m ; les estimations donnaient une profondeur d'enfouissement des fragments d'environ 4 m sous la neige après l'hiver 2018-2019. La fabrication de deux systèmes SnowTEM a donc été lancée, de sorte de disposer d'un système de secours.

Le groupe de recherche et d'équipement polaire (Polar Research Equipment⁽¹⁹⁾, PRE) basé à Hanover, New Hampshire (USA), a été contacté. Ce groupe développe et opère un véhicule autonome 4x4, appelé « Frostyboy ». Ce robot devait pouvoir emporter un GPR ou tracter un détecteur tel que SnowTEM dans un environnement polaire, étant donné qu'il avait déjà été opéré en Antarctique et au Groenland. L'objectif était de l'utiliser en tant que véhicule autonome programmable, afin de suivre des routes de recherche aussi longtemps que ses batteries le permettraient, et afin d'évaluer le niveau de sécurité dans les champs de crevasses si celle-ci était source d'inquiétude pour les conducteurs des motoneiges.

⁽¹⁹⁾ <https://www.polarresearchequipment.com/>

Une stratégie définie collégialement a été validée pour la phase de recherche au sol, tenant compte des nouvelles cibles prometteuses de l'ONERA et des moyens de détection disponibles. Comme pour Camp Recovery en 2018, la campagne au sol se baserait sur un campement construit sur la zone de recherche, accueillant sept personnes durant un total de quatre semaines, et incluant 20 % de jours de marge pour compenser les aléas météo. Les différentes étapes ont été planifiées comme suit :

- ❑ réalisation d'un test de détection avec le détecteur SnowTEM, au-dessus du moyeu de test laissé dans la zone de recherche en 2018, afin de confirmer sa capacité de détection,
- ❑ si le test est concluant :
 - sondage des trois cibles prometteuses de l'ONERA avec SnowTEM
 - si ces cibles n'apportent pas de résultats, réalisation d'une recherche systématique de la zone avec les deux systèmes SnowTEM : l'un serait tracté par le robot, l'autre par une motoneige.
- ❑ si le test n'est pas concluant, la campagne devient une campagne de vérification de cibles seulement :
 - sondage des trois cibles prometteuses de l'ONERA avec un GPR, étant donné que le GPR reste approprié pour une recherche locale.

La campagne a été planifiée du 25 avril au 20 mai 2019. Des rapports de terrain étaient envoyés quotidiennement à l'équipe d'enquête, et les prises de décision quotidiennes étaient déléguées à l'équipe sur place.

3 - CAMPAGNE PHASE III – CAMP RECOVERY 2

3.1 Planning et logistique

La base de départ pour Camp Recovery 2 (CR2) était Narsarsuaq au sud du Groenland, comme pour la Phase II de recherche (CR1), voir (BEA, 2019).

L'équipe était composée de trois membres du GEUS, deux membres d'HGG (université d'Aarhus, Danemark) qui ont développé le détecteur SnowTEM et deux membres du PRE qui étaient les opérateurs du robot Frostyboy.

Les deux détecteurs SnowTEM, le robot Frostyboy et tous les équipements qui ne pouvaient pas être trouvés au Groenland ont été envoyés de Copenhague par container. Une fois à Narsarsuaq le 21 avril, 6 400 kg de matériel (incluant le contenu du container) devaient être hélitreuillés vers le site sur la calotte glaciaire. Cela représentait neuf filets de cargaison.

Le 25 avril 2019, les premiers membres de l'équipe arrivèrent à Narsarsuaq et commencèrent à préparer les filets d'équipements. L'objectif initial était d'avoir tout le monde sur le site le 2 mai.

Les mises à jour récentes de la station météo QAS_U⁽²⁰⁾ suggéraient qu'il était tombé davantage de neige durant l'hiver passé que durant l'hiver précédent. La station météo était enfouie sous la neige, ce qui peut se produire lors d'hivers où l'accumulation de neige est particulièrement importante. Les images satellite Pléiades du site, datées d'avril 2019, ont été fournies par Airbus. Les drapeaux placés lors de CR1 pour marquer la localisation du moyeu de test enfoui n'étaient plus visibles. Cela signifiait que plus de 1,5 m de neige recouvrait la région. GEUS a apporté un second fragment du moyeu de test pour calibration au cas où celui laissé sur site et dont l'emplacement était marqué par les drapeaux n'était pas retrouvé.

⁽²⁰⁾ Voir <http://www.promice.org/> pour plus d'informations sur les stations météorologiques automatiques du Groenland.

Le premier des neuf filets de cargaison a été transportée sur le site par beau temps le 28 avril. Les jours suivants ne permettaient pas à l'hélicoptère de voler, du fait de mauvaises conditions météo (du 29 avril au 4 mai). Pendant ces journées, l'équipe améliorait la programmation des unités GPS et des tablettes, et se préparait pour les différents scénarios possibles. Ils se sont entraînés (à pied) à se déplacer en suivant leur configuration Google Earth personnalisée dans le but de couvrir la zone de recherche avec les lignes espacées de 4 m. Ils ont raffiné les plans de conduite des motoneiges, discuté où et dans quel ordre le robot devait cartographier les champs de crevasses et ont également monté les tentes dans le hangar de l'hélicoptère afin de se familiariser le plus possible avec elles en prévision du campement sur la glace.

Le 5 mai, le moindre vol charter en hélicoptère était toujours impossible du fait des conditions météo. L'équipe a commencé à réorganiser les filets de cargaison qui avaient été disposés à proximité de la piste de l'aérodrome pour quelques jours : les équipements devenus inutiles du fait d'une campagne raccourcie ont été retirés. Malgré la quantité d'équipements retirés, il n'a pas été possible de supprimer un filet de cargaison complet, car l'équipe devait anticiper les mêmes difficultés liées à la météo pour quitter la glace en fin de mission.

Le 10 mai, la situation était toujours similaire : aucun vol n'avait été possible depuis le 29 avril pour cause météo, l'équipe a donc reconfiguré le cargo et les plans une nouvelle fois de façon à pouvoir envoyer rapidement quelques personnes pour travailler avec un minimum d'équipement.

Le 11 mai, trois filets de cargaison ont finalement pu être hélitreuillés sur la calotte glaciaire, accompagnées de 5 personnes dans l'hélicoptère. L'équipement incluait une motoneige (une autre était déjà sur site depuis le premier hélitreuillage), un GPR, un système SnowTEM et le robot.

Une tente d'expédition Stronghold et une tente pour les toilettes ont été rapidement montées car une nouvelle tempête arrivait dans la région. Les premiers travaux ont consisté à déneiger les filets de cargaison qui avaient passé dix jours sur le site. La tempête prévue a sévèrement frappé le campement le 12 mai, interdisant toute recherche ainsi que le fonctionnement des générateurs, indispensables pour recharger les batteries. Le jour suivant, le beau temps a permis la réalisation de travaux tels que l'assemblage d'une grande tente Polar Haven, le rangement de matériel à l'intérieur, et l'évacuation de la neige accumulée sur le camp lors des jours précédents. La motoneige était recouverte de neige et de glace regelée, il a fallu plusieurs heures pour pouvoir la libérer. Une nouvelle tempête de neige avec de forts vents a frappé le campement après une heure de test du GPR (étalonnage et test de suivi de traces). Le jour suivant (14 mai) était également impraticable du fait du mauvais temps.

Le 15 mai, un dernier membre de l'équipe a rejoint le camp avec le dernier hélitreuillage de matériel. L'assemblage et les tests des détecteurs SnowTEM ont démarré et ont duré jusqu'au jour suivant. Les travaux d'étalonnage ont démarré dans la zone du moyeu de test enfoui l'année passée. Sans les drapeaux et du fait de la dérive du glacier, sa localisation exacte n'était malheureusement plus connue.

Quelques jours plus tôt, l'équipe avait décidé de profiter d'un vol d'hélicoptère vers le site pour improviser un test de chute avec le second fragment de moyeu de test, à partir de l'hélicoptère, pour mieux estimer la profondeur d'impact des fragments recherchés. La pièce a été lâchée par le pilote à environ 1 000 ft au-dessus du sol. Elle a malencontreusement été lâchée à plus d'un kilomètre du camp, presque au-delà de l'horizon, en conséquence la pièce a été perdue.



Fig. 36 : Travaux de libération de l'un des deux systèmes SnowTEM après une tempête de neige

3.2 Campagne de recherche au sol

Le 17 mai, de nouveaux problèmes sont apparus : d'abord, les générateurs de 2 kW prévus pour charger les batteries du robot ne délivraient en réalité que 1,5 kW, ce qui s'avérait insuffisant. Un générateur de substitution (indiquant « 4 500 » sur le côté mais délivrant en réalité 2,6 kW) a été hélicopté le jour suivant. Cela permit de résoudre le problème. Ensuite, il était impossible d'activer la fonction haute précision des GPS loués spécifiquement pour leur précision jusqu'à 10 cm. Cette précision était nécessaire pour mesurer exactement la vitesse de déplacement du glacier. Le problème a été résolu le 20 mai après plusieurs appels au fournisseur et après insistance de la part de l'AIB DK. Il s'agissait d'un problème de configuration.

Malgré ces difficultés, un point d'intérêt a été détecté avec le système SnowTEM à l'endroit où le moyeu test de l'année précédente était supposé se trouver. Plusieurs passes au niveau de ce point d'intérêt ont permis de confirmer la présence du moyeu de test. Toutefois, il a été mis en évidence que le bruit introduit par le mouvement du système noyait le signal du moyeu, de sorte que la pièce n'était visible que lorsque le système était stationnaire.

À ce stade, la campagne de recherche systématique a dû être dégradée en sondage local des cibles ONERA, du fait de deux facteurs : le bruit du détecteur en mouvement et l'accumulation des retards liés à la météo.

Le déplacement de la pièce détectée relativement aux coordonnées de la position à laquelle elle a été enfouie un an auparavant a été estimé à 62 m, sud-sud-ouest. Cette information a été utilisée pour réduire la zone d'étude des trois cibles ONERA.



Fig. 37: Campement des recherches au sol - Photo: Rune Ellerup Kraghede

Pour chacune des trois cibles ONERA (1, 2a, 2b, [Fig. 20](#)), la procédure consistait à sonder la zone à partir de la position ONERA, en utilisant les estimations améliorées de déplacement du glacier, puis à se déplacer vers l'extérieur, en s'arrêtant à chaque mètre. Au lieu de marquer les éventuels objets avec un GPS à haute précision, l'usage de méthodes pragmatiques et adaptées au terrain a été préféré : poteaux en bambou, drapeaux, ou même jus de fruit concentré pour marquer la neige. Le robot FrostyBoy évaluait le niveau de sécurité des crevasses de façon autonome dans la région des cibles ONERA 1 et 2b, pendant que SnowTEM étudiait la cible 2a. Plus tard, FrostyBoy et son GPR détectèrent des crevasses à 5 m de la surface à proximité de la cible 1.

En complément, l'équipe réalisa que les modifications du système SnowTEM décidées après le test de Zermatt, consistant à élargir le cadre de l'émetteur et à doubler le nombre de solénoïdes récepteurs, avaient rendu l'ensemble plus lourd. Le robot n'était par conséquent plus capable de le tracter. SnowTEM pouvait uniquement être tracté à force d'hommes ou par une motoneige.

Sur cette base, il a été décidé de se rendre à la cible 1 de l'ONERA en marchant encordé plutôt qu'en motoneige. Ainsi, le détecteur SnowTEM a été reconstruit : les skis ont été enlevés, ainsi que les plateformes et les bras, de manière à ce qu'il devienne similaire au « WalkTEM » de HGG : un câble de 4 m x 4 m maintenu en forme de carré par des perches en bambou et qui pouvait être trainé au sol.

Le nouveau système a été testé au-dessus de la pièce de test enfouie. Cette nouvelle configuration de détecteur pouvait être tirée sur un traineau jusqu'à la cible 1 par une équipe encordée, ou facilement emportée en hélicoptère pour une journée de travail, ce qui permettait d'éviter de traverser les crevasses entre le campement et la cible. L'équipe ne devait plus s'inquiéter que des crevasses directement sous la zone de recherche.

L'évaluation de sécurité menée par FrostyBoy autour de la cible 2b donna un résultat acceptable : 90 % de la zone était entre des crevasses, et non au-dessus d'elles.

Le 20 mai, l'équipe du SnowTEM acheva l'analyse de la cible 2a. Les résultats étaient négatifs : leur conclusion était la suivante : « il est très peu probable que quoi que ce soit d'aussi grand ou de plus grand, ou d'aussi profond ou de moins profond que le moyeu de test se trouve dans cette zone ».

Grâce à la cartographie réalisée par FrostyBoy autour de la cible 2b, un chemin (relativement) sûr vers la cible 2b a pu être choisi. Les lèvres de deux crevasses qui devaient être traversées ont été marquées. La première était sûre, avec une largeur de 2,5 m et un pont de neige de 10 m d'épaisseur.

La seconde était relativement sûre avec une largeur de 6 m et un pont de neige de 6 m d'épaisseur. Malheureusement la zone de recherche 2b se trouvait tout de même partiellement au-dessus de crevasses, dont la largeur de 4,5 m et les ponts de neige de 2 m les rendaient traversables à pied mais pas en motoneige.

Le 21 mai, il a été décidé d'extraire le moyeu de test afin d'accroître la confiance dans la capacité du détecteur SnowTEM. Neuf heures et demi ont été nécessaires pour creuser un trou de 4,2 m de profondeur et 2,2 m de diamètre, et une rampe oblique de 9,2 m, et pour retirer 40 m³ de neige (i.e. 20 tonnes). L'équipe a utilisé une tronçonneuse, deux scies à main, une foreuse munie d'un carottier de 2 m, deux motoneiges, deux grands tranneaux tractés par les motoneiges, et environ 10 pelles servant à déplacer les morceaux de glace pesant jusqu'à 40 kg et la neige.

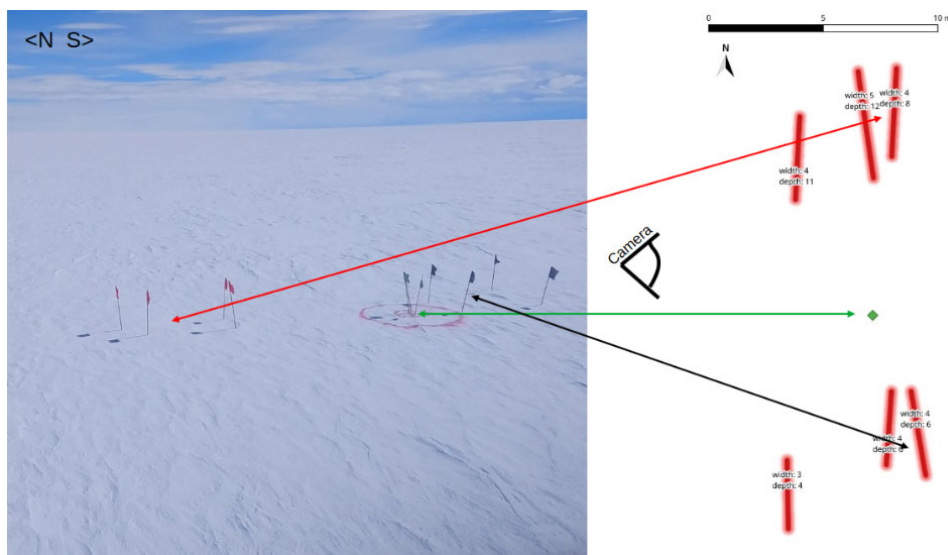
Le moyeu de test enfoui l'année passée a été repéré exactement où SnowTEM l'avait détecté. Une heure plus tard, il était toujours encastré dans la glace au fond du trou et le travail a dû s'interrompre pour la nuit. Durant la nuit, une tempête inattendue a rebouché le trou. Un nouveau trou de 4,2 m de profondeur devait être creusé, au même endroit que 24 heures plus tôt. Cette fois-ci, trois personnes et deux heures ont été nécessaires pour atteindre la pièce, au lieu de cinq personnes et dix heures la veille : le volume total de neige était similaire, mais la masse était probablement d'un tiers de la neige de la veille, celle-ci ayant été fraîchement déposée et non compactée pendant deux ans. Après avoir touché la pièce, il a fallu 15 minutes pour la libérer.

La région de la cible 2b était également évaluée, en prenant en compte la dérive de sa position compte tenu des dernières analyses de déplacement de la glace. Aucune réponse n'a été obtenue.

L'étude par FrostyBoy de la région de la cible 1 établit qu'il y avait onze crevasses entre le campement et la cible, toutes avec des ponts de neige dont l'épaisseur était supérieure à la largeur de la crevasse. L'équipe décida qu'il était plus sûr d'utiliser l'hélicoptère pour se rendre sur la cible 1. Le plan était alors d'utiliser SnowTEM pour sonder une surface d'environ 10 x 25 m dans laquelle la cible ONERA était supposée se trouver. Si quoi que ce soit était détecté, il serait marqué et les actions futures ultérieures seraient discutées. En effet, l'extraction de la pièce de test avait été très difficile avec l'équipement disponible et dans cette région plein de crevasses, il est probable que cela ne pourrait se faire qu'en creusant à la main afin assurer la sécurité des membres de l'équipe. Le 23 mai, la zone contenant la cible 2b a été blanchie, avec un résultat négatif.

3.3 Signal positif

Le 23 mai était un jour assez venteux, mais le pilote de l'hélicoptère parvint à venir jusqu'au campement pour amener quatre personnes à la cible 1. Malgré le vent qui rendait le travail difficile, l'équipe assembla la version légère du SnowTEM et en cinq minutes de sondage, elle obtint un signal clair et sans ambiguïté traduisant la présence d'une pièce de métal à proximité. Celle-ci a été localisée dans l'extrémité sud-ouest de la zone de recherche définie autour de la cible à partir des estimations de vitesse de mouvement de glace. Ce signal clair était cohérent avec un signal anormal qu'avait détecté FrostyBoy et son GPR lors de l'évaluation de la sécurité des crevasses plusieurs jours auparavant. La profondeur du sommet de l'objet a été estimée à trois à quatre mètres. Un certain temps a été passé à se battre contre le vent pour localiser l'intensité maximale du signal, puis l'équipe a marqué la localisation exacte du signal avec des drapeaux et du jus de fruit, la localisation des deux crevasses à proximité avec des drapeaux (voir [Fig. 38](#)), puis est retournée au campement.



Source: Thue Bording (HGG)

Fig. 38 : Localisation du signal de la cible 1 (cercle rouge), et des crevasses à proximité (quatre drapeaux oranges à gauche et quatre drapeaux noirs à droite). Les crevasses sont orientées est-ouest. Les localisations des crevasses en dehors des marqueurs noirs et oranges sont incertaines. La distance entre le centre de la cible et la lèvre de la crevasse marquée en noir est de 2 m. Celle entre la cible et la lèvre de la crevasse marquée en orange est de 5 m. La crevasse en noir a une largeur de 4 m, un pont de neige de 6 m d'épaisseur. La crevasse en orange a une largeur de 4 m, un pont de neige de 8 m d'épaisseur. En bas de la photo de gauche à droite, les traces de FrostyBoy sont à peine visibles.

Comme il avait fallu dix heures à six personnes pour extraire la pièce de test avec un nombre significatif d'outils, loin de toute crevasse, et sans qu'elles soit encordées, l'équipe s'attendait à une opération beaucoup plus longue s'agissant de la pièce réelle. En accord avec le planning général de la Phase III de recherche, deux personnes, y compris le guide de sécurité sur glacier, devaient quitter le campement le jour même. D'autant plus qu'une nouvelle tempête était attendue le lendemain, interdisant tout vol en hélicoptère ou travail extérieur sur le camp.

Le planning initial prévoyait un début de démontage du campement le 22 mai. La majorité des membres de l'équipe avaient des vols prévus de Narsarsuaq au plus tard le 28 mai, sans aucune possibilité de les retarder du fait d'autres engagements. La détection s'est produite le 23 mai, et les 24 et 25 mai une tempête s'est effectivement abattue sur le campement. Les quelques jours d'expédition restants ne suffisaient pas pour extraire la pièce avec le matériel à disposition, sans risquer de l'endommager. De plus, la proximité défavorable d'une crevasse représentait clairement un risque en terme de sécurité et nécessitait un équipement de sécurité spécifique. Dans de telles conditions, la durée d'extraction a été estimée à 20 à 40 heures à cinq personnes.

Il a donc été décidé, en accord avec l'équipe d'enquête, que la phase d'extraction serait une nouvelle campagne dédiée à organiser dès que possible.

Le 26 mai, l'équipe a réalisé une dernière évaluation dense au GPR qui s'avérait critique pour la sécurité de la future équipe de relevage. L'équipe a finalement mis en place les filets de cargaison pour le transport du campement.

Le 27 mai représentait le dernier jour sur la glace pour les membres de l'équipe. Ils ont achevé l'étude dense au GPR de la zone de détection, et ont conclu que les ponts de neige à proximité immédiate de la détection étaient un peu plus épais que les estimations précédentes. Ils ont également utilisé une dernière fois la version légère du SnowTEM pour raffiner la localisation à une précision d'un mètre.

La localisation précise de la détection était :

61,735026 N
46,853879 O

Cette position se situait à 71 m au sud-sud-ouest de la localisation de la cible 1 transmise par l'ONERA, résultant du mouvement de la glace depuis les acquisitions radar de la Phase II.

Tous les membres sont retournés à Narsarsuaq le 27 mai, laissant 6 filets de matériel sur la glace. Ces derniers pouvaient être récupérés plus tard, en fonction des besoins de la campagne d'extraction. Ceci marquait la fin de la campagne Camp Recovery 2.

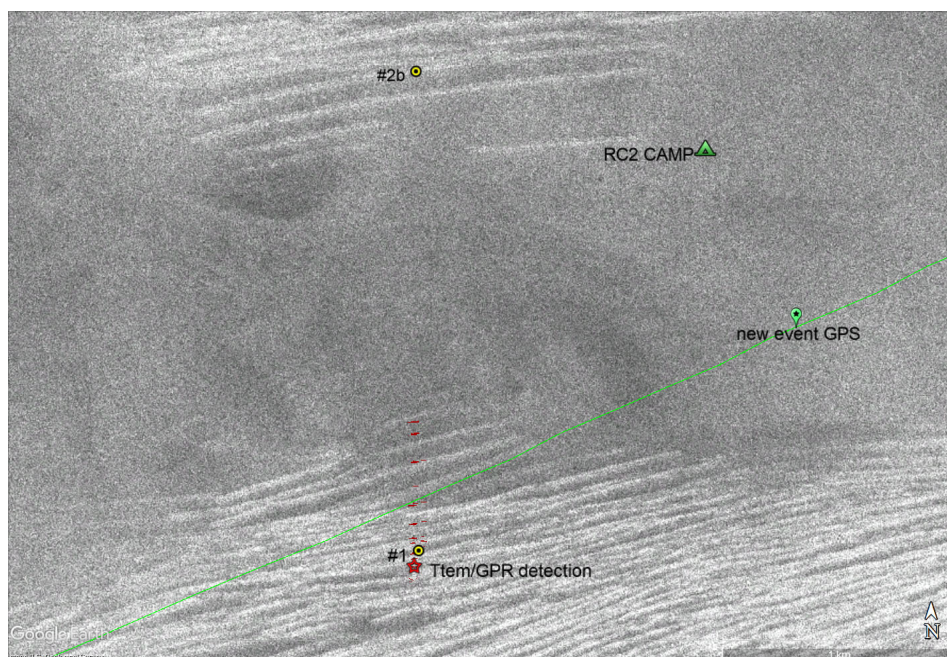


Fig. 39 : Localisation de la détection (étoile rouge) – les disques jaunes représentent les localisations des cibles ONERA. Les bandes blanches sont les crevasses telles que vues sur les images UHF. Les traits rouges représentent les détections de lèvres de crevasses lors de Camp Recovery 2.

4 - EXTRACTION

La phase d'extraction succédant à CR2 a été discutée aussitôt après que l'équipe a quitté la calotte glaciaire, et une campagne d'extraction a été mise en place pour fin juin 2019. Il était nécessaire de retourner sur la glace le plus tôt possible pour ne pas être confronté à la disparition des marquages ou à une dérive de la glace qui auraient nécessité une nouvelle recherche de la pièce.

4.1 Généralités

En se basant sur les efforts nécessaires pour extraire la pièce de test et considérant la localisation de la pièce réelle, le GEUS a estimé que l'extraction nécessiterait une équipe de cinq personnes et 20 à 40 heures de travail.

L'hélicoptère AS350 utilisé pour CR2 ne pouvait pas transporter cinq passagers vers et depuis la zone avec un seul plein de carburant, et il pouvait encore moins déplacer de l'équipement en plus des cinq passagers. Quatre vols supplémentaires étaient donc requis pour amener l'équipement sur zone.

Compte tenu de ces besoins, le transport du matériel et des personnes a été prévu sur deux jours, quatre jours d'extraction ont été planifiés (32 heures à raison de huit heures par jour), et deux jours ont été prévus pour le transport retour. Quatre jours de marge pour raison météo ont été inclus, ainsi que deux dimanches (jours de repos des pilotes) qui pouvaient être échangés avec les jours précédents ou suivants si nécessaire. Cela représentait douze jours de travail sur quatorze jours possibles au total. Comme pour CR2, selon le scénario le plus pessimiste, le transport des filets de matériel au retour pouvait toujours être décalé à plus tard.

La méthode d'extraction consistait à retirer le premier mètre de neige et de glace en coupant des blocs de neige à l'aide de tronçonneuses ou de scies à main, puis de sortir ces blocs de la fosse à la pelle. Le second mètre et le premier tiers du troisième mètre seraient retirés de la même manière, mais une rampe serait ajoutée, de manière à ce que la neige puisse être chargée dans un traineau, lui-même tiré hors de la fosse grâce à un treuil mécanique ou manuellement grâce à un système de poulies. À ce stade, le travail serait ralenti afin que la pièce ne soit pas endommagée alors que les membres de l'équipe s'en approchaient. Les ultimes 50 cm à 1 m seraient fondus grâce à un système de chauffage afin d'éviter tout contact entre la pièce et une pelle ou une scie.

Même si la mission était basée à Narsarsuaq, ne devait durer que quelques jours et n'était dédiée qu'à l'extraction de la pièce qui avait déjà été localisée, le dispositif à hélitreuiller comportait un grand nombre d'équipements : trois fûts de carburant pour l'avitaillement de l'hélicoptère sur zone, un treuil, un système de chauffage pour faire fondre la neige et la glace, deux fûts d'essence pour le fonctionnement du treuil et du chauffage, une tente et du contreplaqué pour couvrir le trou durant la nuit afin qu'il ne se rebouche pas, des outils tels que pelles, tronçonneuses, scies à main, etc., et l'équipement de sécurité (cordes, mousquetons, système d'arrêt de chute, nourriture, etc.).

Certains éléments de cet équipement provenaient de CR2 et étaient restés sur la glace. Une partie du premier jour serait donc dédiée à extraire les élingues correspondantes de la neige accumulée puis à les transporter du campement de CR2 vers la zone d'extraction, plutôt que de les hélitreuiller depuis Narsarsuaq.

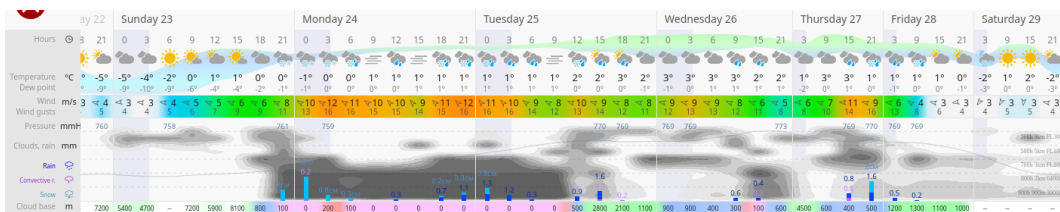
4.2 Déroulement de la campagne

Un membre du PRE quitta Boston le 21 juin pour rejoindre Narsarsuaq via Reykjavik. Un chef de projet de Greenland Guidance et un membre de l'équipe du GEUS l'ont rejoint le 22 juin.

Les premiers jours à Narsarsuaq ont été dédiés à la récupération des différents équipements qui avaient été expédiés pour cette campagne : un palan, un appareil de chauffage Herman Nelson, une tronçonneuse électrique (en secours de la tronçonneuse à essence laissée sur la glace durant le mois précédent), des harnais supplémentaires.

Le 25 juin, trois membres d'une équipe islandaise de recherche et de secours en glacier (ISAR, Iceland Search and Rescue) a rejoint le groupe. Le premier vol d'hélicoptère était prévu pour le 24 juin, mais la météo n'a pas permis de vol avant le 28 juin (voir [Fig. 40](#)). Cela signifie que le retard lié à la météo était déjà de quatre jours.

Durant cette période, l'équipe a élaboré des scénarios impliquant le minimum de matériel nécessaire (à comparer à l'équipement idéal) et a eu des discussions préliminaires à propos d'une option consistant à reconstruire un campement sur la glace pour y rester, limitant la dépendance à l'hélicoptère, plutôt que de se rendre sur zone chaque jour en partant de Narsarsuaq. En effet, le plan initial consistait à transporter les membres de l'équipe sur zone par hélicoptère chaque jour, aller le matin et retour le soir.



Source : windy.com

Fig. 40: Prévisions météorologiques du 22 juin sur la zone de recherche

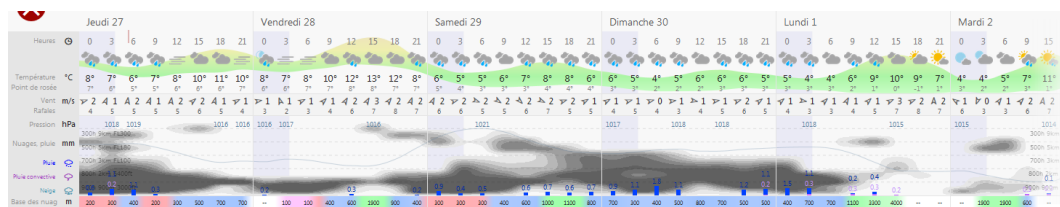
Le risque d'un effondrement du trou a également été évalué. En effet, de larges volumes d'eau de fonte, liés à de récents événements de pluie ou à l'utilisation prévue du système de chauffage pour faire fondre la glace, pourraient fragiliser la structure environnante de la crevasse. La probabilité d'un effondrement a été évaluée entre « improbable et possible », tandis que sa sévérité était estimée « modérée », principalement du fait que l'équipe était préparée et avait prévue de se sécuriser à l'aide de systèmes d'arrêt de chute à ancrages multiples.

Un charpentier à Narsarsuaq a construit une plateforme pour le treuil, et a découpé un baril de fuel en deux afin d'obtenir une protection en forme de U, permettant de protéger le bord du trou qui sera creusé afin que le câble du treuil ne s'enfonce pas dans la neige.

De nouveaux retards météo s'annonçaient (voir [Fig. 41](#)). Le nouveau plan consistait alors à transporter trois passagers sur le site démantelé de CR2, déplacer les cinq filets de matériel encore présents vers la zone d'extraction, transporter les passagers vers cette zone et vérifier que le réchaud, les armes, et une tente au moins avaient survécu au mois passé sur la glace. À ce moment l'hélicoptère pouvait quitter la zone et le travail pouvait démarrer.

Dans le scénario du campement sur place, le « travail » ne consistait pas seulement à creuser, mais également à passer beaucoup de temps aux tâches de survie : cuisiner et entretenir le campement.

Le second vol était attendu, transportant d'autre passagers et le système de chauffage, puis le vol final avec les derniers passagers juste après (et non des jours après), afin d'aider à entretenir le campement et à creuser et faire fondre la neige.



Source : windy.com

Fig. 41: Prévisions météorologiques du 27 juin sur la zone d'extraction

Le 28 juin, un premier hélicoptère décolla avec trois membres de l'équipe à bord, leur matériel de survie et de sécurité, et quelques outils – un treuil, une foreuse et un générateur. Ils ont été déposés à proximité des six filets et des futs de carburants issus du désassemblage de CR2. Après avoir trouvé les fusils permettant de se protéger des ours polaires, une tente, et après s'être assuré que le réchaud pouvait être allumé, l'hélicoptère les a laissés sur place afin qu'ils puissent dégager les élingues de la glace. Il est retourné à Narsarsuaq afin de récupérer deux autres équipiers, pour les amener au CR2, puis il a hélitreuillé quatre filets de matériel du CR2 vers la zone d'extraction, et enfin a transporté cinq passagers depuis CR2 vers la zone d'extraction et est retourné vers Narsarsuaq en transportant une motoneige.

Un troisième vol a permis de déposer le filet contenant le système de chauffage Herman Nelson et un baril de carburant supplémentaire. L'hélicoptère est retourné à Narsarsuaq avec la seconde motoneige. Le campement a été monté. Une vue aérienne du campement durant la phase d'extraction est présentée sur la [Fig. 42](#).



Fig. 42: Photo prise d'hélicoptère du site d'extraction, tel que décrit dans (Mankoff, et al., 2020).

Les zones (A et A') en rouge foncé entre les drapeaux marquent les localisations connues de crevasses détectées par GPR et DGNSS. Les lignes pointillées démarquent les zones sûres en blanc et les zones non sûres en roses, déterminées par données GPR, cartographie UHF ([Fig. 21](#)) et sondage extensif de la neige ainsi que par les incertitudes sur la localisation des crevasses à partir de leur distance aux crevasses connues. (B) Rampe de sortie de la fosse d'extraction. (C) Contreplaqué utilisé pour recouvrir la fosse la nuit et éviter son remplissage par la neige. (D) Corde de sécurité traversant une crevasse entre l'îlot du campement au nord et l'îlot de travail au sud. (E) Traineau. (F) Treuil et sa plateforme. (G) Générateur utilisé pour alimenter le treuil. (H) Perches en bambou marquant le câble d'alarme à ours polaires entourant le campement. (I) Chauffage Herman Nelson, tuyau et fût de carburant. (J) zone d'atterrissage de l'hélicoptère. (Photo : Austin Lines)

L'extraction manuelle démarra le jour même. À 11 h 00, la profondeur de 1,1 m était atteinte. La météo se dégradait. De la neige tombait et le vent soufflait en rafale jusqu'à 8 m/s, mais le travail continua. À 14 h 00, l'équipe avait atteint la profondeur de 2 m. L'extraction sans treuil cessa, l'utilisation du treuil pour sortir les traineaux remplis de neige hors de la fosse rendit le travail beaucoup plus facile pour les équipiers.

À 17 h 45, une pelle entra en contact deux fois avec une pièce métallique. Les deux contacts étaient localisés approximativement au même endroit. Tel que défini par le protocole en cas de contact accidentel, le point de contact avec la pelle a été marqué sur la pièce. L'équipe commença alors à faire fondre la neige avec le système de chauffage Herman Nelson pour éviter un contact métal/métal supplémentaire. Six aubes de soufflantes, encore solidaires de ce qui semblait être un fragment de moyeu, ont été retrouvées, rompues à leur moitié. La pelle avait impacté deux fois la surface de rupture d'une aube de soufflante.

Il a pu être confirmé à ce stade que la pièce était un fragment du moyeu de soufflante, auquel des aubes étaient encore solidaires.

La pièce était malheureusement enfouie du côté de la fosse qui faisait face à la crevasse. L'équipe devait donc faire fondre la glace vers le flan de la crevasse. L'objectif était de passer des cordes autour de la pièce encastrée dans la glace et de la sécuriser via un ancrage aussitôt qu'il était possible d'y trouver un point d'attache.

La surface de l'aube de soufflante sur laquelle le contact s'est produit se situait à une profondeur approximative de 3 m, et environ 30 cm sous la surface d'impact de 2017 définie sur la base des couches de glace solides observées. C'était cohérent avec les hypothèses prises par l'ONERA pour leur analyse d'images radar et décrite dans le paragraphe [1.3.5](#).

La fonte de la glace s'interrompit entre minuit (40 % de fonte) et 08 h 00 le matin suivant. L'opération de fonte s'est poursuivie pendant la journée ([Fig. 43](#) et [Fig. 44](#)). Une fois la pièce libérée de sa glace, des efforts significatifs étaient encore nécessaires pour la sortir du trou. Il n'y avait pas réellement de bon point d'attache, les ruptures métalliques tranchantes ont même coupé une corde qui avait été passée autour de la pièce. Finalement, un mécanisme de levage à trois degrés de liberté a été construit et la pièce a été levée à la main, placée sur un traineau, et trainée vers la surface.



Fig. 43: Opération de fonte de la neige et de la glace autour de la pièce à 4 m de profondeur.
(Photo : Arnar Ingi Gunnarsson)



Fig. 44: secouriste Islandais en train de faire fondre la glace.
(Photo : Dirk van As, Greenland Guidance)

La pièce a été hélitreuillée vers Narsarsuaq où elle est arrivée à 18 h 45. Malgré les avertissements et les nombreuses précautions prises aux cours des opérations, un contact accidentel additionnel métal/aube de soufflante s'est produit une fois que la pièce était au sol, alors que l'hélicoptère en vol stationnaire à sa verticale a relâché le crochet de l'élingue. Le crochet est tombé à la verticale et a impacté une aube de soufflante. La localisation du dommage a été marquée. Celui-ci n'a pas eu de conséquence sur la recherche de la cause de rupture du moyeu.

Un vol final d'hélicoptère a permis de rapatrier les cinq membres de l'équipe opérationnelle. Avant de quitter le site, ils avaient démonté le campement pour l'essentiel, mais certaines tâches restaient à finaliser : des filets de cargaison devaient encore être déplacées du champ de crevasses vers une zone sûre afin de pouvoir être récupérées par les pilotes sans assistance et rapatriées à Narsarsuaq.

Le 6 juillet, un enquêteur de sécurité du BEA, un enquêteur du NTSB et un conseiller d'EA se sont retrouvés dans le hangar de Narsarsuaq pour faire les premières observations sur la pièce et ses surfaces de rupture, prendre des clichés et la sceller dans une caisse pour son transport vers P&W, pour examen approfondi.

L'avion affrété par EA pour transporter la pièce depuis Narsarsuaq vers P&W, East Hartford, Connecticut n'a pas pu décoller le 8 juillet comme prévu à cause de forts vents. Il a finalement pu décoller le 10 juillet. Le jour suivant, les examens du moyeu et des aubes de soufflantes démarraient chez P&W, sous la supervision du BEA.



Fig. 45 : Chargement de la caisse du moyeu de soufflante dans l'avion de transport, un Antonov 12

5 - ENSEIGNEMENTS

5.1 Sécurité

Quelques jours après l'occurrence du F-HPJE, un hélicoptère d'Air Greenland s'est dérouter pour localiser et récupérer des débris. Ni les données Landsat récupérées peu de temps après l'occurrence (voir [Fig. 46](#)), ni les images TerraSar X de la région ne révélèrent de présence de crevasse dans la zone.

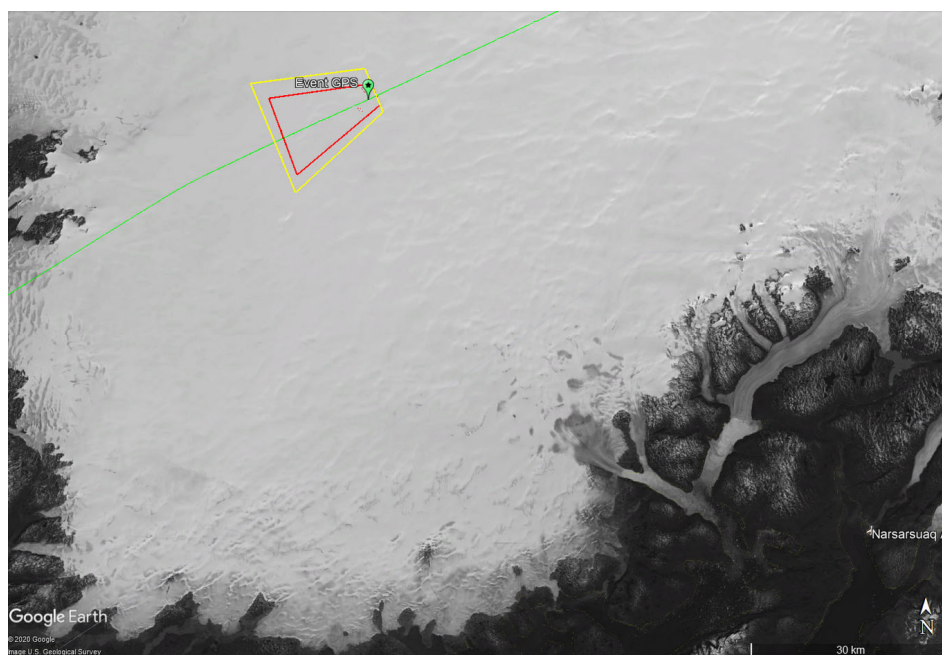


Fig. 46 : Position de l'évènement et premières zones de recherche. L'arrière-plan est une image Landsat 8 du sud du Groenland. Les zones rouges et jaunes ont été communiquées à Air Greenland pour les recherches en hélicoptère.

Pendant les recherches par Air Greenland, l'hélicoptère s'est posé à plusieurs reprises sur la calotte glaciaire et le pilote a quitté l'hélicoptère et y a marché sur plusieurs dizaines de mètres.

Une fois que la campagne radar avait été réalisée, les analyses des images acquises ont montré que la zone de recherche était entourée de champs de crevasses bouchées par des ponts de neige (Fig. 47). Par chance, la majorité des débris qui ont été localisés se trouvaient en dehors de ces champs de crevasses.

D'après (Mankoff, et al., 2020), étant donné que ~50 % de la région [...] est un champ de crevasses, et que la densité de crevasses peut atteindre ~20 %, on estime les chances d'atterrir sur une crevasse ou que le premier pas hors de l'hélicoptère se fasse sur une crevasse à ~10 %, et à presque 100 % les chances de traverser une crevasse si l'on se déplace de quelques dizaines de mètres, avec des conséquences potentiellement fatales.

Ainsi, **un relevé géophysique régional approfondi devrait être effectué avant tout travail opérationnel sur le terrain afin d'évaluer les risques et de recueillir les données initiales nécessaires pour pouvoir interpréter les résultats d'analyses géophysiques ultérieures.** Si de telles données ne sont pas disponibles, une extrême prudence doit être de mise lors du premier atterrissage sur zone.

ALOS PALSAR, un instrument japonais, constitue un autre moyen d'évaluer la présence potentielle de crevasses par imagerie satellite radar en bande L. Il n'a pas été utilisé pendant cette campagne car les crevasses avaient été découvertes lors du traitement des images radar aéroportées, dont la résolution était meilleure. Il serait intéressant d'évaluer si ces crevasses sont visibles sur des images PALSAR, dans le cadre d'un déploiement futur. Le SAR en bande P s'est révélé être la meilleure option pour détecter les crevasses. Une future mission de l'ESA intégrera un système SAR en bande P dans l'espace, appelé BIOMASS. Cependant, la résolution de BIOMASS est trop grossière pour pouvoir représenter un intérêt dans le cadre de ce type d'application.

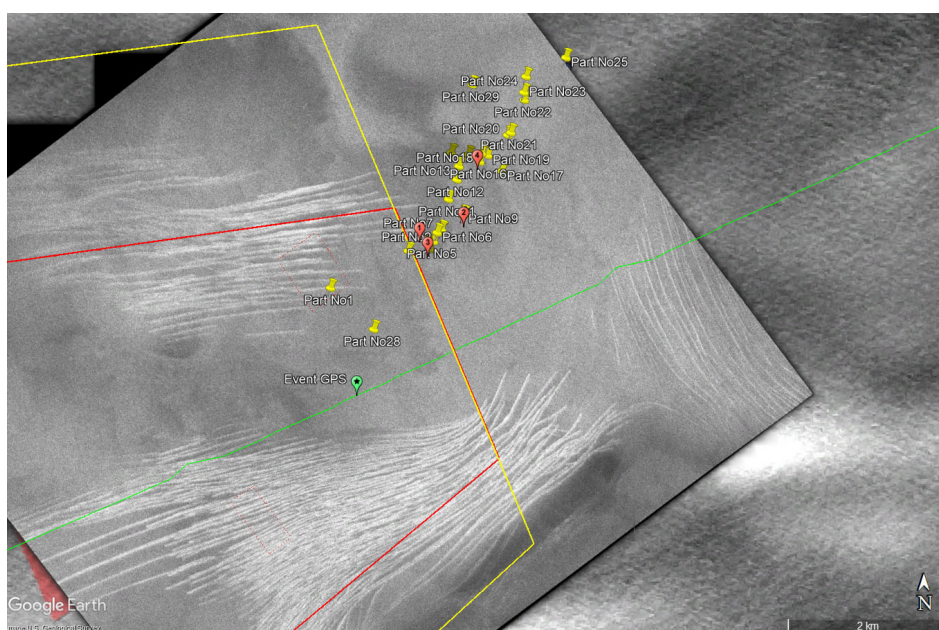


Fig. 47 : Débris retrouvés par Air Greenland (plots jaunes). Le premier plan est une image UHF de la zone, acquise lors de la campagne radar aérienne d'avril 2018. Les crevasses sont clairement visibles en blanc. L'arrière-plan est une image TerraSar X de la zone.

Pendant les campagnes au sol, la cartographie SAR des crevasses a été utilisée pour déterminer les zones sûres de recherche. La sécurité des zones pour lesquelles des crevasses étaient visibles sur les images SAR a été évaluée par sondage au GPR avant une quelconque recherche systématique, en comparant l'épaisseur des ponts de neige à la largeur des crevasses. Des études locales dans ces zones ont pu être réalisées par des personnes encordées.

La présence de crevasses constitue également une contrainte en termes de planification. La meilleure période pour organiser une campagne au sol est avril-mai. Avant avril, les jours sont courts, la météo est défavorable, les tempêtes sont fréquentes et il y a très peu de chances d'avoir des conditions permettant des vols en hélicoptère. Après le mois de mai, pendant les épisodes de chaleur, la neige commence à fondre à la surface et à s'infiltrer de sorte que les ponts de neige des crevasses s'affaiblissent.

Outre les crevasses, l'autre risque majeur en termes de sécurité est la présence potentielle d'ours polaires. Le campement étant relativement petit, l'une des protections consistait en un fil à déclenchement d'alarme qui entourait les tentes de couchage. Tous les membres de l'expédition avaient également suivi une formation de survie qui comprenait l'utilisation de fusils et de fusées pyrotechniques pour effrayer les ours polaires. Le fil à déclenchement d'alarme est efficace pour les campements de petite taille, mais devient inapproprié pour les campements étendus.

Aucun ours polaire n'a été aperçu par les membres d'expédition lors des différentes campagnes au sol. Cependant, un individu a été observé à proximité d'habitations de l'autre côté du fjord de Narsarsuaq lorsque l'équipe était bloquée à l'aéroport en mai 2019. Peu de temps après, il a été aperçu nageant à travers le fjord vers Narsarsuaq, mais n'a plus été revu.

5.2 Organisation

Dans le cadre de l'enquête de sécurité du BEA et pour d'évidentes questions de sécurité des vols, l'objectif principal était de retrouver les fragments du moyeu de soufflante aussi vite que possible, car leur examen était déterminant pour pouvoir identifier la cause de la perte de la soufflante.

Toutefois, cette expérience technique et humaine a montré que des considérations d'ordre organisationnel doivent être prises en compte. Ce paragraphe traite des recommandations de ce type afin d'être aussi efficace que possible dans le cas de recherches similaires futures. Certaines parties de ce paragraphe sont extraits de (Mankoff, et al., 2020).

Les campagnes de détection, de localisation et d'extraction doivent être distinctes car toutes les informations peuvent ne pas être disponibles avant que l'étape précédente ne soit terminée.

Un relevé géophysique régional approfondi devrait être effectué avant les campagnes aériennes ou opérationnelles au sol, afin d'évaluer les risques et de recueillir les données initiales - par exemple, positionner des émetteurs DGNSS, des réflecteurs, et collecter des mesures de densité de neige.

La campagne aérienne SAR n'a au départ pas été en mesure de détecter le fragment du moyeu de test, ce qui entraîna la reconversion d'une campagne de recherche ciblée en une campagne de recherche systématique. La durée du développement des algorithmes et du traitement des données nécessaires pour pouvoir identifier trois cibles potentielles a été particulièrement importante.

Un seul fragment du moyeu de soufflante a été retrouvé, mais aucune autre cible saillante n'a été détectée dans la zone étendue scannée par le SAR pendant la campagne de l'ONERA. Le fait de ne pas avoir trouvé d'autre fragment du moyeu n'a pas eu d'incidence sur l'identification de la cause de sa rupture.

La validation et les tests des détecteurs doivent être effectués avec des pièces d'essai aussi représentatives que possible des pièces recherchées. Durant ce projet, la pièce de test était essentielle à la validation des détecteurs et au développement des algorithmes d'analyse. Elle représentait un cinquième d'un moyeu de soufflante à l'échelle 93 % et a été utilisée pour tester empiriquement les différents moyens. La pièce réelle était un fragment inconnu d'un moyeu de soufflante à l'échelle 1. Il s'est avéré que le fragment retrouvé représentait un peu plus de 50 % de la pièce complète, plus neuf fragments d'aubes de soufflantes encore attachés. L'utilisation de la pièce de test, significativement plus petite, a compliqué les essais de détection réalisés avec le SnowTEM et le GPR.

La capacité de détection en mouvement de SnowTEM a également été testée avec succès à Funder, mais avec le moyeu de test à la surface du sol et non enfoui sous la neige. Durant la campagne de terrain, le SnowTEM n'a pu détecter le moyeu de test enfoui sous la neige qu'en stationnaire. Il a été décidé sur cette base d'effectuer des mesures du type « go-stop-go ». Une recherche systématique dans une zone étendue avec cette approche n'était ni pratique, ni possible dans les délais impartis. Les retards météorologiques importants accumulés au début du CR2 avaient nécessité de reconvertir la recherche systématique en une recherche ponctuelle (voir [paragraphe 3](#)), ce qui rendait le fonctionnement de SnowTEM en stationnaire moins critique. Le fragment du moyeu de soufflante retrouvé aurait probablement été justifié détectable avec le SnowTEM en mouvement. Il est probable que son signal réel ait généré moins de faux négatifs avec les GPR et, en sachant quel niveau de signal rechercher, moins de faux positifs dans les cas où le rapport signal sur bruit était trop discutable.

Lorsque de nouveaux instruments sont développés, ou adaptés pour détecter de nouvelles cibles ou lorsque des opérateurs sont formés sur de nouvelles cibles, des essais de l'instrumentation de détection dans des conditions et sur des terrains analogues sont vivement recommandés avant de monter une campagne à grande échelle. **Le meilleur site de test pour les moyens de détection est le site final lui-même**, dans ou à côté de la zone de recherche réelle. Cela permet d'éviter d'avoir des conditions de neige et de glace très variables entre différentes régions de la calotte glaciaire, ou entre celles de la calotte glaciaire et d'un environnement alpin.

Les tests doivent être effectués dans des conditions aussi proches que possible que celles attendues sur site. Par exemple, les capacités de tractage de FrostyBoy ne correspondaient pas à la charge du SnowTEM et ne pouvaient donc pas être utilisées pour remorquer le SnowTEM dans le champ de crevasses. Pour des raisons logistiques et de disponibilité, il n'a pas été possible de tester cette configuration à Zermatt, mais des mesures de force de remorquage ont été effectuées, ce qui s'est avéré insuffisant. Il est cependant possible de réduire la charge du SnowTEM pour de futures applications, ou d'utiliser des véhicules autonomes plus puissants.

5.3 Moyens de détection

Durant la campagne de recherche aérienne en avril 2018, de multiples résolutions et détecteurs ont été utilisés. Résolutions multiples en imagerie satellite, allant de basse résolution (par exemple Landsat, 30 m / pixel) à très haute résolution (centimétrique), puis en imagerie radar lors de survols en basse et haute résolution. De multiples détecteurs doivent être utilisés car avant que ce type de recherche ne devienne commun, le détecteur qui répondrait le mieux aux différentes tailles, formes, matériaux et surfaces des débris n'est pas connu a priori. Les recherches doivent être redondantes (c'est-à-dire que plusieurs passes doivent être effectuées avec le même détecteur) de façon à ce que des algorithmes d'empilement et de calcul de moyenne puissent être appliqués. Différentes géométries d'observation de la zone de recherche sont recommandées, en termes de cap et d'angle d'incidence (le SAR étant une technologie à visée latérale).

Si la zone et les débris sont recouverts de neige, des données peuvent être obtenues par SAR car les ondes électromagnétiques peuvent pénétrer la neige sèche. La résolution est un point crucial, ainsi que la fréquence. La résolution doit être meilleure que la taille de l'objet à observer. Par exemple pour des crevasses, la résolution doit être inférieure à 5 m, ce qui est compatible avec les performances de la mission ALOS. Pour la détection d'un objet d'environ 1 m, une résolution d'environ 50 cm est nécessaire, ce que les missions commerciales spatiales actuelles ne savent pas atteindre.

Le choix de la fréquence est crucial également. Les basses fréquences pénètrent plus profondément que les hautes fréquences. On pourrait conclure que plus la fréquence est basse, mieux c'est. En fait, cette perception est erronée. Le pixel d'une image contenant l'objet sera composé de la réponse du milieu naturel sur une profondeur de l'ordre de la capacité de pénétration de l'onde combinée à la réponse de l'objet atténuée par l'épaisseur de neige le recouvrant. La profondeur de l'objet sous la neige est donnée. Ainsi, pour maximiser sa détectabilité, il faut maximiser sa réponse par rapport à la contribution de l'arrière-plan, ce qui peut également signifier minimiser l'atténuation et la réponse de l'arrière-plan. Aux fréquences les plus basses, l'atténuation est minimisée mais la réponse de l'environnement est maximisée par la contribution des profondeurs. Aux fréquences les plus élevées, l'atténuation à travers le milieu est plus élevée mais la réponse liée à la colonne de neige est plus faible.

La résolution est le point clé majeur et en général, les plus hautes résolutions peuvent être atteintes aux fréquences les plus élevées. Il est donc recommandé d'utiliser la fréquence permettant une pénétration compatible avec la profondeur attendue de l'objet.

Au cours de la Phase I, des images satellitaires optiques ont été utilisées pour tenter de retrouver des fragments visibles sur la surface de la calotte glaciaire. Il est apparu qu'il n'y avait pas suffisamment de motifs fixes (tels que des rivières, des côtes, des lacs) sur les images pour pouvoir les recalculer correctement aux coordonnées terrestres. Même si une pièce avait été repérée, il aurait été impossible d'obtenir ses coordonnées GPS avec une précision inférieure à 200 m, car le décalage observé entre la position réelle de motifs sur la calotte glaciaire et leurs coordonnées sur les images satellitaires pouvaient atteindre 200 m.

La première campagne au sol (CR1) menée par le GEUS, en mai 2018 juste après la campagne aérienne, était basée sur l'utilisation de GPR MALÅ 250 MHz et 800 MHz tractés par des motoneiges. Le GPR avait précédemment été utilisé pour cartographier la répartition et la profondeur de débris (en métal entre autre) dans la calotte glaciaire du Groenland (Karlsson NB, 2019). Cependant, les profondeurs, les tailles et les matériaux étaient différents : Karlsson a étudié une petite base militaire dont les divers débris étaient enfouis à 100 m de profondeur, tandis qu'ici une pièce en titane d'environ 1 m³ enfouie à 1 ou 2 m de profondeur était recherchée.

Les tests de détection sur le moyeu de test enfoui sous la neige ont rapidement montré que le GPR n'était pas optimal pour une recherche dans des zones étendues. En effet, l'antenne à 800 MHz n'a pas détecté la pièce de test lors de son passage à sa verticale. L'antenne à 250 MHz a pu la détecter dans certaines directions de déplacement de la motoneige (c'est-à-dire lorsque la pièce avait une certaine orientation par rapport au radar). Cependant, la détection n'était pas systématique. De plus, le signal provenant du moyeu de test était similaire au signal des différentes lentilles de glace situées sous la neige dans la zone de recherche : des détections ont été identifiées près de la plupart des cibles ONERA lors de l'analyse des données GPR, mais après avoir fouillé à ces endroits, seules des lentilles de glace ont été découvertes : les faux positifs des données SAR ont été confirmés au GPR. Enfin, lorsque le moyeu de test a été détecté, ce n'était que lorsque le GPR était directement à sa verticale, ce qui signifiait qu'un espacement dense de 1 m des traces de sondage était nécessaire, ce qui réduisait considérablement la taille de la zone de recherche permise par rapport à celle initialement prévue, compte tenu des contraintes temporelles.

Le GPR a été utilisé par des membres de l'équipe encordés afin de sonder la périphérie du champ de crevasse. Il a pu détecter la présence des crevasses dont les ponts de neige semblaient avoir une épaisseur inférieure à 3 m et des strates déformées vers le bas. Le GEUS n'a donc pas réalisé de recherche dans ce champ de crevasses, mais a déterminé que c'était réalisable avec des personnes spécifiquement formées et un véhicule autonome.

Lors de la deuxième campagne au sol (CR2), également menée par le GEUS, en mai 2019, un GPR SIR-30 a été utilisé, tracté par un véhicule autonome, « FrostyBoy », développé par le groupe PRE ([Fig. 48](#)). Il n'a pas été en mesure de détecter le moyeu de test enfoui, mais cela peut s'expliquer par différents facteurs qui se sont combinés lors de la tentative de test (tels que des interférences de radiofréquences avec le système de communication de FrostyBoy). Le GPR SIR-30 n'obtenait pas de faux positifs (lentilles de glace dont le signal était similaire au moyeu de test). Un ou plusieurs des facteurs suivant pourraient avoir contribué à cette différence ; différence de fréquence de mesure, de systèmes radar, de véhicule de remorquage, de vitesse de remorquage ou de technique de post-traitement.

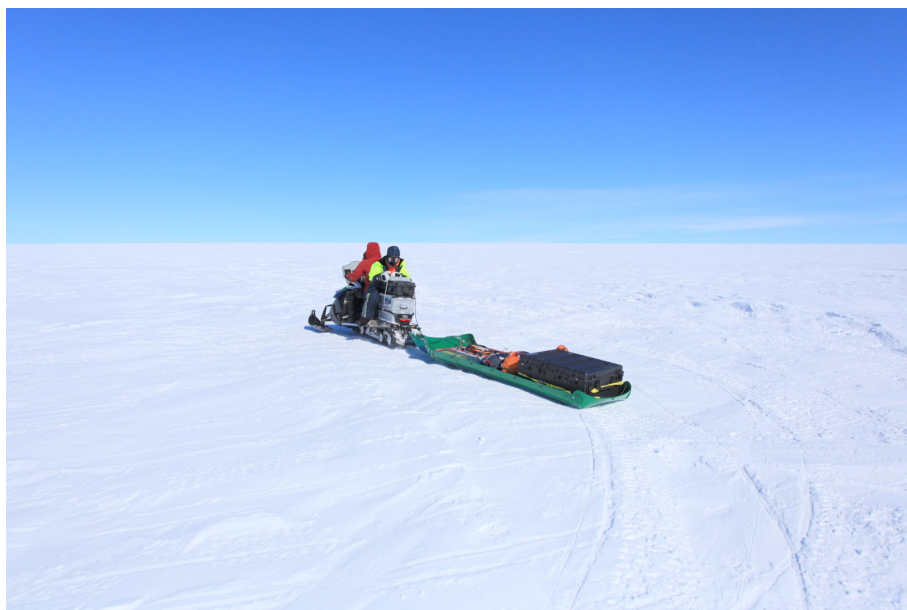
L'antenne à 400 MHz du SIR-30 a été utilisée pour sonder la calotte glaciaire jusqu'à des profondeurs de 40 m et localiser les crevasses enneigées. Lors des sondages autour de la cible ONERA la plus prometteuse au cours de la campagne CR2, une surface hautement réfléchissante a été détectée à une profondeur approximative de 3,4 m. Le signal a été confirmé au même endroit lors de deux autres sondages. Étant donné que le SIR-30 n'avait pas eu de faux positifs en dehors du champ de crevasse et que ce signal significatif était le seul du genre obtenu lors des différentes évaluations des champs de crevasses, il a été jugé très prometteur. Cependant, sur la base de l'expérience vécue avec les GPR lors de la première campagne au sol, il n'était pas certain que le signal provienne bien d'un objet métallique jusqu'à ce qu'un signal similaire soit observé avec le détecteur SnowTEM.



Source: Austin P. Lines – PRE

Fig. 48: Véhicule autonome FrostyBoy

L'antenne à 400 MHz a été tractée à la main à plusieurs reprises autour du site d'extraction afin d'y caractériser les crevasses. Le fragment de moyeu réel était détecté lorsque le GPR se trouvait à moins de 1,5 m de sa localisation. Étant donné la profondeur d'enfouissement de 3,3 à 4 m mesurée après l'extraction, cela était cohérent avec les caractéristiques du faisceau du GPR. De plus, le signal était plus élevé d'un côté que de l'autre, ce que l'on retrouvait dans tous les enregistrements GPR et qui mettait en évidence une réponse hétérogène. D'après les informations obtenues lors de l'extraction du fragment de moyeu sur son orientation dans la neige, cette réflexion plus élevée était due aux différences d'orientation et de surfaces de la pièce. La raison pour laquelle le GPR a détecté le fragment de moyeu réel et non la pièce de test peut être liée à leurs différences de taille, leurs profondeurs d'enfouissement étant similaires.



Source: GEUS

Fig. 49 : motoneige tractant le GPR MALÅ durant la première campagne au sol

En raison de problèmes techniques lors du test à Zermatt, le fonctionnement du détecteur électromagnétique SnowTEM n'a réellement été vérifié empiriquement qu'une fois sur la zone de recherche. Les drapeaux marquant l'emplacement du moyeu de test enfoui à la fin de CR1 se sont retrouvés à leur tour enfouis. La détection et la localisation du moyeu de test au début de CR2 a permis une bonne évaluation des capacités de SnowTEM. Il s'est avéré que la pièce n'était pas détectée lorsque SnowTEM était en mouvement, mais une fois stationnaire un signal a été détecté à une profondeur de 4,2 m. Lorsque SnowTEM était tracté, les niveaux de bruit augmentaient de 50 à 100 %, en raison de courants induits par le mouvement.

Le sondage des cibles 2a et 2b a ensuite été réalisé en suivant des traces espacées de 1 à 2 m et en s'arrêtant quelques secondes tous les mètres.

Comme il avait été jugé déraisonnable en termes de sécurité de déplacer le détecteur SnowTEM et tous les équipements nécessaires vers la cible 1 en motoneige, en traversant les onze crevasses la séparant du campement, une configuration de SnowTEM pouvant être transportée en hélicoptère et opérée manuellement a été construite. Le SnowTEM modifié fonctionnait de manière identique à l'original, avec toutes quelques difficultés pour maintenir une géométrie constante entre les solénoïdes émetteur et récepteur. À proximité de l'endroit où le GPR SIR-30 avait détecté un signal anormal, SnowTEM a perçu un signal d'environ deux ordres de grandeur supérieur à celui provenant du moyeu de test, indiquant sans doute possible la présence d'une pièce métallique. SnowTEM avait localisé le fragment du moyeu de soufflante à environ 1 m au nord d'une crevasse d'environ 4 m de large dont le pont de neige mesurait environ 6 m d'épaisseur. Le signal était beaucoup plus fort que celui du fragment de moyeu de test en raison de la combinaison des facteurs suivants : dimensions plus élevées, profondeur plus faible et présence de pièces supplémentaires encore solidaires du fragment de moyeu en titane: composite en fibres de carbone, aluminium, téflon, et acier inoxydable.

Le signal était suffisamment fort pour que ce fragment de moyeu ait été détectable avec SnowTEM en mouvement, même avec l'augmentation du bruit induit. Il était clairement détectable sur une zone supérieure à 32 m² - lorsqu'il se trouvait à l'intérieur du solénoïde émetteur de 16 m², dans une zone similaire entre les solénoïdes émetteur et récepteur, et toujours détectable en dehors de cette zone.

En conclusion, **l'utilisation de détecteurs redondants, indépendants et autonomes est recommandée**. La redondance est une technique courante pour gérer les défaillances en environnements hostiles et distants, lors de campagnes de terrain. Dans ce projet, deux systèmes SnowTEM identiques ont été construits pour éviter de compromettre la réussite de la campagne en cas de panne. Chaque GPR a également été amené sur site avec un ensemble complet de pièces de rechange.

Les deux différents GPR se sont comportés de manière similaire en ce qui concerne les observations « traditionnelles » des couches profondes de glace, mais différemment en ce qui concerne les lentilles de glace. Des capteurs indépendants sont utiles pour couvrir un large éventail de capacités de détection lorsque de nouveaux types de cibles sont étudiés, hors de l'expérience de la plupart des glaciologues, ou pour des types de cibles connus mais qui sont enfouis dans un média et dans un environnement hors de l'expérience de la plupart des enquêteurs de sécurité dans le domaine aérien.

Des capteurs indépendants peuvent également dépasser les limites de capteurs pris individuellement. Par exemple, les GPR sont des outils classiques opérés par divers personnels ayant une expérience significative du terrain polaire, les chiens renifleurs (non utilisés ici) peuvent être formés pour détecter des restes humains, les détecteurs RECCO (non utilisés ici) sont légers et portables, et le SnowTEM a une grande fauchée et peut être utilisé pour distinguer les matériaux conducteurs des matériaux non conducteurs.

Des détecteurs autonomes peuvent être utilisés pour réduire l'exposition au risque dans des environnements potentiellement dangereux, pour augmenter la taille de la zone de recherche ou pour diminuer la durée des recherches. Dans un avenir proche, il est probable que des drones capables de transporter des charges lourdes représentent une nouvelle gamme de détecteurs utile pour ce type de campagne de recherche.

5.4 Extraction

Initialement, il était prévu d'extraire la pièce à la fin de CR2 si celle-ci était localisée au cours de la campagne. Les retards liés aux intempéries, les besoins spécifiques en matériel et l'engagement des membres de l'expédition dans d'autres projets ont rendu impossible l'extraction de la pièce juste après sa détection en fin de campagne. Cela a permis d'organiser soigneusement la campagne d'extraction avec les moyens et le personnel appropriés.

Parmi les nombreuses préoccupations concernant l'organisation de cette campagne, deux d'entre elles ont été jugées « majeures » :

- ❑ la sécurité des personnes travaillant sur la calotte glaciaire : la pièce se trouvait à 1 m du bord d'une crevasse, la neige commençait à fondre (c'était fin juin 2019), fragilisant les ponts de neige recouvrant les crevasses,
- ❑ la protection de la pièce, pour permettre une analyse de défaillance optimale une fois celle-ci récupérée. Cela a nécessité d'éviter tout contact métal contre métal avec la pièce.

Pour adresser le premier problème, une équipe de sauveteurs en montagne a été réunie par Greenland Guidance. Ses membres étaient habitués à travailler dans un environnement glaciaire en présence de crevasses, avec cordes et équipements de sécurité associés.

Pour le deuxième sujet, un système de chauffage Herman Nelson de 120 kW a été loué pour faire fondre la neige entourant la pièce. Comme onze crevasses séparaient le site d'extraction du campement, l'équipement nécessaire a dû être déplacé sur le site d'extraction par hélicoptère. Vingt à quarante heures de fouilles ont été jugées nécessaires pour extraire le fragment.

Les premières couches de neige ont été retirées avec des pelles et sorties à l'aide de traîneaux tractés par un treuil. Les couches de glace formées par la neige fondue et regelée au cours des saisons antérieures ont dû être découpées à la tronçonneuse. Il était attendu que la pièce repose à 4 m de profondeur, mais un contact métal contre métal avec une pelle s'est produit à une profondeur de 3,30 m. À la suite de cela, seul le système de chauffage a été utilisé pour libérer la pièce de la glace. Des gants chirurgicaux ont été utilisés lors de la manipulation du fragment de moyeu de soufflante pour le protéger de contaminations qui auraient pu compliquer l'enquête. Les mains pouvaient en effet avoir été en contact avec un générateur, un treuil, un réchaud ou d'autres moteurs.

Lorsque la pièce a été hélitreuillée à l'aéroport de Narsarsuaq, un contact supplémentaire avec une aube de soufflante s'est produit une fois la pièce posée au sol lorsque l'hélicoptère, toujours en vol stationnaire à sa verticale, a libéré le crochet de l'élingue. Le crochet est tombé directement sur une aube et l'a indentée. Ces traces d'impact n'ont finalement eu aucune conséquence sur l'analyse de défaillance.

Malgré toutes les précautions prises selon les informations disponibles à l'époque, un niveau de risque non nul d'endommagement de la pièce existait toujours et devait être accepté.

La méthodologie choisie pour l'extraction a permis de libérer la pièce dans des conditions de sécurité satisfaisantes en environ 30 heures avec l'aide de cinq personnes. La présence du treuil et du système de chauffage se sont avérés essentiels.

5.5 Conditions météorologiques

Les deux campagnes au sol ont été planifiées en prenant en compte de probables retards liés aux intempéries, leur durée totale incluant 20 % de jours supplémentaires.

En ce qui concerne CR1 en avril-mai 2018, il était prévu que les membres d'expédition passent 23 nuits sur la calotte glaciaire, et 23 nuits ont été effectivement passées sur la glace. Des intempéries ont toutefois été rencontrées au cours de la mission. Pendant certaines tempêtes, les tentes se sont retrouvées enfouies sous la neige et ont dû être déplacées. À la fin de la campagne, des conditions météorologiques sévères ont été rencontrées, qui ont causé des dommages à certaines tentes (montants pliés ou cassés, ouverture de fermetures éclair laissant la neige s'engouffrer), certaines ont même dû être abandonnées le matin. Des conditions de voile blanc se sont également produites. La visibilité est tombée à 2 à 3 m seulement (de zéro à un drapeau en visuel). Des cordes ont été utilisées pour guider les personnes entre les tentes personnelles et la tente de cuisine. La tente des toilettes s'est renversée et s'est effondrée.

Malgré ces épisodes, l'équipe est arrivée sur site et l'a quitté les jours prévus, ce qui était assez rare pour être souligné. Les températures se sont situées entre -35°C et 0°C. Les jours de vent pouvaient faire tomber la température ressentie à -50°C.

Lors de CR2 en mai-juin 2019, 24 nuits de campement étaient prévues sur site. Seulement 10 ont été réellement passées sur la glace. Les vols en hélicoptère étaient prévus à l'avance certains jours définis. En raison de vents violents ou de nuages (ou des deux) à Narsarsuaq, sur le site de recherche ou entre les deux, de nombreux vols ont dû être annulés ou reportés lorsque c'était possible, en fonction de la disponibilité de l'hélicoptère. Le planning initial prévoyait que l'équipe complète soit sur place le 28 avril 2019. En réalité, en raison des intempéries, presque rien ne s'est produit avant le 11 mai lorsque les dernières élingues d'équipement et cinq personnes ont finalement été transportées par hélicoptère sur le site de recherche. Une fois sur site, 20 à 30 % des jours restants étaient encore impraticables en raison de tempêtes, et chaque tempête nécessitait plusieurs heures de travail pour libérer le camp et le matériel des congères de neige ([Fig.50](#)). Les températures ont varié entre -15°C et +5°C.

La phase d'extraction était initialement prévue comme suit : deux jours pour hélitreuiller l'équipement et transporter les personnes vers le site d'extraction, quatre jours de fouille et deux jours pour l'hélitreuillage et le transport retour, avec quatre jours tampons. Aucun campement sur glace n'était prévu, la campagne était basée sur des vols aller-retour pour transporter les membres de l'équipe basés à l'hôtel à Narsarsuaq. Des hélicoptères ont été réservés pour quasiment tous les jours entre le 24 juin et le 8 juillet. Pour des raisons météo, le premier vol a eu lieu le 28 juin, ce qui signifiait que la marge de 4 jours était déjà consommée. Une fois sur la glace, l'équipe a décidé de ne pas quitter le camp en hélicoptère car la météo empirait, mais d'utiliser le reste de l'équipement de CR2 pour camper sur la glace. L'équipe est restée sur la glace pendant 3 nuits et a pu rentrer sans autre retard météo.

En conclusion, même si des marges ont été prises, la météo reste imprévisible et difficile à gérer dans cette région du globe et peut entraîner des complications. Bien que l'hélicoptère soit le moyen le plus pratique pour se rendre sur la zone de recherche, il est particulièrement sensible aux conditions météorologiques, que ce soit à Narsarsuaq, dans la zone de recherche ou entre les deux.

Les retards météo au début du CR2 ont conduit à réaliser une campagne dégradée par rapport à ce qui était initialement prévu. Une adaptation constante était essentielle dans cette situation.



Fig. 50: Congères de neige recouvrant l'équipement durant un épisode de fort vent

6 - CONCLUSION

Après 21 mois de recherches extensives, s'appuyant sur des technologies avancées telles que radars à synthèse d'ouverture, imagerie satellite, radars à pénétration de sol, détecteurs électromagnétiques, véhicule autonome et, surtout, sur l'engagement, les connaissances et l'expérience de toutes les personnes impliquées, un fragment du moyeu de soufflante du moteur n°4 de l'A380-861 immatriculé F-HPJE a finalement été localisé et récupéré.

Des développements spécifiques ont été réalisés au cours de cette période. Le SAR exploité par l'ONERA depuis un avion appartenant à l'AVDEF n'avait jamais été utilisé auparavant dans un environnement arctique. En raison d'un niveau de bruit de rétrodiffusion inattendu sur les images radar et de la présence de crevasses et de lentilles de glace dans la zone de recherche, des algorithmes spécifiques d'analyse d'image ont dû être développés après la campagne radar aérienne. Ce post-traitement a permis de localiser un fragment du moyeu de soufflante sous la neige dans l'une des zones de recherche prioritaires définies par les calculs balistiques. Cette réussite a nécessité une formidable persévérance de la part du personnel de l'ONERA au vu des résultats obtenus juste après la Phase II.

De plus, un système de détection électromagnétique transitoire existant, utilisé pour cartographier des réseaux d'eau sous la surface du sol, a été amélioré afin qu'il puisse détecter un morceau de titane sous la neige et la glace. Associés au GPR et à un véhicule autonome, l'ensemble des moyens de détection a permis de confirmer la localisation de la pièce recherchée déterminée par l'ONERA. Les membres de l'expédition dirigée par le GEUS ont montré une adaptabilité incroyable pour surmonter les complications rencontrées au cours des campagnes successives et pour faire face aux retards liés aux intempéries.

La phase d'extraction a mobilisé des sauveteurs en montagne afin de réaliser une fouille en toute sécurité à un mètre d'une crevasse et extraire la pièce située à 3,30 m sous la surface.

Le fragment du moyeu de soufflante a été transporté à Narsarsuaq par hélicoptère, puis sur le site de Pratt & Whitney à East Hartford, CT, USA, pour un examen approfondi supervisé par le BEA.

Retrouver ce fragment était essentiel pour pouvoir déterminer l'origine de la défaillance du moteur. Un rapport d'enquête de sécurité Annexe 13 sera rendu public sur le site Internet du BEA mi-2020.

Le succès de ces opérations doit être attribué à la coopération exemplaire entre les parties prenantes, allant d'entrepreneurs et de doctorants à certaines des plus grandes entreprises mondiales de l'aérospatiale et de la défense. S'appuyer sur les meilleurs spécialistes dans les domaines de la glaciologie, des expéditions arctiques, de l'imagerie radar et de l'électromagnétisme a également été une des clés du succès, tant pour leur capacité à opérer ces technologies qu'à travailler dans un tel environnement et à y mener à bien leur mission. Les compétences et l'ingéniosité des différents membres de l'équipe ont certainement contribué au succès de cette opération multi-phases.

Merci à tous ceux qui ont contribué financièrement à ce projet et à tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre.

Des remerciements particuliers sont adressés à l'AIB DK pour leur aide constante, et en particulier pour leur implication auprès des autorités du Groenland qui a considérablement facilité le travail du BEA.

RÉFÉRENCES

- BEA. (2019). *Accident de l'Airbus A380 immatriculé F-HPJE et exploité par Air France, survenu le 30/09/2017 en croisière au-dessus du Groenland - Octobre 2017 - Juin 2018 - Phases de recherche I et II.*
- Benson, C. S. (1962). Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland.
- Crider, D. (2015). Trajectory Analysis for Accident Investigation. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum.*
- DiMarzio, J. P. (2007). *GLAS/ICESat 1 km Laser Altimetry Digital Elevation Model of Greenland, Version 1.* . Boulder, Colorado USA - NSIDC (National Snow and Ice Data Center).
- Edward Josberger, W. B. (s.d.). *Fifty-Year Record of Glacier Change Reveals Shifting Climate in the Pacific Northwest and Alaska, USA.* Récupéré sur USGS: <http://ak.water.usgs.gov/glaciology>
- Joughin, I. B. (2010). Greenland Flow Variability from Ice-Sheet-Wide Velocity Mapping. *Journal of Glaciology* 56, 415-430.
- Joughin, I. B. (2015, updated 2018). *MEaSURES Greenland Ice Sheet Velocity Map from InSAR Data, Version 2.*
- Karlsson NB, C. W. (2019). Ice-penetrating radar survey of the subsurface debris field at Camp Century, Greenland. *Cold Regions Science and Technology.*
- Mankoff, K. D., Van As, D., Lines, A., Bording, T., Kraghede, R., Joshua, E., . . . B. Karlsson, N. (2020). Search and recovery of aircraft parts in ice-sheet crevasse fields using airborne and in situ geophysical sensors. *Journal of Glaciology* 1-13, 496-508. doi:<https://doi.org/10.1017/jog.2020.26>
- Paterson, W. (1994). *The Physics of Glaciers* (3rd ed.).



Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

10 rue de Paris
Zone Sud - Bâtiment 153
Aéroport du Bourget
93352 Le Bourget Cedex - France
T : +33 1 49 92 72 00 - F : +33 1 49 92 72 03
www.bea.aero



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*