



RAPPORT TECHNIQUE

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**



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

www.bea.aero



NOTE DE SYNTHÈSE

À la suite à l'accident de l'Airbus A380, immatriculé F-HPJE, en croisière au-dessus du Groenland, survenu le 30 septembre 2017, le Bureau d'enquêtes Danois sur les accidents aériens (AIB D) a délégué au BEA l'ouverture et la réalisation de l'enquête de sécurité.

Le BEA représente la France, État de l'exploitant, État d'immatriculation et État de conception de l'aéronef. Des enquêteurs de l'AIB D, 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.

Quatre enquêteurs du BEA se sont rendus à Goose Bay le 1^{er} octobre, accompagnés de conseillers techniques d'Airbus et d'Air France. Des enquêteurs du NTSB, accompagnés de conseillers techniques du constructeur de moteurs Engine Alliance (une joint-venture entre General Electric et Pratt & Whitney), ainsi que des enquêteurs du BST, se sont également rendus sur place.

Un cinquième enquêteur du BEA s'est rendu à Ottawa pour assister à la première lecture de l'enregistreur phonique (CVR) et de l'enregistreur de paramètres (FDR).

L'Airbus A380-800, 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 09h30 (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 FL370, l'équipage de conduite s'est dérouté vers l'aéroport de Goose Bay (Canada), où il a atterri à 15h42 (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.

Cette zone s'est avérée être un terrain désert recouvert de glace, situé à environ 150 km au sud-est de la ville de Paamiut, sur la côte ouest du Groenland.

Le BEA a contacté son homologue danois immédiatement après l'accident pour effectuer une recherche visuelle et récupérer ces pièces.

Assez tôt dans l'enquête, il a été établi que la récupération des pièces manquantes, et en particulier des fragments de moyeu de soufflante, était un élément clé pour faire progresser l'enquête sur la cause de la défaillance du moteur.

Les opérations de recherche et de récupération des pièces tombées au sol s'annonçaient très difficiles, la zone étant reculée et les conditions météorologiques étant extrêmes presque toute l'année.

Peu de temps après l'événement, certaines pièces ont pu être repérées et récupérées, mais des chutes de neige ont empêché de nouveaux vols d'hélicoptères sur le site. La neige a fini par recouvrir toutes les pièces qui se trouvaient encore au sol, empêchant toute nouvelle détection visuelle.

D'autres moyens de détection ont alors dû être envisagés. Ces moyens devaient être compatibles avec les conditions propres à cette zone et avec toutes les contraintes opérationnelles associées.

Il n'est pas possible de se rendre dans cette région pendant l'hiver, dans la mesure où le niveau de sécurité (températures basses, journées courtes, météo changeante, présence de crevasses, etc.) est jugé insuffisant. Par conséquent, le printemps 2018 était la fenêtre la plus proche pour envisager les opérations de recherche et de récupération.

Après une phase d'évaluation de moyens de recherches, il a été décidé de mettre en place deux opérations consécutives :

- une campagne aérienne consistant à opérer des radars à synthèse d'ouverture à partir d'un avion, pour tenter de détecter et de localiser les pièces manquantes sur la calotte glaciaire sous la couche de neige ;
- une campagne terrestre consistant à récupérer les pièces localisées précédemment lors de la campagne aérienne ou à effectuer une recherche systématique à l'aide de géoradar en cas d'échec de la phase aérienne.

Pour faire face à ces défis, un sous-groupe dédié à la recherche et à la récupération (« Survey ») a été créé au sein du groupe Aéronef (voir la figure 1).

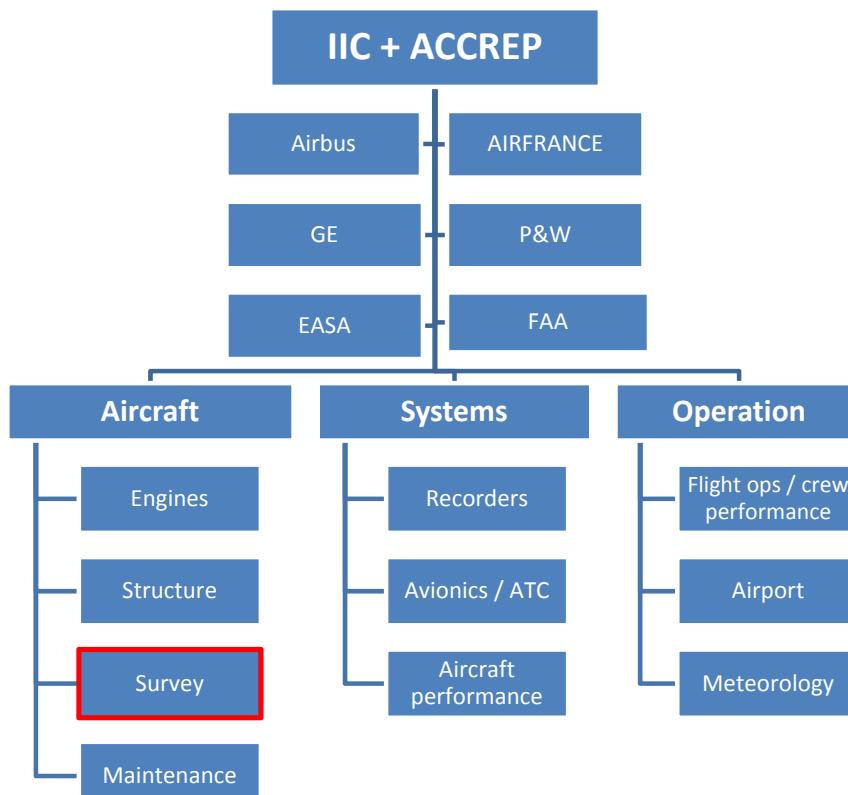


Figure 1 : organigramme de l'organisation de l'enquête

Le présent rapport a pour objectif de présenter les différentes étapes nécessaires à la préparation et la réalisation des opérations de recherche visant à récupérer les pièces du moteur. Ces étapes sont les suivantes (voir la figure 2) :

- Opérations de recherche
 - PHASE I : détermination approximative d'une zone de recherche juste après l'événement et récupération de toutes les pièces repérées visuellement dans la mesure du possible,
 - PHASE II : évaluation des moyens de recherche et déroulement des opérations de recherche (préparation et exécution).
- Définition de la zone de recherche (pour la PHASE II)
 - calculs balistiques,
 - simulation numérique de la défaillance du moteur.

Le présent rapport couvre la période allant de la date de l'accident jusqu'à la fin du mois de juin 2018.

Cette période englobe la Phase I (vols en hélicoptère pour récupérer les débris localisés juste après l'événement) et la Phase II (campagne aérienne et terrestre ainsi que leur préparation), voir la figure 2. En juin 2018, une réunion plénière s'est tenue avec toutes les parties pour faire le bilan des phases de recherche susmentionnées. La définition de la zone de recherche a progressé en parallèle, à l'aide de calculs balistiques et de simulations numériques. Les travaux futurs sont abordés dans le dernier chapitre.

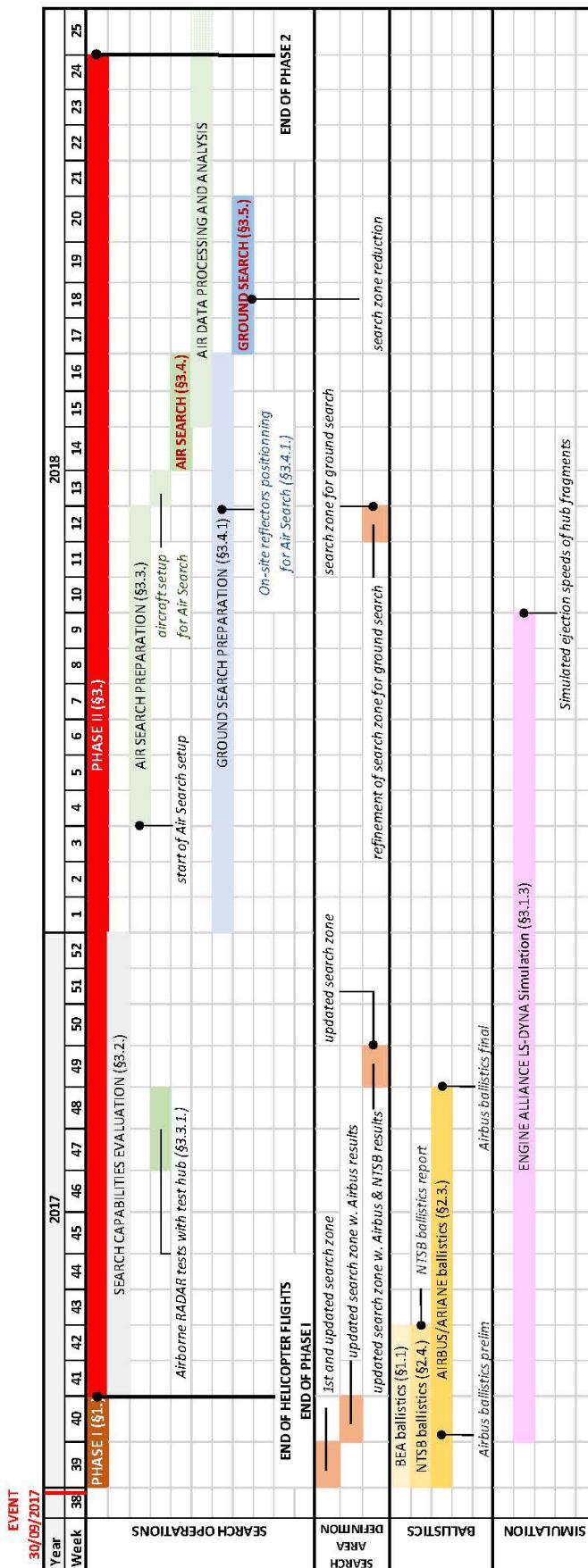


Figure 2 : calendrier des opérations de recherche, phase I et phase II, depuis la date de l'accident jusqu'à la fin juin 2018

NOTE DE SYNTHÈSE	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS	7
1 - PHASE I	11
1.1 Lieu de l'événement et premières actions de récupération	11
1.2 Imagerie par satellite	18
2.1 Données générales de calcul	19
2.2 Profondeur de pénétration des fragments de moyeu	22
2.3 Calcul balistique d'Airbus/Ariane	22
2.4 Calcul balistique du NTSB	25
2.5 Définition de la zone de recherche pour la Phase II	29
3 - PHASE II	30
3.1 Généralités	30
3.1.1 Objectifs	30
3.1.2 Environnement	30
3.1.3 Description des pièces manquantes	33
3.2 Capacités de recherche	34
3.2.1 Imagerie radar	34
3.2.2 Systèmes de détection électromagnétique	34
3.2.3 GPR utilisé depuis le ciel	35
3.2.4 GPR exploité au sol	36
3.2.5 SAR aéroporté	36
3.3 Mise en place de la campagne de recherche PHASE II	38
3.3.1 Détection : campagne de test de radar aéroportée	38
3.3.2 Comportement du SAR dans la neige et la glace	39
3.3.3 Récupération des pièces	40
3.3.4 Zone de recherche en cas d'échec de la recherche aéroportée	41
3.4 Opération GREENSAR	43
3.4.1 Préparation	43
3.4.2 Vol de validation (5 avril 2018)	46
3.4.3 Première série de vols de mesure (du 6 au 8 avril 2018)	47
3.4.4 Seconde série de vols de mesure (du 10 au 11 avril 2018)	50
3.4.5 Troisième série de vols de mesure (le 14 avril 2018)	54
3.5 Récupération dans le camp	57
3.5.1 Introduction	57
3.5.2 Avancement de la mission	59
3.5.3 Conditions météorologiques	66
3.5.4 État de la glace	67
4 - CONCLUSIONS	67
5 - POURSUITE DES TRAVAUX	68

TABLE DES ILLUSTRATIONS

<u>Figure 1 : organigramme de l'organisation de l'enquête</u>	3
<u>Figure 2 : calendrier des opérations de recherche, phase I et phase II, depuis la date de l'accident jusqu'à la fin juin 2018</u>	5
<u>Figure 3 : zones de recherche prioritaires et secondaires</u>	12
<u>Figure 4 : vue de la zone où les premiers débris ont été localisés - les lignes droites sont des empreintes de pas</u>	12
<u>Figure 5 : carte des débris localisés lors du premier vol en hélicoptère</u>	13
<u>Figure 6 : fragments de cloison et de carter de soufflante tels que retrouvés sur place (avec l'aimable autorisation d'Air Greenland/de l'AIB-D)</u>	14
<u>Figure 7 : partie de la lèvre d'entrée d'air photographiée sur place par un membre du personnel d'Air Greenland (avec l'aimable autorisation d'Air Greenland/de l'AIB-D)</u>	14
<u>Figure 8 : trajectoire du deuxième survol en hélicoptère de la zone de recherche</u>	15
<u>Figure 9 : trajectoire du troisième survol en hélicoptère de la zone de recherche</u>	15
<u>Figure 10 : cloison arrière de capot d'entrée d'air et fragment de carter de soufflante</u>	16
<u>Figure 11 : pièce d'entrée d'air</u>	16
<u>Figure 12 : partie de capot composite</u>	16
<u>Figure 13 : courroie en kevlar</u>	16
<u>Figure 14 : Image de la zone de recherche prise par le satellite Pléiades, datée du 11 octobre 2018</u>	18
<u>Figure 15 : détail de l'encadré rouge de la figure 14 - un pixel correspond à 50 cm sur 50 cm</u>	19
<u>Figure 16 : vue de face du moteur n° 4 sur l'aéronef après l'atterrissement</u>	21
<u>Figure 17 : vue latérale du moteur n° 4 sur l'aéronef après l'atterrissement</u>	21
<u>Figure 18 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 105 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)</u>	23
<u>Figure 19 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 50 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)</u>	23
<u>Figure 20 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 20 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)</u>	24
<u>Figure 21 : superposition des 3 vitesses d'éjection calculées pour 1/3 d'un moyeu de soufflante (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)</u>	24
<u>Figure 22 : calculs d'emplacement d'impact pour 2/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 0 et 105 m/s à 11 heures, et un rapport portance/traînée compris entre 0 et 5 % (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)</u>	24
<u>Figure 23 : zone de recherche retenue après le calcul d'Arianegroup. Les points bleu et jaune au nord correspondent à l'angle d'éjection à 3 heures, qui n'était pas compatible avec les dommages constatés sur le moteur. Les points rouge au sud correspondent à l'angle d'éjection à 9 heures (vers le fuselage), qui ne sont pas compatibles non plus</u>	25

<u>Figure 24 : lieu balistique en partant du principe d'un vent constant, sans angle d'éjection (avec l'aimable autorisation du NTSB)</u>	26
<u>Figure 25 : emplacement de fragment de moyen prédit par rapport à l'angle d'éloignement (courtesy of NTSB)</u>	27
<u>Figure 26 : effet de la plage de coefficients balistiques sur l'emplacement de moyeu prédit (avec l'aimable autorisation du NTSB)</u>	28
<u>Figure 27 : zones principales et secondaires du NTSB (avec l'aimable autorisation du NTSB)</u>	28
<u>Figure 28 : zone de recherche (encadré rouge) englobant le calcul balistique d'Ariane (1/3 et 2/3 de moyeu) et le calcul du NTSB</u>	29
<u>Figure 29 : récupération de débris sur la calotte glaciaire, octobre 2017. Avec l'aimable autorisation d'Air Greenland/de l'AIB-D</u>	30
<u>Figure 30 : schéma d'une calotte glaciaire (Edward Josberger)</u>	31
<u>Figure 31 : zoom sur la zone d'accumulation de la calotte glaciaire au Groenland (Benson, 1962) (Paterson, 1994)</u>	31
<u>Figure 32 : carte de la vitesse d'écoulement des glaces(5) (Joughin I. B., 2015, mise à jour en 2018) (Joughin I. B., 2010) plage de vitesses en m/an - les vitesses réelles peuvent atteindre 3 000 m/an</u>	32
<u>Figure 33 : exemple de moyeu de soufflante intact (image de gauche) - pièce récupérée sur le F HPJE (en couleur, image de droite)</u>	33
<u>Figure 34 : Simulation de défaillance de moyeu de soufflante LS-Dyna (avec l'aimable autorisation d'Engine Alliance)</u>	33
<u>Figure 35 : exemple d'utilisation de l'EM31-MK2 en présence de glace</u>	34
<u>Figure 36 : Système radar Hera-G (RST) exploité par hélicoptère</u>	35
<u>Figure 37 : Falcon 20 F-GPAA de la société AVDEF</u>	36
<u>Figure 38 : Radar UHF intégré au fuseau de gauche</u>	37
<u>Figure 39 : Charge utile de radar en bande X (droite) et bande L (gauche) intégrée au fuseau de droite</u>	37
<u>Figure 40 : schéma de paramètres de radar à visée latérale</u>	38
<u>Figure 41 : moyeu de soufflante et aube de soufflante sur l'aéroport de Nîmes-Garons pour les tests de détection</u>	39
<u>Figure 42 : images en bande L, cap de vol 270°, polarisation totale, angle de dépression 45°, résolution 90 cm x 90 cm</u>	39
<u>Figure 43 : zones de recherche principales (bleu foncé et rouge foncé, 0,5 km2 chacune), définies fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée</u>	42
<u>Figure 44: zone de recherche secondaire (orange, 0,93 km2), définie fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée</u>	42
<u>Figure 45 : zone de recherche tertiaire (vert clair, 6,35 km2), définie fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée</u>	42
<u>Figure 46 : trièdre et sphère dans leur caisse de transport</u>	43
<u>Figure 47 : membre de la GEUS enfouissant la sphère de Luneburg sur la calotte glaciaire</u>	44
<u>Figure 48 : partie d'une maquette de moyeu de soufflante sur sa luge, appelée ci-après « moyeu de test » (photo de gauche), et une fois enfouie (image de droite)</u>	44

<u>Figure 49 : position des réflecteurs et des objets de référence par rapport à la zone de recherche (en rouge, définie au paragraphe 3.3.4)</u>	45
<u>Figure 50 : point de l'événement comparé aux emplacements de Kangerlussuaq et Narsarsuaq - Nuuk est la capitale et la plus grande ville du Groenland, mais son aéroport ne mesure que 950 m de long</u>	46
<u>Figure 51 : position du trièdre</u>	46
<u>Figure 52 : imagerie radar en bande X de la région de Kangerlussuaq</u>	47
<u>Figure 53 : passages de mesure en bande X - trajectoire de l'aéronef (vol aller)</u>	48
<u>Figure 54 : couverture en bande X des six passages de mesure (vol aller)</u>	48
<u>Figure 55 : passages de mesure en bande L et UHF (P) - trajectoire de l'aéronef (vol retour)</u>	49
<u>Figure 56 : couverture en bande L et UHF (P) des trois passages de mesure (vol retour)</u>	49
<u>Figure 57 : zone de recherche avec crevasses vue avec la bande P</u>	50
<u>Figure 58 : premier vol de la série (SFJ-UAK) : cinq passages avec la bande UHF (P) et L</u>	51
<u>Figure 59 : Couverture en bandes UHF(P) et L, deuxième série de vols</u>	51
<u>Figure 60 : deuxième vol de la série (UAK-UAK), six passages avec bande X - trajectoire de l'aéronef</u>	52
<u>Figure 61 : couverture en bande X, deuxième vol de la série</u>	52
<u>Figure 62 : prévisions météorologiques du 11 avril, mises à jour le matin même</u>	52
<u>Figure 63 : troisième vol de la série, étalonnage au-dessus de Kangerlussuaq</u>	53
<u>Figure 64 : trajectoire du premier vol pour les mesures interférométriques</u>	54
<u>Figure 65 : couverture en bandes UHF(P) et L et première trajectoire de vol pour les mesures interférométriques</u>	55
<u>Figure 66 : trajectoire du deuxième vol pour les mesures interférométriques</u>	55
<u>Figure 67 : couverture en bandes UHF(P) et L et trajectoire du deuxième vol pour les mesures interférométriques</u>	56
<u>Figure 68 : Falcon 20 Avdef équipé de ses deux fuseaux radar, de retour à l'aéroport de Kangerlussuaq</u>	56
<u>Figure 69 : points potentiels dans la zone de recherche, analysés plus avant pour confirmation et établissement de leur pertinence</u>	57
<u>Figure 70 : cibles identifiées par l'ONERA, communiquées à l'équipe GEUS. L'image d'arrière-plan est une image radar fournie par l'ONERA à partir de la campagne de mesure, montrant des champs de crevasses bien marqués</u>	58

<u>Figure 71 : camp de récupération - tente de couchage (premier plan), tente de cuisine et scientifique (arrière-plan) - des drapeaux sont utilisés pour s'orienter en cas de voile blanc (références photographiques : GEUS)</u>	60
<u>Figure 72 : échantillons de neige pour la mesure de la densité (références photographiques : GEUS)</u>	60
<u>Figure 73 : trace du moyeu de test sur l'imagerie GPR</u>	61
<u>Figure 74 : balayage en quadrillage dense</u>	62
<u>Figure 75 : zones de recherche initiales</u>	63
<u>Figure 76 : zones de recherche affinées</u>	63
<u>Figure 77 : couverture de recherche au sol (en violet) par l'équipe GEUS - l'arrière-plan est une image radar en bande P</u>	65
<u>Figure 78 : visibilité dans le camp lors d'une tempête de neige avec un vent violent - Références photographiques : GEUS</u>	67

1 - PHASE I

1.1 Lieu de l'événement et premières actions de récupération

Le 2 octobre 2017, l'AIB-D a délégué l'enquête au BEA. La position estimée de l'événement a été rapidement demandée afin d'organiser les opérations de recherche et de récupération sur la calotte glaciaire au Groenland, dans la mesure où les conditions météorologiques à cette période de l'année peuvent être particulièrement difficiles, avec des températures très basses et des chutes de neige. Par conséquent, il était nécessaire de lancer les opérations de récupération assez rapidement afin de pouvoir récupérer les pièces avant d'éventuelles chutes de neige.

Les coordonnées de la localisation de la séparation de la soufflante du moteur ont d'abord été fournies par le groupe « Systèmes » à partir des données IRS (Inertial Reference System). L'heure UTC exacte de l'événement a également été définie à partir des données FDR, et l'horodatage a été déterminé d'un commun accord à 13:49:18.506 sur la base de l'heure UTC enregistrée. Le facteur déclencheur retenu pour l'événement a été le premier pic d'accélération latérale.

Aucun radar primaire n'est présent dans cette région, ce qui aurait pu aider à déterminer les trajectoires des pièces éjectées.

Étant donné que le but de la recherche de la Phase I était d'aller aussi vite que possible, aucune interpolation n'a été effectuée sur la base des paramètres enregistrés. Les informations suivantes ont été transmises au bureau d'enquête danois (AIB D).

**61°44'21.91''N / 46°49'1.30''W at 13:49⁽¹⁾
avec une route vraie estimée de l'aéronef : 245°**

Les zones de recherche prioritaires et secondaires ont été déterminées en première approximation par le BEA à partir de calculs balistiques de base : la distance parcourue a été estimée en considérant les pièces comme des balles sans traînée se détachant à une altitude de 37 000 ft et à une vitesse initiale de 244 m/s.

La zone prioritaire s'étendait sur une superficie de 115 km² et est représentée en rouge à la figure 3. La zone secondaire s'étendait sur une superficie d'environ 200 km² et est également représentée à la figure 3, en jaune.

La forme conique des zones de recherche a été déterminée de façon arbitraire. Elles prennent en compte les incertitudes liées à l'angle d'éjection inconnu des pièces lorsqu'elles se sont détachées du moteur.

Les données ont été communiquées à l'AIB-D le 4 octobre dans la matinée et, l'après-midi, l'AIB-D a redirigé vers la zone définie un hélicoptère qui réalisait un vol scientifique d'étude des glaces. Certaines pièces ont rapidement pu être identifiées visuellement sur la calotte glaciaire et récupérées par l'équipage de l'hélicoptère. Quinze fragments d'aube de soufflante et certaines pièces composites du capot moteur ont été récupérés ce jour-là.

⁽¹⁾Sauf indication contraire, toutes les coordonnées GPS sont indiquées selon le système géodésique WGS-84 et l'heure est l'heure standard UTC (heure universelle coordonnée).

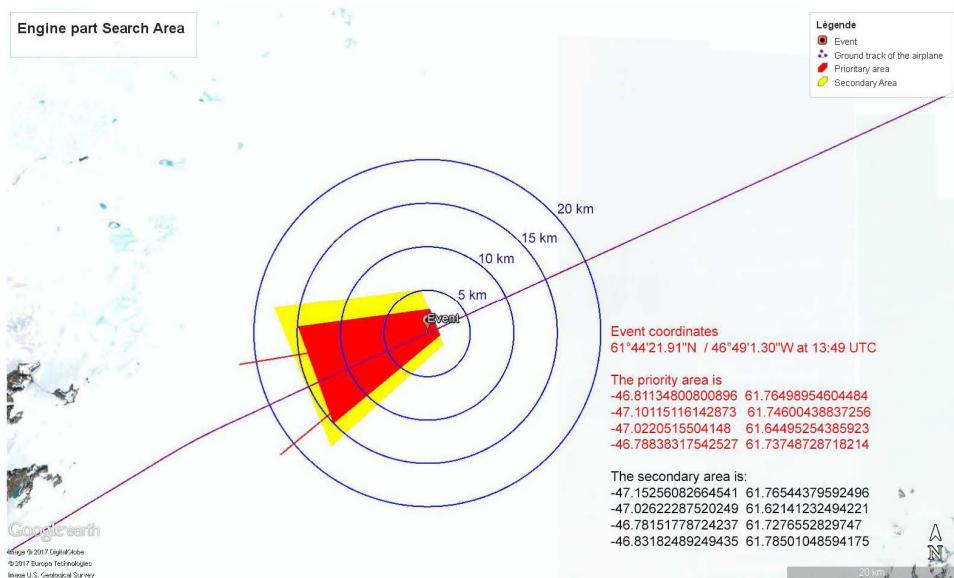


Figure 3 : zones de recherche **prioritaire** et **secondaire**



Figure 4 : vue de la zone où les premiers débris ont été localisés - les lignes droites sont des empreintes de pas

Le 5 octobre, la trajectoire du vol AF066 a été analysée, ce qui a permis de corriger le point de l'événement, en le déplaçant à 500 m au nord de sa position précédente. Ceci s'explique notamment par le fait que la trajectoire IRS (à partir de laquelle la position de l'événement a été déterminée au départ) était décalée par rapport à la position des pistes. Ce décalage a été identifié sur les pistes des aéroports de décollage et d'atterrissement (Paris - Charles-de-Gaulle et Goose Bay). Étant donné que la position FMS est calculée à partir de l'IRS et du GPS, le BEA a décidé de ne pas utiliser la position FMS (Flight Management System) comme deuxième source pour localiser le point d'événement. Il a été décidé d'utiliser à la place la position GPS.

Par conséquent, la trajectoire GPS a été adoptée, dans la mesure où elle ne présentait aucun décalage par rapport aux pistes des aéroports. La position GPS à 13:49:19.557 UTC était :

N61°44'43.544", W046°48'59.724" at 13:49:18.557

Cela a entraîné un déplacement du point d'événement de 500 m vers le nord et un léger déplacement vers l'est.

Le même jour, le BEA a reçu les premières images des débris envoyées par l'AIB-D. Les débris se composaient de fragments d'aubes de soufflante, de cône d'hélice, de nid d'abeilles, de pylône, de l'entrée d'air, de cloison de nacelle et de la ceinture de rétention en kevlar du carter de soufflante. Une carte des débris a également été fournie (voir la figure 5). Des exemples de débris sont illustrés aux figures 6 et 7.

Les informations recueillies par l'équipe d'enquête travaillant sur l'aéronef endommagé à Goose Bay l'ont amenée à considérer le moyeu de soufflante du moteur comme une pièce à récupérer en priorité, afin de faire progresser l'enquête de sécurité. Ces informations ont été transmises à l'AIB-D dès qu'elles ont été reçues. Aucun fragment de moyeu de soufflante n'a été repéré ni récupéré lors du premier vol.

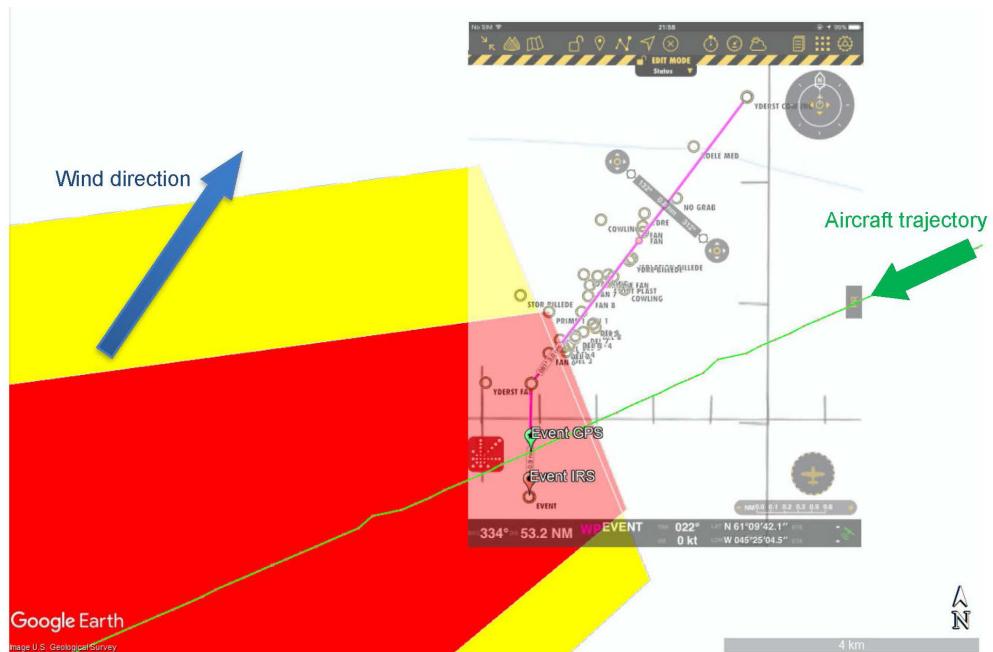




Figure 6: fragments de cloison et de carter de soufflante tels que retrouvés sur place
(Crédit photo : Air Greenland/de l'AIB-D)



Figure 7 : partie de la lèvre d'entrée d'air photographiée sur place par un membre du personnel d'Air Greenland (Crédit photo : Air Greenland/AIB-D)

Le premier vol en hélicoptère a eu lieu le 4 octobre et, jusqu'au 8 octobre, les conditions météorologiques n'ont pas permis de réaliser d'autre vol. Les conditions météorologiques se sont améliorées par la suite et, le 8 octobre, elles étaient suffisamment favorables pour permettre un deuxième survol de la zone de recherche. Sa trajectoire est illustrée à la figure 8. Ce vol a permis la découverte d'un autre fragment d'aube. En revanche, aucun fragment de moyeu de soufflante n'a été trouvé.

Le 11 octobre, un dernier vol en hélicoptère a été effectué au-dessus de la zone, mais n'a permis aucune nouvelle découverte. La trajectoire de ce dernier vol en hélicoptère est illustrée à la figure 9.

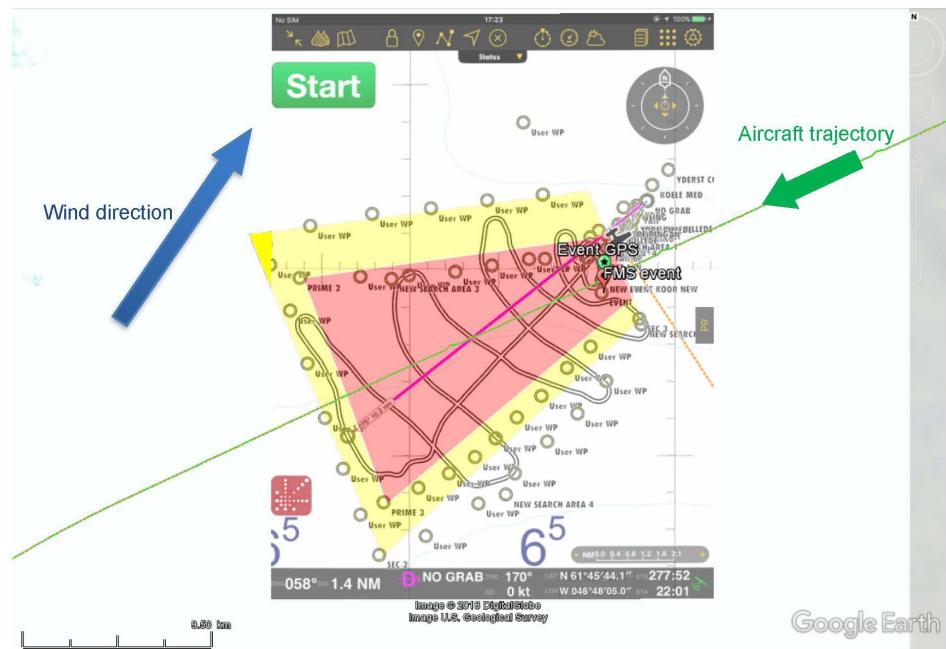


Figure 8 : trajectoire du deuxième survol en hélicoptère de la zone de recherche

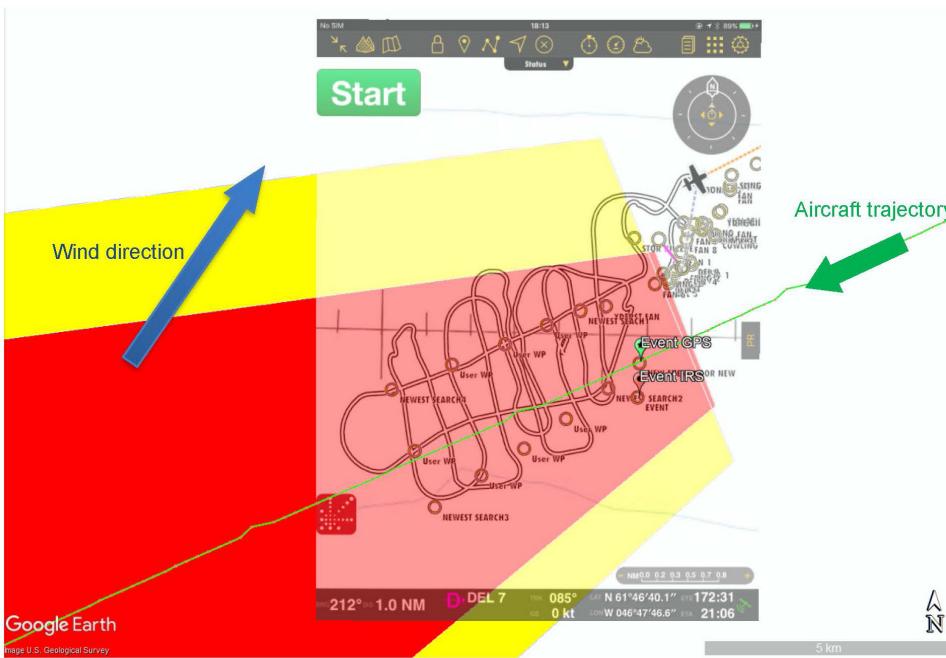


Figure 9 : trajectoire du troisième survol en hélicoptère de la zone de recherche

Dans la mesure où les chutes de neige et le vent avaient probablement recouvert de neige les pièces restantes à ce moment-là et ne permettaient plus de nouvelles détections visuelles des pièces qui se trouvaient toujours dans la zone, il a été jugé inutile de procéder à un autre vol. La décision a été prise de mettre fin à la Phase I. D'autres méthodes devaient alors être explorées afin de localiser et de récupérer les pièces manquantes, la priorité étant donnée aux fragments de moyeu de soufflante.

Les plus petites pièces récupérées lors des trois vols d'inspection visuelle ont été transportées à l'aéroport de Narsarsuaq. Elles ont été entreposées dans un hangar chauffé et sécurisé. Le 12 octobre, des vols spécifiques ont été nécessaires pour hélitreuiller les plus grandes pièces jusqu'à l'aéroport de Narsarsuaq.

Au total, 30 pièces ont été récupérées. Un marquage GPS précis a été réalisé pour certaines des plus grandes pièces :

- N° 1 : Fragments de cloison et de carter de soufflante : N61°45'40,1 W046°48'29,4 (figure 10)
- N° 2 : Pièce d'entrée d'air : N61°45'46,1 W046°47'52,2 (figure 11)
- N° 3 : Partie du capot composite : N61°45'34,2 W046°48'22,6 (figure 12)
- N° 4 : Ceinture en kevlar : N61°46'08,9 W046°47'40,4 (figure 13)

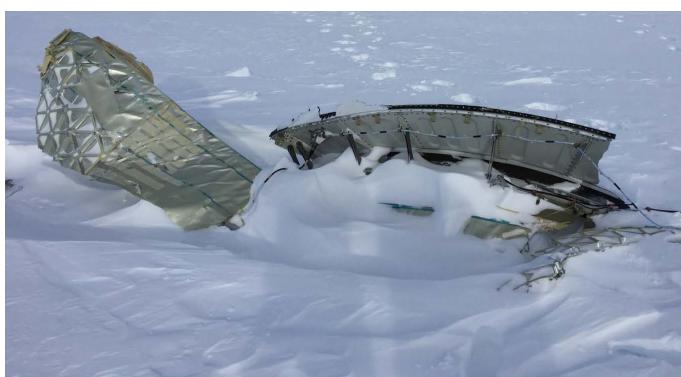


Figure 10 : cloison arrière de capot d'entrée d'air et fragment de carter de soufflante



Figure 11 : pièce d'entrée d'air



Figure 12 : partie de capot compositel



Fig. 13: ceinture en kevlar

Un relevé GPS a été effectué pour toutes les autres pièces (voir la figure 5), mais il n'était pas possible de savoir quelle pièce correspondait à quelle coordonnée GPS. Les pilotes d'Air Greenland ont également déclaré que certaines pièces ont été photographiées et qu'un marquage GPS a été réalisé, mais qu'elles n'ont finalement pas été récupérées. Il convient de noter que toutes les pièces récupérées ont été retrouvées en amont du point d'événement, tandis que la zone de recherche, principalement dédiée à la recherche de fragments de moyeu de soufflante, a été définie en aval du point événement. Ceci s'explique par le fait que les pièces récupérées étaient principalement des pièces légères (pièces composites, parties de la nacelle, aubes de soufflante). Ces pièces ont été emportées par le vent (la direction du vent est indiquée aux figures 5, 8 et 9). Cela n'a pas conduit à redéfinir la zone de recherche, dans la mesure où les fragments de moyeu de soufflante ont probablement un coefficient balistique supérieur à celui des pièces récupérées, en raison de leur taille, de leur masse et de leur forme.

Les pièces qui pouvaient être transportées par voie aérienne ont été envoyées par l'AIB-D au BEA le 12 octobre. Elles ont été reçues au siège du BEA le 25 octobre.

Les autres pièces, trop volumineuses pour être transportées par voie aérienne, ont été expédiées par bateau le 22 octobre de Narsarsuaq à Aalborg (Danemark), puis acheminées par camion jusqu'au BEA. Elles ont été reçues au siège du BEA le 12 décembre.

1.2 Imagerie par satellite

Lancée en décembre 2011, la constellation Pléiades se compose de deux satellites optiques à très haute résolution pour l'acquisition d'images de la Terre. Pléiades-HR 1A et Pléiades-HR 1B couvrent la surface de la Terre avec un cycle orbital répété de 26 jours et une accessibilité quotidienne à n'importe quel point de la surface de la Terre. Conçu comme un système à la fois civil et militaire, Pléiades répond aux exigences de la défense européenne en matière d'imagerie spatiale ainsi qu'aux besoins civils et commerciaux.

Airbus est partenaire de ce projet mené par le CNES (Centre national d'études spatiales).

Airbus a déployé ces satellites pour acquérir des images de la zone de recherche juste après l'événement. Les premières images étaient inexploitables à cause du plafond nuageux et les premières images de Pléiades utilisables sont datées des 11 et 14 octobre, l'événement s'étant produit le 30 septembre. En effet, pour obtenir des images exploitables, deux conditions doivent être réunies : la constellation de satellites doit passer au-dessus de la zone de recherche, pendant la journée, et la météo doit être suffisamment clémente pour que le sol puisse être visible (absence de nuage).

Toutefois, compte tenu des chutes de neige et du vent dans la zone de recherche juste après l'événement, la probabilité de pouvoir voir un débris sur les images satellites disponibles à la première de ces dates (le 11 octobre) était très mince. De plus, la dimension des pièces d'intérêt (fragments de moyeu de soufflante) est inférieure à un mètre, alors que la taille de pixel de l'image satellite est de 50 cm (la meilleure résolution possible est de 50 cm).

Les images du 11 octobre ont été examinées sans qu'aucune découverte n'ait pu être réalisée. Le seul élément repéré est illustré à la figure 14. Il correspondait à un hélicoptère, probablement un AS350 d'Air Greenland, qui était sur place ce jour-là pour récupérer des pièces. On peut distinguer ce qui semble être un homme debout près de débris, au sud de l'hélicoptère (figure 15).

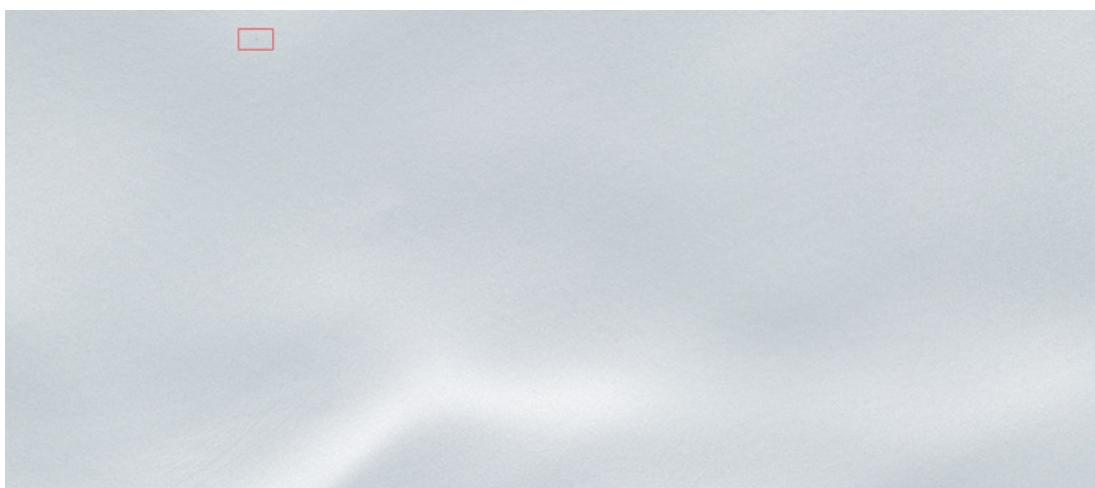


Figure 14 : Image de la zone de recherche prise par le satellite Pléiades, datée du 11 octobre 2018



Figure 15 : détail de l'encadré rouge de la figure 14 - un pixel correspond à 50 cm sur 50 cm

2 - CALCUL DE LA ZONE DE RECHERCHE

2.1 Hypothèses de calcul

Une fois la première phase de recherche et de récupération terminée, il manquait encore certaines pièces d'intérêt. Les fragments de moyeu de soufflante qui s'étaient détachés n'avaient notamment pas été récupérés au cours de la phase I.

L'observation des dommages sur le moteur a amené l'équipe à envisager une défaillance du moyeu de soufflante comme scénario probable. De plus, un fragment de moyeu, toujours attaché au moteur, présentait des surfaces de rupture. Ces surfaces de rupture ont été examinées en détail et étaient compatibles avec une rupture par surcharge. Par conséquent, il était particulièrement important d'essayer de récupérer les autres fragments de moyeu de soufflante, sur lesquels l'origine de la défaillance du moyeu pourrait probablement être localisée.

Afin de mettre en place une seconde phase de recherche et de récupération des pièces manquantes (appelée par la suite Phase II dans le présent rapport), il était nécessaire de déterminer une zone de recherche limitée dans laquelle la probabilité de présence des fragments de moyeu de soufflante soit élevée.

Plusieurs calculs ont été effectués avec les informations suivantes⁽²⁾:

⁽²⁾Valeurs FDR enregistrées à 13:49:18.557.

Données de l'événement :

- Coordonnées de l'événement (détachement de la soufflante) c'est-à-dire point de départ du calcul : N61.745429 ; W46.81659 (position GPS enregistrée à 13:49:18.557)
- Altitude-pression de l'événement : 37 076 pieds
- Vitesse vraie : 483 nœuds
- Cap vrai : 243°
- Altitude du sol : 1 842 m

Vent :

Les informations relatives au vent le jour de l'événement ont été demandées à Météo France. Elles sont présentées dans le tableau 1.

Niveau (x 100 pieds)	Vitesse (nœuds)	Direction
370	27	214°
200	20	214°
150	15	210°
100	10	200°
50	5	180°

Tableau 1 : informations relatives au vent le jour de l'événement

Caractéristiques des fragments :

Une rupture de disque produit généralement deux ou trois fragments principaux.

D'après les dommages observés sur le moteur, deux zones présentaient des dommages significatifs compatibles avec l'éjection de fragments de moyeu de soufflante. L'un était situé à 11 heures sur le moteur, vu de l'arrière vers l'avant, l'autre à 5 heures (voir les figures 16 et 17).

Ces positions ont été considérées comme les angles de sortie les plus probables des fragments de moyeu de soufflante pour le calcul de la zone de recherche. L'équipe d'enquête a conclu à l'existence de deux fragments principaux et peut-être d'un troisième plus petit.

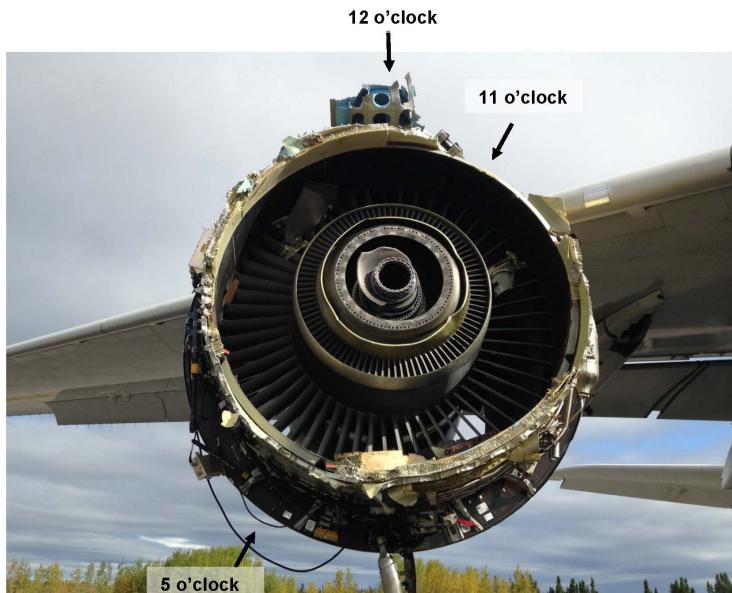


Figure 16 : vue de face du moteur n° 4 sur l'aéronef après l'atterrissement

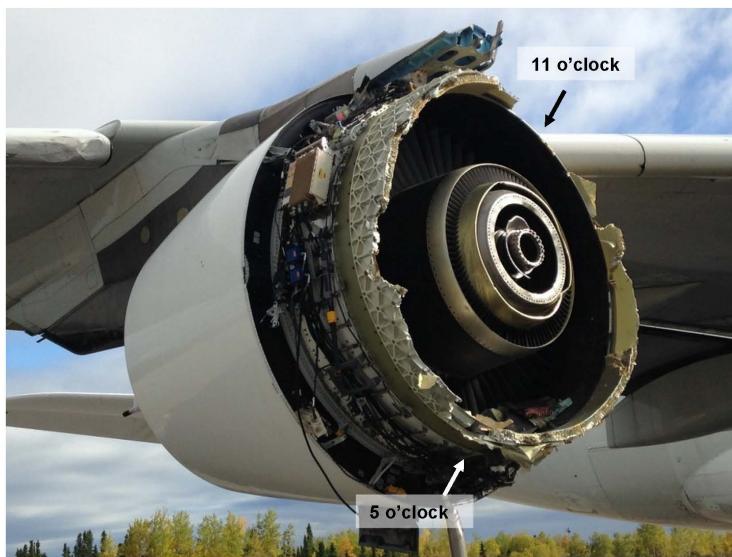


Figure 17 : vue latérale du moteur n° 4 sur l'aéronef après l'atterrissement

La dimension et le poids des fragments demeuraient inconnus, et l'on ne savait pas non plus si des aubes de soufflante étaient toujours fixées ou non à ceux-ci.

Les observations ci-dessus ont conduit à la prise en compte de fragments de 1/3 et 2/3 d'un moyeu de soufflante pour le calcul balistique.

Un tiers d'un rotor de soufflante avec aubes, plateformes et câles présente une masse de 186 kg (410 livres) et son centre de gravité est situé à un rayon de 584 mm (23,0 pouces) de son axe de rotation.

Un tiers d'un rotor de soufflante présente une masse de 73 kg (160 livres) et son centre de gravité est situé à 343 mm (13,5 pouces) de son axe de rotation.

La vitesse de rotation du moyeu au moment de l'événement (environ 107 % de N1) était de 2 638 tr/min.

2.2 Profondeur de pénétration des fragments de moyeu

Dès le début de l'enquête, l'AIB D a impliqué l'Institut de Géophysique du Danemark et du Groenland⁽³⁾ (GEUS) dans les discussions, dans la mesure où celui-ci connaissait parfaitement les défis associés à l'environnement du site. Dans le cadre de sa participation, il a effectué une analyse d'ordre de grandeur afin d'essayer de déterminer la profondeur d'impact d'un fragment de moyeu.

Le système peut être modélisé comme un problème de transfert de quantité de mouvement. Le fragment de moyeu de soufflante s'arrêtera lorsqu'il aura transféré toute sa quantité de mouvement à la surface du Groenland. En première approximation, ce transfert de quantité de mouvement sera terminé une fois que le fragment de moyeu aura déplacé une masse égale à sa propre masse (cela suppose que l'éjecta se déplace à la même vitesse que l'objet entrant). En réalité, la neige n'est pas déplacée mais probablement compactée. Puisque cela a pour effet d'augmenter la densité de la neige, cela réduirait probablement la profondeur d'impact par rapport aux valeurs calculées ici.

La hauteur d'un cylindre de neige dont la masse est égale à celle du fragment de moyeu de soufflante peut être déduite comme suit

$$z = \frac{m_{hub}}{\pi r^2 d_{snow}}$$

Où z est la profondeur d'impact du moyeu, m sa masse, r son rayon et d la densité de la neige. La densité de la neige a un ordre de grandeur de 500 kg/m³. Avec un cylindre de 75 cm de diamètre pesant 225 kg, l'on obtient une profondeur de 1 m. En faisant des hypothèses concernant les pièces de plus petite taille, l'on obtient des profondeurs moindres. À celles-ci, il convient d'ajouter la quantité de neige qui est tombée, soit de 1 à 2 m après une saison d'hiver complète.

La profondeur totale des fragments dans le sol devrait donc être raisonnablement de 2 à 3 m après une saison d'hiver, c'est-à-dire au printemps 2018.

Cette approche a été testée avec le poids et les dimensions des bombes de la Seconde Guerre mondiale, la masse volumique apparente du sol et la profondeur à laquelle elles ont été retrouvées à partir d'articles de journaux récents, et elle semble produire d'assez bons résultats dans ces scénarios.

2.3 Calcul balistique d'Airbus/Ariane

Airbus a profité de l'expertise d'Ariane Group dans le calcul des trajectoires balistiques des débris de lanceurs. Son approche a consisté à examiner l'angle de la trajectoire de sortie des fragments de moyeu de soufflante sur le moteur. Le coefficient de portance et la vitesse des pièces éjectées ont été considérés comme des paramètres influents.

Les vitesses de sortie retenues pour le calcul étaient de 20, 50 et 105 m/s. La vitesse de 105 m/s est la vitesse définie conformément à l'AMC 20 128A⁽⁴⁾ pour un tiers d'un disque. Les vitesses de 20 et 50 m/s sont des vitesses arbitraires permettant de prendre en compte une perte de vitesse lors de la pénétration du carter de soufflante.

La vitesse de sortie maximale a été déduite des caractéristiques du moyeu et de la vitesse de rotation du moteur au moment de l'événement. Elle n'a pris en compte aucune perte d'énergie due à la collision avec d'autres parties de l'aéronef.

⁽³⁾Voir le site <http://www.eng.geus.dk/> pour plus d'informations.

⁽⁴⁾Le moyen acceptable de conformité AMC 20 128A énonce une méthode de conformité aux exigences des normes CS 23.901(f), 23.903(b) (1), 25.903(d)(1) et 25A903(d)(1) des spécifications d'homologation (SH) de l'AESA se rapportant à la définition de précautions prises pour réduire au maximum les risques pour un avion en cas de pannes non maîtrisées de rotor de moteur ou de générateur auxiliaire de bord (APU). Les directives fournies dans cet AMC sont harmonisées avec celles de la Federal Aviation Administration (FAA) et visent à offrir une méthode de conformité jugée acceptable. Comme tous documents AMC, il ne revêt pas un caractère obligatoire et ne constitue pas un règlement. Considérations de conception pour réduire au maximum les risques liés à une panne non maîtrisée de rotor de moteur à turbine et de générateur auxiliaire de bord.

Toutes les trajectoires radiales ont été calculées au lieu de se limiter à un ou deux angles d'éjection radiale uniquement.

Pour chaque condition, 500 points d'impact ont été calculés, en dispersant de manière uniforme le coefficient balistique et le rapport portance/traînée (0 à 2 %) du fragment.

Les figures 18 à 21 montrent la distribution des résultats en fonction de l'angle d'éjection, de la vitesse et du rapport portance/traînée, pour un fragment de 1/3 de moyeu. Les angles d'éjection sont présentés en différentes couleurs : jaune pour les positions de 5 à 9 heures, vu de l'arrière vers l'avant, bleu pour les positions de 9 à 1 heures (9 à 12 puis 12 à 1) et rouge pour les positions de 1 à 5 heures. La figure 21 est une superposition de toutes les vitesses d'éjection calculées.

Des calculs ont également été effectués pour un fragment de 2/3 d'un moyeu de soufflante sortant du moteur à 11 heures, vu de l'arrière vers l'avant, avec une vitesse d'éjection de 0 et 105 m/s et un rapport portance/traînée de 0 à 5 %. Les points calculés sont illustrés à la figure 22.

Il ressort des calculs qu'un fragment plus volumineux (2/3 d'un moyeu de soufflante par exemple) tombera plus à l'ouest qu'un fragment de plus petite taille ayant le même rapport portance/traînée.

La surface de recherche en résultant, représentée en rouge à la figure 23, englobe les résultats de calcul pour 1/3 et 2/3 d'un moyeu de soufflante et s'étend sur 8,3 km². Elle a été définie en considérant qu'un angle d'éjection à 3 heures n'était pas compatible avec les dommages observés sur le moteur. De la même manière, aucun dommage n'a été observé sur le fuselage, de sorte qu'un angle d'éjection de 9 heures était très peu probable. Par conséquent, la partie nord des points bleu et jaune ainsi que la partie sud des points rouges ont été éliminées.

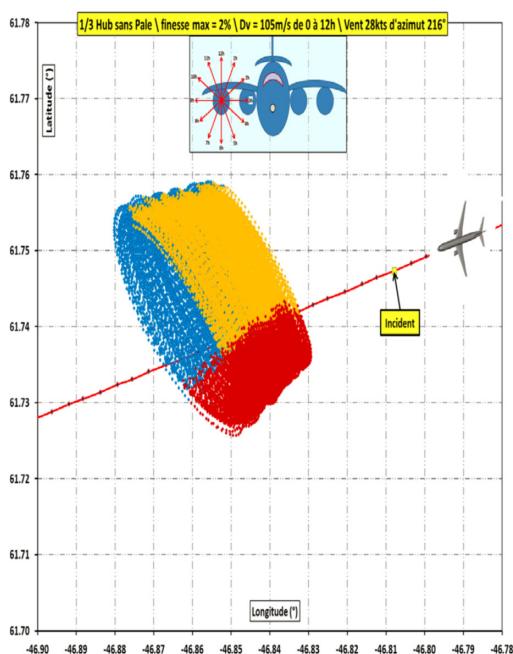


Figure 18 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 105 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)

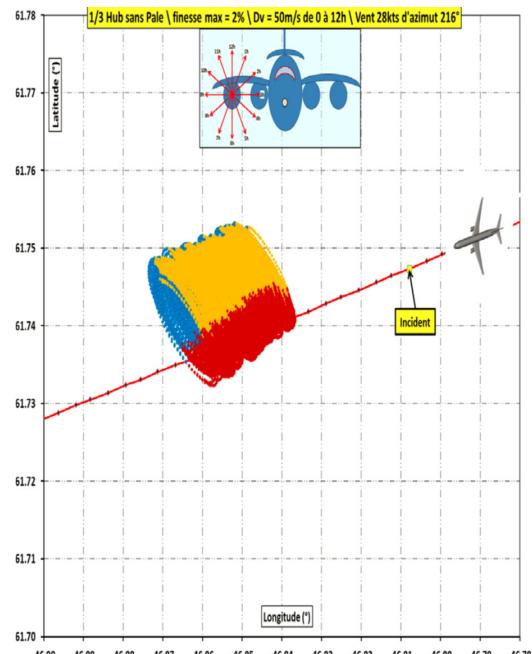


Figure 19 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 50 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)

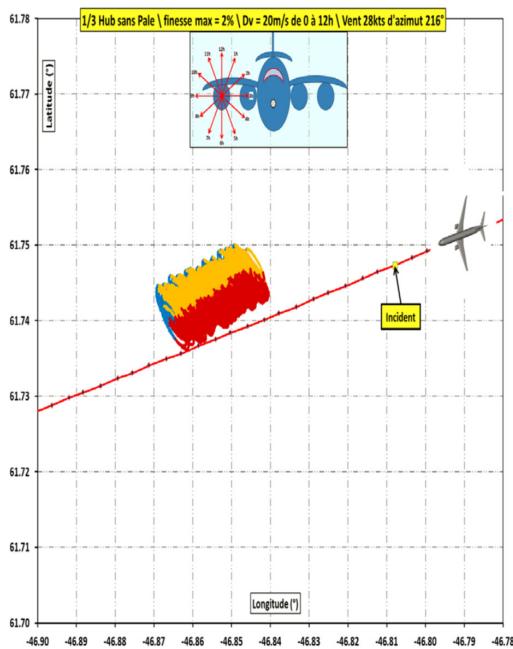


Figure 20 : 1/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 20 m/s (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)

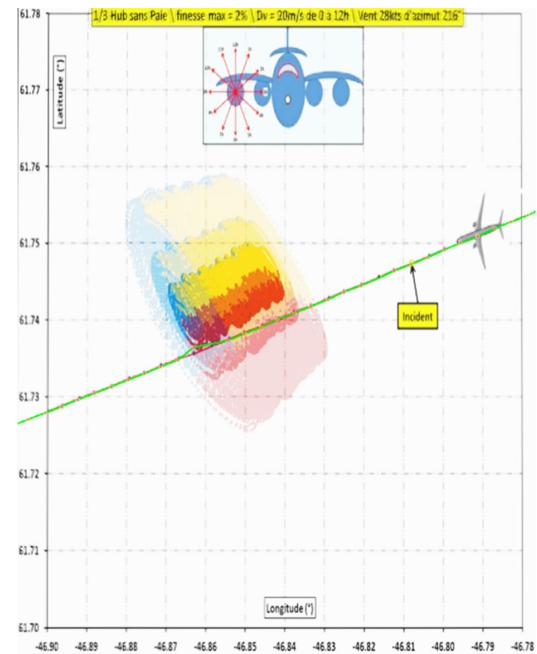


Figure 21 : superposition des 3 vitesses d'éjection calculées pour 1/3 d'un moyeu de soufflante (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)

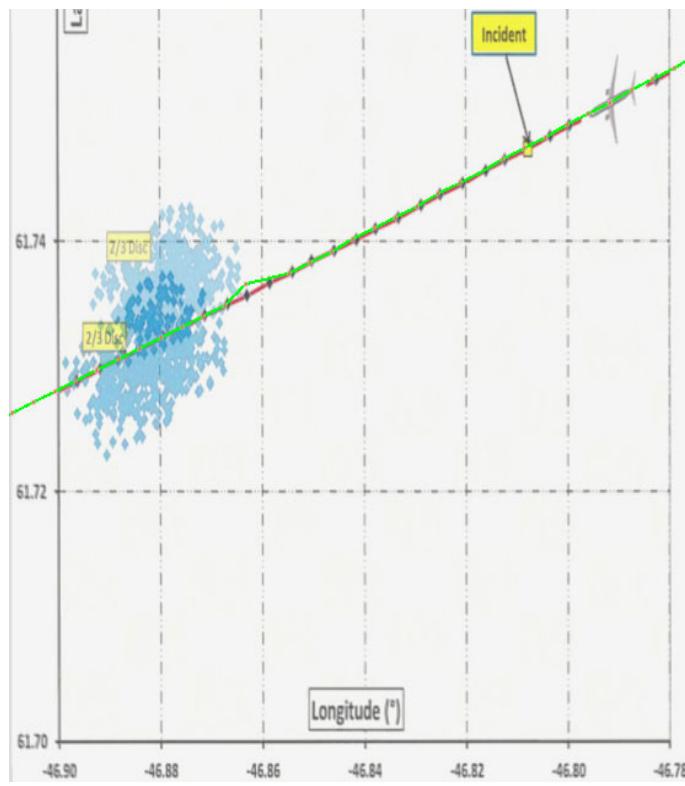


Figure 22 : calculs de la localisation d'impact pour 2/3 d'un moyeu de soufflante avec une vitesse d'éjection de 0 et 105 m/s à 11 heures, et un rapport portance/traînée compris entre 0 et 5 % (avec l'aimable autorisation d'Arianegroup)

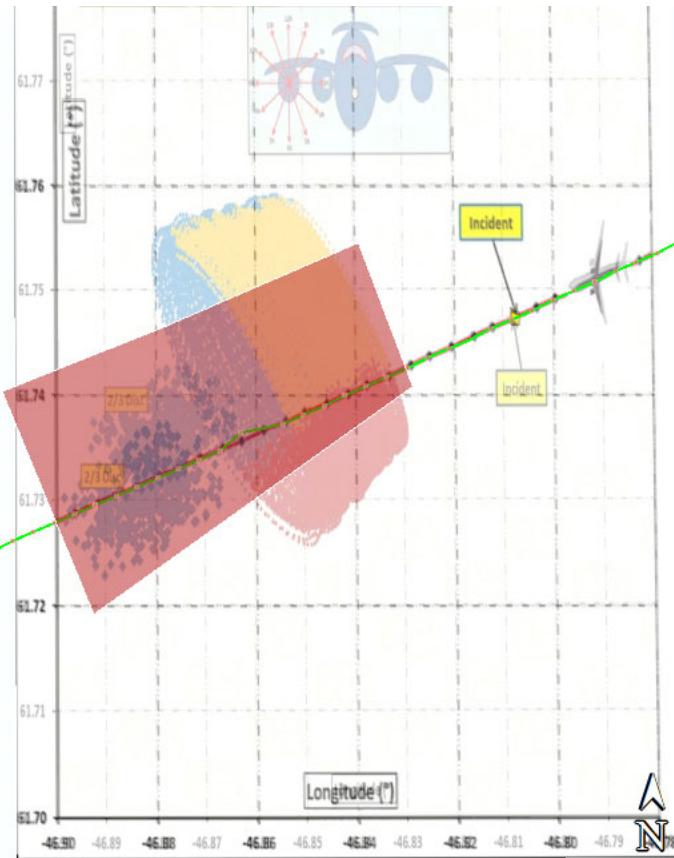


Figure 23 : zone de recherche retenue après le calcul d'Arianegroup. La partie nord des points bleus et jaunes correspond à l'angle d'éjection à 3 heures, qui n'était pas cohérente avec les dommages constatés sur le moteur. La partie sud des points rouges correspond à l'angle d'éjection à 9 heures (vers le fuselage), qui n'est pas non plus cohérente

2.4 Calcul balistique du NTSB

Si l'on connaît le coefficient balistique exact d'un objet, les conditions initiales exactes et les conditions atmosphériques, il est possible de prédire exactement où cet objet tombera. Mais en règle générale, les données exactes ne sont pas disponibles. En l'espèce, les conditions initiales telles que la position de l'événement (latitude/longitude) et l'altitude, la trajectoire de l'aéronef, la vitesse sol de l'aéronef, l'angle de sa trajectoire par rapport au sol, la vitesse de rotation du moteur et les vents au moment de l'événement sont essentiels. De même, la forme et la masse de la pièce jouent un rôle important dans la détermination de son coefficient balistique. Ces paramètres n'ayant pas été précisément déterminés, le NTSB a utilisé une plage de coefficients balistiques visant à couvrir la variation de taille et de forme des fragments de moyeu.

Le coefficient balistique utilisé par le NTSB est défini comme suit :

$$\beta = \frac{W}{C_D S}$$

Où W est le poids du fragment, C_D est le coefficient de traînée et S est la « *section transverse* ». La méthodologie complète utilisée pour résoudre les équations balistiques est présentée dans (Crider, 2015).

En supposant que le vent était constant pendant la chute (27 noeuds, 214 °), l'on obtient la courbe de la figure 24. Dans ce diagramme, les points 1 à 4 étaient les débris récupérés présentés au paragraphe 1.1 :

- N° 1 : Partie de cloison : N61°45'40,1 O046°48'29,4
- N° 2 : Pièce d'entrée d'air : N61°45'46,1 O046°47'52,2
- N° 3 : Partie du capot composite : N61°45'34,2 O046°48'22,6
- N° 4 : Ceinture en kevlar : N61°46'08,9 O046°47'40,4

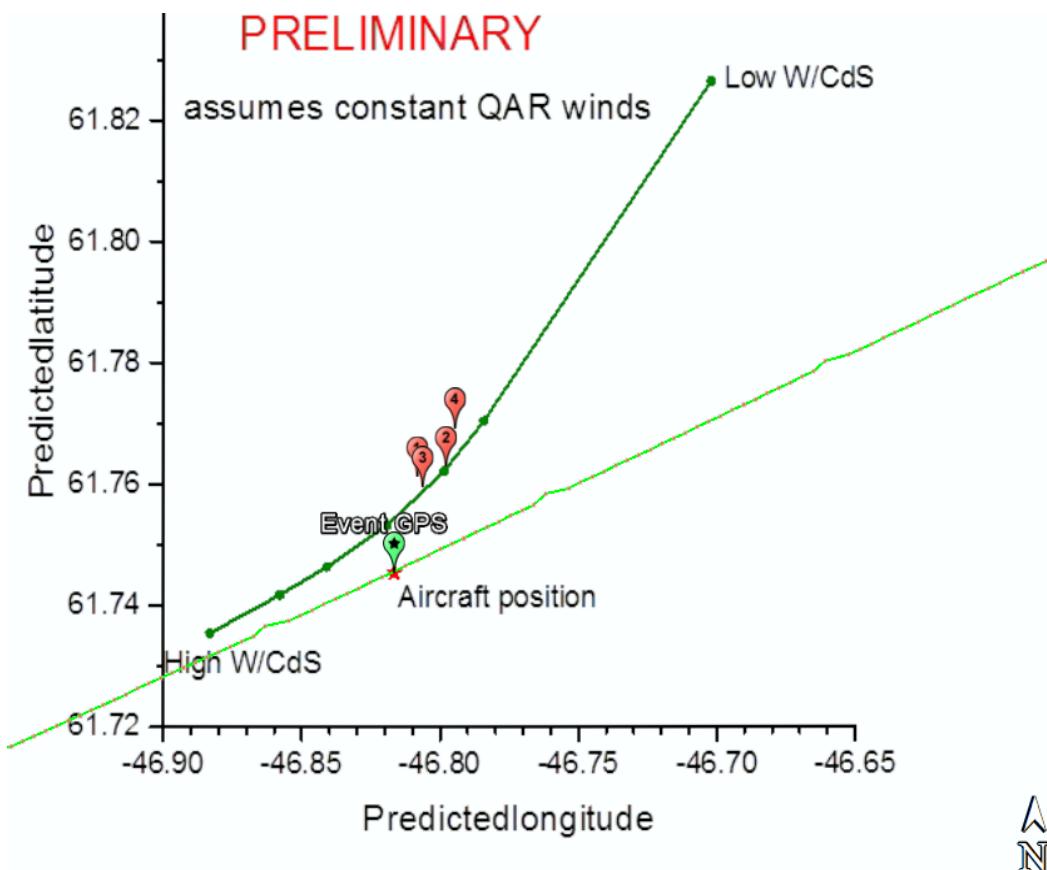


Figure 24 : localisation balistique d'un fragment de moyeu en considérant un vent constant, et une vitesse d'éjection nulle

L'extrême nord-est de la courbe tangente la direction du vent, tandis que l'extrême de la courbe présentant un coefficient balistique élevé (sud-ouest) tangente la trajectoire de l'aéronef.

Cette courbe ne prend en compte aucun angle d'éjection du moteur.

Le vent a ensuite été ajusté à 200° sous le FL100 permettant une meilleure adéquation avec l'emplacement des débris retrouvés.

La vitesse de la pièce par rapport au moteur doit également être ajoutée à la vitesse de l'aéronef. Toute perte d'énergie due à la collision de la pièce avec d'autres structures de l'aéronef peut également varier de faible à très importante. Si la perte d'énergie est significative, la position sera plus proche de la localisation balistique nominale (sans vitesse d'éjection) de la figure 24.

Des indices matériels sur le moteur indiquaient des angles d'éjection des fragments à 5 et 11 heures, vu de l'arrière vers l'avant.

Cela permet d'ajouter des segments de localisation balistique, comme illustré à la figure 25. La longueur de la courbe traduit la plage de coefficients balistiques estimés pour les fragments. Une plage de coefficients balistiques couvrant la variation de taille/forme entre les deux fragments a été retenue. Les angles d'éjection à 3 heures et à 9 heures ont été considérés pour borner le problème d'une éjection latérale pure par rapport à l'aéronef (une position à 9 heures n'est pas réaliste, aucun fragment n'ayant heurté le fuselage).

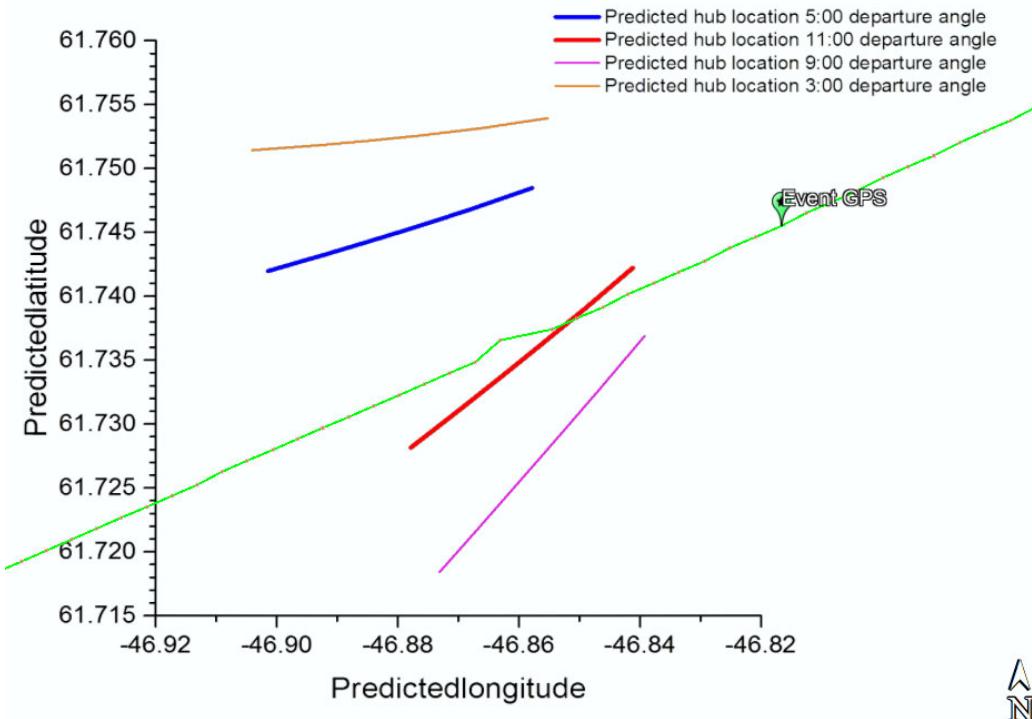


Figure 25 : emplacement de fragment de moyeu prédit par rapport à l'angle d'éjection (avec l'aimable autorisation du NTSB)

La figure 26 montre les trajectoires des extrémités basse et haute de la plage balistique qui ont été utilisées pour les angles d'éjection du moteur à 5 heures et à 11 heures.

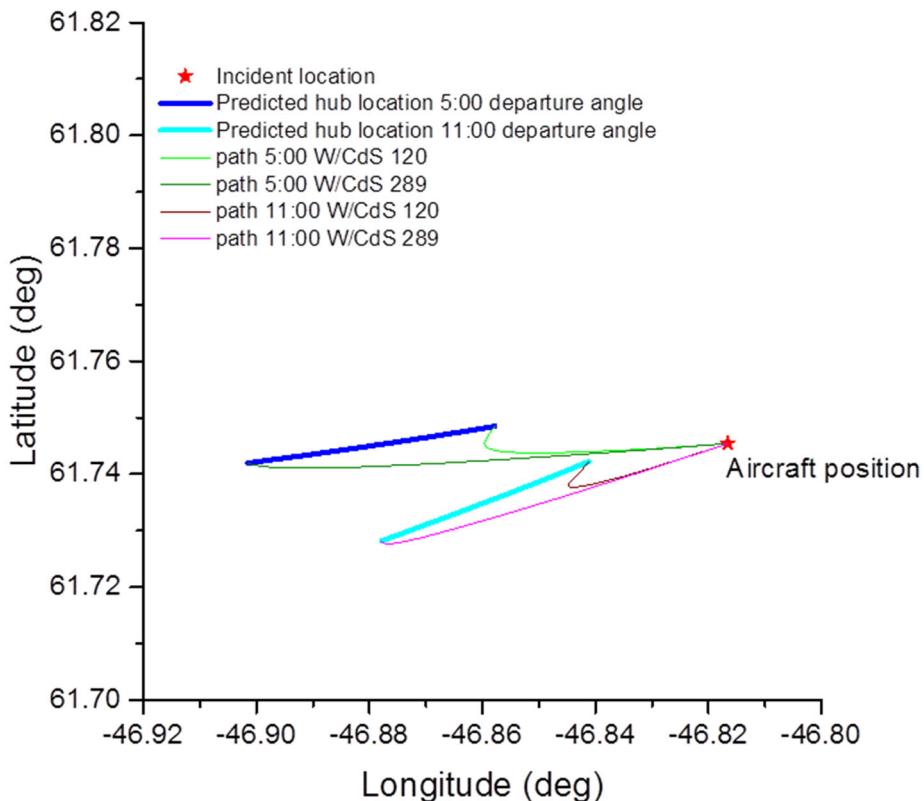


Figure 26 : effet de la plage de coefficients balistiques sur l'emplacement calculé du moyeu (avec l'aimable autorisation du NTSB)

Une incertitude de l'angle d'éjection a été prise en compte pour déterminer deux zones de recherche principales (voir la figure 27). La perte d'énergie est prise en compte par la zone secondaire car une perte d'énergie de 100 % se traduirait par la courbe balistique présenté à la figure 24.

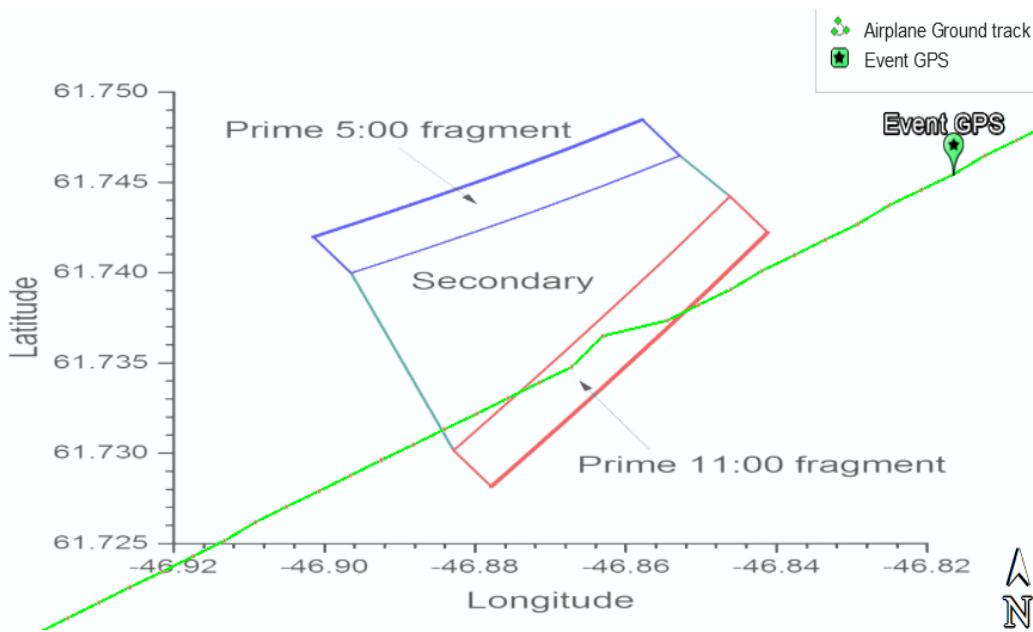


Figure 27 : zones principales et secondaires du NTSB (avec l'aimable autorisation du NTSB)

Au total, les zones principales s'étendent respectivement sur 0,68 et 0,84 km² pour les positions à 5 et 11 heures, et la zone secondaire sur plus de 2 km², soit un total de 3,52 km².

2.5 Définition de la zone de recherche pour la Phase II

Pour la préparation des opérations de recherche de la Phase II, une zone de recherche à probabilité élevée a été définie afin de déterminer le moyen de recherche le plus approprié.

Une superposition des calculs du NTSB et d'Airbus a été réalisée, laquelle a abouti à la zone de recherche présentée à la figure 28. Cet encadré rouge peut être divisé en deux parties : la partie sud est considérée comme la zone la plus prometteuse par rapport aux calculs, car la plupart des résultats des calculs pointent vers cette zone. La partie nord est un prolongement de la partie sud, englobant les vitesses d'éjection les plus élevées du calcul d'Airbus.

La superficie totale de l'encadré est de 12 km², celle de la partie sud étant de 7 km² et celle de la partie nord de 5 km².

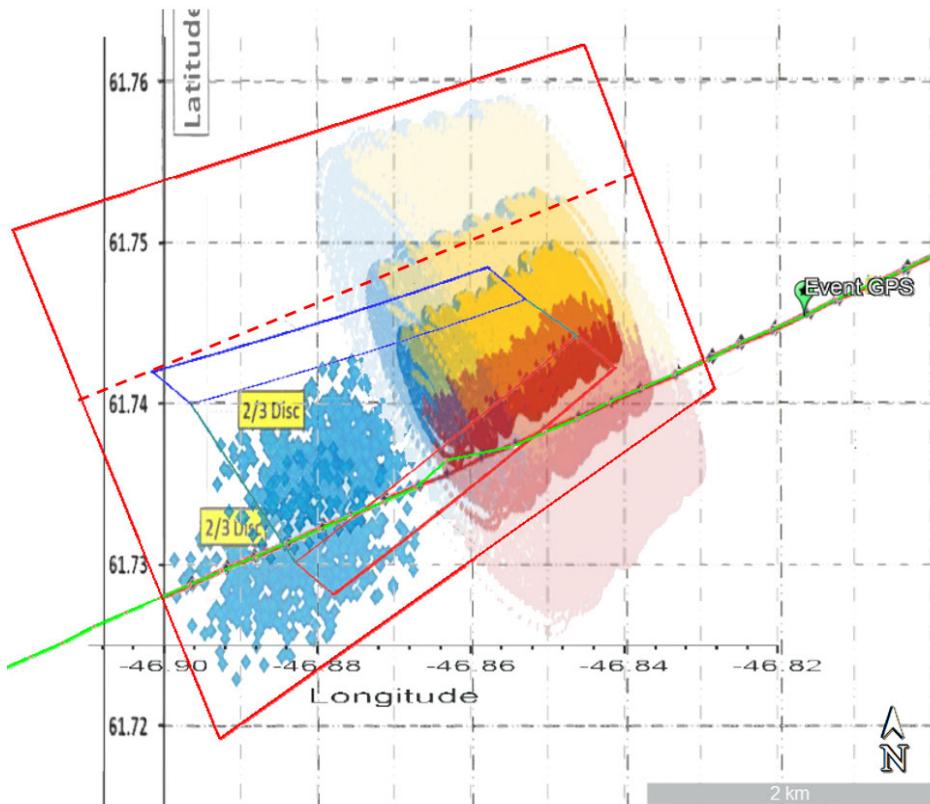


Figure 28 : zone de recherche (encadré rouge) englobant le calcul balistique d'Ariane (1/3 et 2/3 de moyeu) et le calcul du NTSB

3 - PHASE II

3.1 Généralités

3.1.1 Objectifs

Les recherches de la Phase II avaient pour principal objectif de récupérer les fragments de moyeu de soufflante tombés sur la calotte glaciaire du Groenland. D'après l'observation des dommages sur le moteur, il a été déterminé qu'une rupture du moyeu de soufflante, ayant amené l'étage de soufflante à se détacher du moteur n° 4, était le scénario d'accident le plus probable. Il a été jugé essentiel de récupérer les pièces pour pouvoir déterminer l'origine de la défaillance.

3.1.2 Environnement



Figure 29: récupération de débris sur la calotte glaciaire, octobre 2017.

Avec l'aimable autorisation d'Air Greenland/de l'AIB-D

La zone où les pièces sont tombées est reculée, et se situe dans un environnement hostile. Il s'agit d'une calotte glaciaire d'une épaisseur de 800 m, située à une altitude d'environ 1 800 m et avec des chutes de neige annuelles atteignant en moyenne 1,5 m à 2 m. Il est fréquent que les températures soient inférieures à -20 °C de novembre à avril, et la durée du jour au cours de cette période est indiquée au tableau 2.

	Lever du soleil UTC	Coucher du soleil UTC	Durée du jour
1 ^{er} novembre	10h45	19h10	8h25
1 ^{er} décembre	12h05	18h00	5h55
1 ^{er} janvier	12h30	18h00	5h30
1 ^{er} février	11h35	19h20	7h45
1 ^{er} mars	10h10	20h40	10h20
1 ^{er} avril	08h35	22h00	13h25

Tableau 2 : durée du jour dans la zone de recherche, de novembre à avril

D'un point de vue global, une calotte glaciaire peut être considérée comme un convoyeur (voir la figure 30) : il s'agit fondamentalement d'un système de transport de masse.

La ligne d'équilibre est une démarcation virtuelle entre la zone d'accumulation (où la calotte glaciaire gagne de la masse) et la zone d'ablation (où la calotte glaciaire perd de la masse).

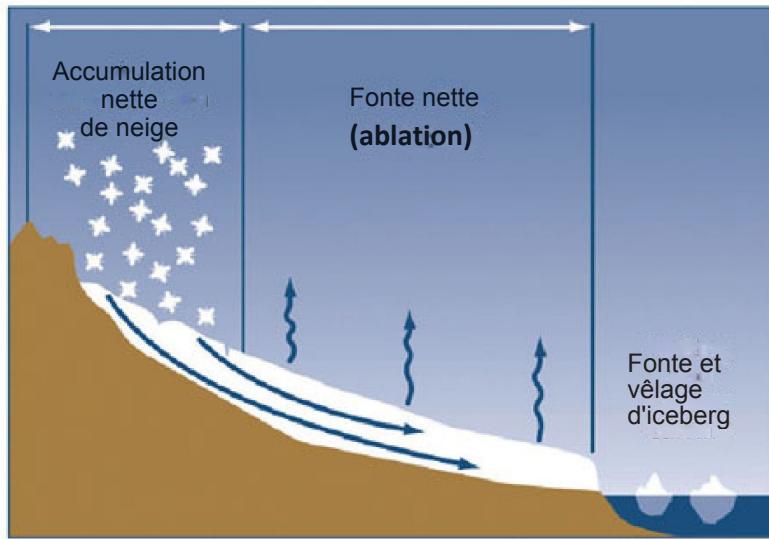


Figure 30 : schéma d'une calotte glaciaire (Edward Josberger)

Un examen plus détaillé de la zone d'accumulation (figure 31) montre que la neige s'accumule dans une « zone de neige sèche », à très haute altitude, où les températures annuelles moyennes sont inférieures à -25 °C. À des altitudes plus basses où les températures peuvent être plus élevées, l'eau peut fondre à la surface et s'infiltrer dans la neige et geler à nouveau, provoquant un réchauffement de la neige. Plus l'altitude diminue et plus la fonte augmente. Cette zone est appelée zone de percolation. Une diminution de l'altitude et une augmentation de la température peuvent avoir pour conséquence que toute la neige atteigne son point de fonte, l'eau de fonte s'infiltrant alors dans les couches plus anciennes sans geler à nouveau. Il s'agit de la zone de neige humide. Lorsque la quantité d'eau de fonte est si importante qu'il ne reste plus de neige mais que de la glace, on parle de zone de glace superposée.

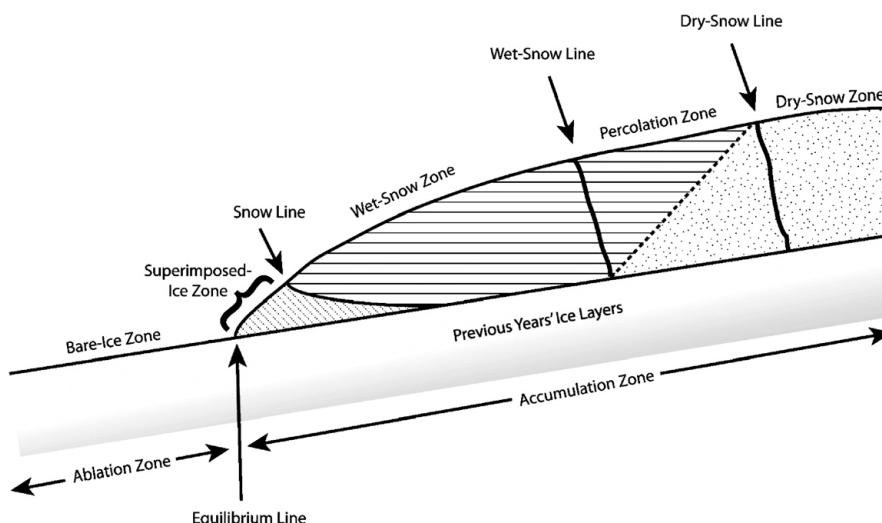


Figure 31 : zoom sur la zone d'accumulation de la calotte glaciaire au Groenland (Benson, 1962) (Paterson, 1994)

La zone où les débris ont été récupérés est une zone de percolation, qui fait partie de la zone d'accumulation. Une fois qu'une pièce est recouverte de neige, elle ne réapparaîtra pas à la surface, même après l'été et la fonte de la neige. La neige s'accumulera au-dessus de la pièce au fil du temps, ce qui signifie que plus longtemps elle restera sur le site, plus elle se trouvera en profondeur sous la neige.

De plus, le manteau neigeux se compose de plusieurs couches de neige sèche, de neige humide et d'eau qui a regelé. Les propriétés varient grandement en fonction de l'espace et du temps, et affecteront les caractéristiques de réflexion et la profondeur de pénétration d'un signal radar.

En tant que système de transport de masse, la calotte glaciaire se déplace lentement. Les vitesse d'écoulement des glaces sont estimées entre 39 et 45 m par an dans la zone concernée.

La zone se situe en particulier à moins de 5 km d'une région présentant un écoulement plus rapide et les taux de déformation dépassent probablement 1 %, soit la valeur seuil théorique pour la formation de crevasses (voir la figure 26). Il s'avère qu'il existe en effet de nombreuses crevasses dans cette région (voir le paragraphe 3.4.3) et que leur présence est probablement due à la topographie sous-glaciaire. Puisque la glace s'écoule par dessus des sommets montagneux, les taux de déformation augmentent et des crevasses se forment (voir la figure 32).

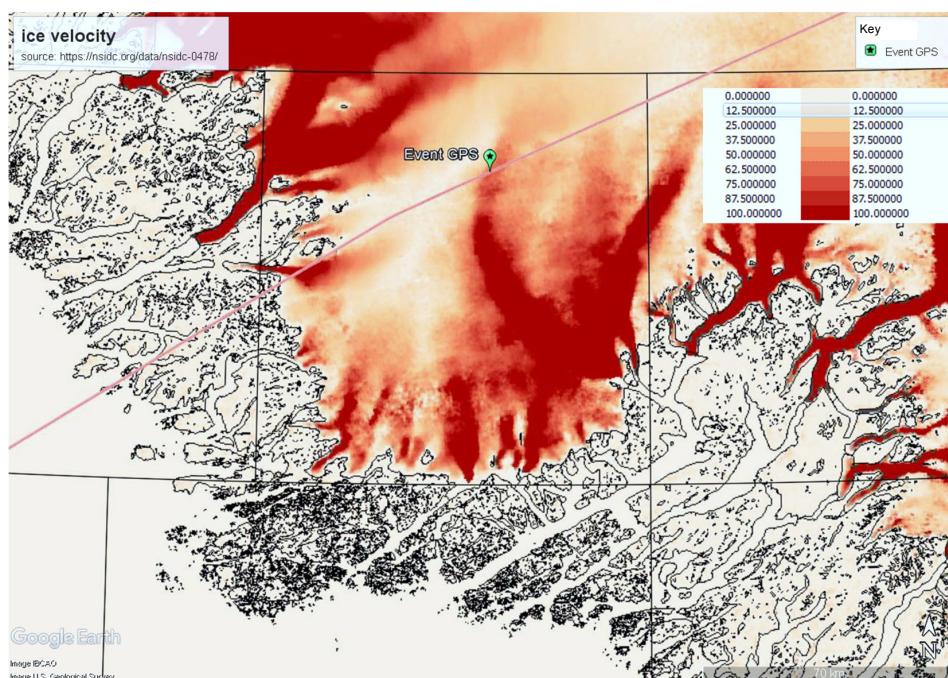


Figure 32 : carte de la vitesse d'écoulement des glaces⁽⁵⁾ (Joughin I. B., 2015, mise à jour en 2018) (Joughin I. B., 2010) plage de vitesses en m/an - les vitesses réelles peuvent atteindre 3 000 m/an

⁽⁵⁾<https://nsidc.org/data/nsidc-0478/>

3.1.3 Description des pièces manquantes

Le moyeu de soufflante complet pèse 238 kg (525 livres). Il mesure environ 86 cm (34 pouces) de diamètre et sa longueur axiale est d'environ 58 cm (23 pouces).

Un fragment de 18 kg était toujours attaché à l'arbre de turbine basse pression et a été récupéré par le BEA lors des examens sur le moteur, mais il manquait toujours 220 kg.

Dans le cadre de l'enquête, des scans laser 3D ont été effectués sur la partie récupérée du moyeu et sur un moyeu intact. Cela a permis, par soustraction, d'évaluer la forme de la (des) pièce(s) manquante(s) (voir la figure 33).

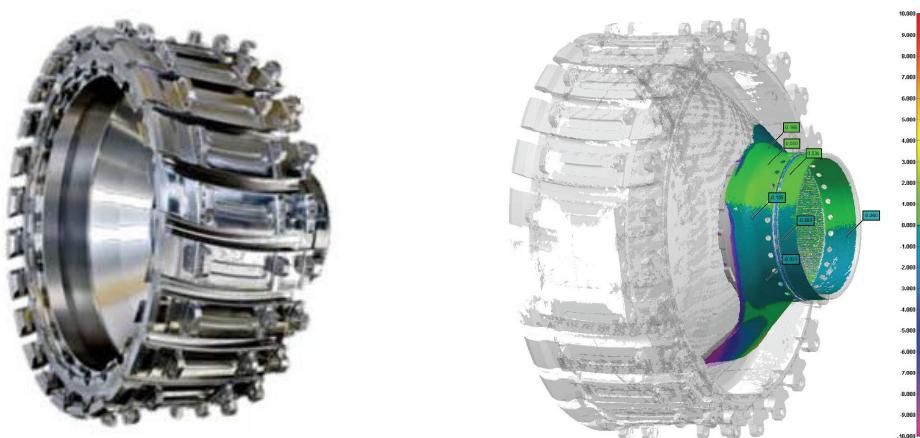


Figure 33 : exemple de moyeu de soufflante intact (image de gauche) - pièce récupérée sur le F-HPJE (en couleur, image de droite)

Les dommages sur le moteur ont mis en évidence deux zones d'éjection potentielle des fragments de moyeu : l'une située à 5 heures, vu de l'arrière vers l'avant, et l'autre à 11 heures. De plus, une simulation LS-Dyna a été réalisée par le fabricant des moteurs, Engine Alliance (figure 34). Elle a montré que le moyeu se serait séparé en deux s'il s'était rompu. D'après la simulation, un fragment pèserait 91 kg et l'autre 127 kg. Ceci est compatible, à 2 kg près, avec la masse du fragment de moyeu retrouvé attaché à l'arbre.

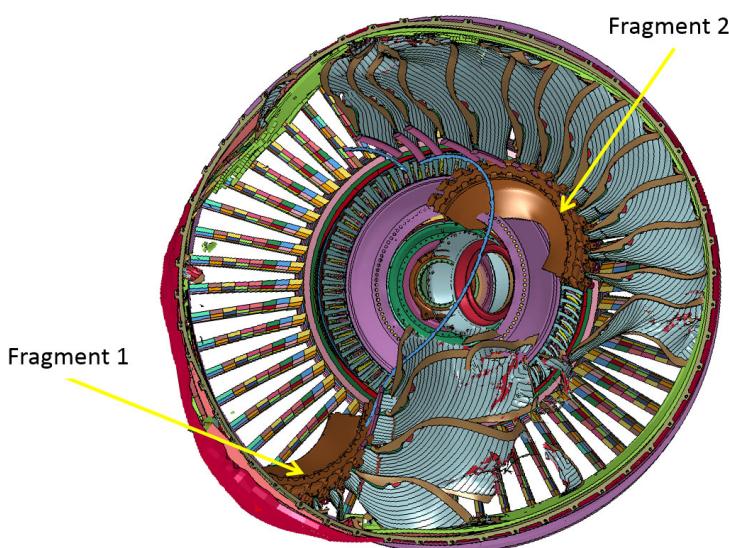


Figure 34 : Simulation de rupture de moyeu de soufflante LS-Dyna (avec l'aimable autorisation d'Engine Alliance)

3.2 Moyens de recherche

Des moyens de recherche ont été évalués après l'événement, dès qu'il a été su que les pièces étaient tombées sur une calotte glaciaire. Une fois que la neige a recouvert les débris restants, ce qui signifiait qu'une recherche visuelle n'était plus possible (fin de la Phase I), cette tâche est devenue une priorité. Les moyens évalués devaient être en mesure de détecter au moins un fragment de moyeu de soufflante mesurant 1/3 du moyeu, jusqu'à 2 mètres sous la neige, en tenant compte des conditions difficiles de la région.

Plusieurs techniques ont été envisagées : l'imagerie radar, les géoradar (GPR - Ground Penetrating Radar), les systèmes de détection électromagnétique (EM) et les radars à synthèse d'ouverture (SAR - Synthetic Aperture Radar). Certains des systèmes pouvaient être exploités au sol ou depuis le ciel, chaque option présentant des avantages et des inconvénients.

3.2.1 Imagerie radar

Airbus a évalué la possibilité d'obtenir des images via TerrasarX⁽⁶⁾ pour la détection des fragments de moyeu de soufflante. Au moment des faits, Airbus a déclaré que « *compte tenu de ses caractéristiques, il est très difficile pour TerrasarX de pénétrer dans la neige/la glace. En outre, les pièces métalliques semblent trop petites pour être détectées de manière fiable* ».

Cette solution n'a pas été explorée davantage à ce moment-là.

⁽⁶⁾Voir le site <https://www.intelligence-airbusds.com/terrasar-x/> pour plus d'informations.

3.2.2 Systèmes de détection électromagnétique

Le moyeu de soufflante étant en alliage de titane, les systèmes de détection ferromagnétiques ont été écartés. Les conductimètres électromagnétiques ont été jugés plus appropriés. Ils peuvent être remorqués par une voiture, un quad ou même une motoneige. La distance de détection peut aller jusqu'à 3 mètres latéralement. Parmi les exemples de sociétés fournissant de tels équipements, on peut citer DualEM⁽⁷⁾ ou Geonics⁽⁸⁾.

⁽⁷⁾Voir le site <http://www.dualem.com/> pour plus d'informations.

⁽⁸⁾Voir le site <http://www.geonics.com/> pour plus d'informations.

⁽⁹⁾Voir le site <http://www.georeva.eu/> pour plus d'informations.

Une société appelée Georeva⁽⁹⁾, spécialisée dans les instruments de géophysique, exploite des équipements électromagnétiques tels que l'EM31-MK2 ou le DUALEM 21s. Elle a donc été approchée pour déterminer si ces capteurs étaient capables de détecter des pièces en titane. Georeva a effectué des tests sur des pièces en acier inoxydable censées avoir une meilleure réponse que des pièces en titane. Ces tests ont été en grande partie non concluants avec un équipement électromagnétique, la réponse ayant été qualifiée de « *versatile* ». Selon leur géophysicien, un GPR serait plus approprié pour détecter des pièces en titane sous la neige.



Figure 35 : exemple d'utilisation de l'EM31-MK2 en présence de glace

3.2.3 GPR utilisé depuis les airs

L’Institut des Géosciences de l’Environnement, IGE⁽¹⁰⁾ de Grenoble est issu de la fusion de plusieurs laboratoires de recherche universitaire français, parmi lesquels le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l’Environnement, LGGE, basé lui aussi à Grenoble. Ce laboratoire a effectué des mesures géophysiques au-dessus de différentes zones du massif du Mont-Blanc et en particulier au-dessus du glacier d’Argentière. L’objectif était de cartographier la topographie rocheuse du glacier. Pour ce faire, il a eu recours aux services d’une société appelée RST⁽¹¹⁾, exploitant un GPR aéroporté sous un hélicoptère.

Les principales caractéristiques du système sont les suivantes :

- Il permet de détecter des pièces mesurant plus de 1 m, jusqu’à une profondeur de 50 m.
- L’antenne pèse 170 kg et doit être utilisée par vent faible, ne dépassant pas 30 km/h.
- L’espacement entre les lignes de passage est de 10 m.
- Il existe un effet de « zone aveugle » qui limite les détections situées entre la surface et une profondeur de 1,5 à 3 m.

Compte tenu de la taille des fragments de moyeu, qui est probablement inférieure à 1 m, et de la profondeur de leur emplacement probable (environ deux à trois mètres sous la couche de neige), cette solution a été jugée inappropriée.



Figure 36 : système radar Hera-G (RST) opéré par hélicoptère

L’utilisation de drones a également été envisagée, dans la mesure où certaines sociétés telles que MGT (Mobile Geophysical Technologies⁽¹²⁾) proposent un GPR opéré par des drones sans équipage, mais, compte tenu des conditions météorologiques sur la calotte glaciaire (vents forts et météo changeant rapidement), cela n’a pas été considéré comme une solution efficace à première vue.

⁽¹⁰⁾Voir le site <http://www.ige-grenoble.fr/> pour plus d’informations.

⁽¹¹⁾Voir le site <http://www.rst-group.biz> pour plus d’informations.

⁽¹²⁾Voir le site <http://www.mgt-geo.com/> pour plus d’informations.

3.2.4 GPR exploité au sol

Peu de temps après l'événement, l'AIB-D a contacté l'Institut de Géophysique du Danemark et du Groenland, GEUS, ⁽¹³⁾, en raison de l'expérience de ce dernier en glaciologie et en conditions arctiques. GEUS est habitué à travailler avec un GPR pour caractériser la glace et la neige sur la calotte glaciaire. Cette solution était donc assez rapidement prise en considération après l'événement. Même si un GPR est utilisé principalement pour détecter des crevasses ou pour caractériser des couches de neige sur la calotte glaciaire, il est également utilisé à des fins archéologiques ou pour détecter des objets enterrés tels que des tuyaux.

⁽¹³⁾Voir le site <http://www.eng.geus.dk/> pour plus d'informations.

Un GPR peut être remorqué par un véhicule (quad, voiture, motoneige) ou par un homme, à pied ou à ski. La zone balayée dépend de la taille du radar, mais un échantillonnage dense est nécessaire, avec une longue durée d'acquisition et un grand volume de données, car il inspecte uniquement à sa verticale et non sur le côté. Il peut être utilisé à différentes fréquences, en fonction des caractéristiques recherchées.

3.2.5 SAR aéroporté

Le BEA a été informé par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) que l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), le laboratoire aérospatial français⁽¹⁴⁾, exploite un système de radar à synthèse d'ouverture (SAR) baptisé SETHI.

⁽¹⁴⁾Voir le site <https://www.onera.fr/> pour plus d'informations.

SETHI est un système aéroporté développé par l'ONERA, intégrant divers capteurs. Les composants du radar couvrent les bandes VHF-UHF à X, dans une configuration entièrement polarimétrique avec une résolution très élevée, une interférométrie longitudinale et transversale, et une capacité à base multiple très haute précision pour les applications d'interférométrie et de tomographie.

Lancé en 2007, le projet SETHI s'appuie sur un Falcon 20 adapté (figure 37). Cet aéronef, loué à une société privée appelée AVDEF, filiale d'Airbus, et stationné sur l'aéroport de Nîmes Garons, a été adapté pour loger deux « pods » sous l'aile, mesurant environ trois mètres de long et pesant 300 kg chacun.



Figure 37 : Falcon 20 F-GPAA de la société AVDEF

Le système SETHI exploite les bandes UHF, L et X, avec une capacité polarimétrique. Le radar UHF est intégré au « pod » de gauche (figure 38) et les radars X + L se trouvent dans le « pod » de droite (figure 39).



Figure 38 : radar UHF intégré au pod de gauche



Figure 39 : Charge utile de radar en bande X (droite) et bande L (gauche) intégrée au pod de droite

Radar	UHF	L	X
Fréquence centrale	340 MHz	1,3 GHz	9,5 GHz
Bandé passante	240 MHz	150 MHz	720 MHz
Résolution	62,5 cm	1 m	20 cm
Polarisation	Complète (H + V)	Complète (H + V)	Complète (H + V)
Ouverture de faisceau d'antenne (site)	80°	31°	16°
Puissance émise (crête)	500 Wc	300 Wc	200 Wc
Puissance émise (moyenne)	100 W	60 W	30 W

Tableau 3 : paramètres du radar

Pendant les mesures, les bandes UHF et L peuvent être utilisées simultanément dans une configuration de visée à gauche. De la même manière, les bandes X et L sont également associées pour des mesures simultanées dans une configuration de visée à droite. Les associations X + L + UHF ne fonctionnent pas en même temps mais d'une mesure à la suivante. Il est également possible de modifier l'angle de dépression (angle entre l'horizontale et la ligne de visée du signal) des composantes X et L entre deux mesures. La configuration de vol est généralement une trajectoire linéaire, mais une trajectoire circulaire peut également être proposée pour observer le sol sous différents angles d'azimut.

La fauchée est directement liée à l'altitude au-dessus du sol et à l'angle de dépression (voir la figure 40).

Les bandes X sont généralement opérées à 8 200 pieds au-dessus du sol, et la fauchée obtenue est de 3 795 m.

Les bandes L et P sont généralement opérées à 12 000 pieds au-dessus du sol, et la fauchée obtenue est de 5 748 m.

Cette plage de fauchées permettrait de couvrir l'ensemble de la zone de recherche avec un seul survol.

Cette solution semblant répondre précisément aux besoins, l'ONERA a été contacté pour des tests préliminaires de ses moyens.

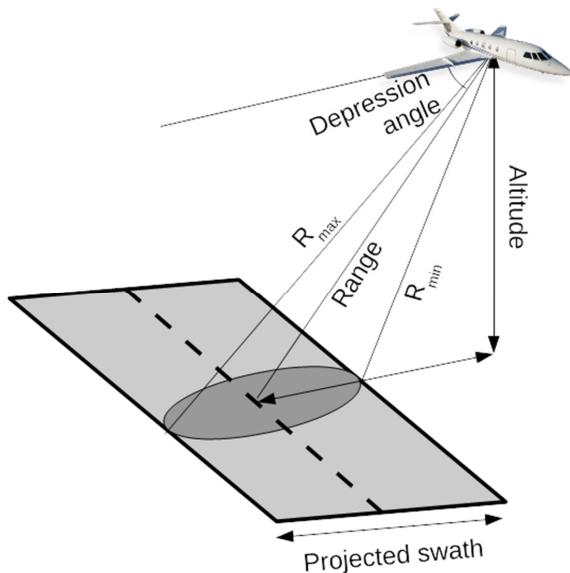


Figure 40 : schéma de paramètres de radar à visée latérale

3.3 Mise en place de la campagne de recherche PHASE II

3.3.1 Détection : campagne de test de radar aéroporté

Le BEA a demandé à l'ONERA d'évaluer les capacités de la plate-forme radar expérimentale SETHI pour détecter et localiser les fragments de moyeu de soufflante du F-HPJE qui sont recouverts de neige dans le sud du Groenland.

En novembre 2017, un moyeu de soufflante similaire au moyeu de l'événement a été mis à la disposition du BEA par Safran Aero Boosters (anciennement Techspace Aero), qui usine la pièce finie. Il était intact et donc non représentatif du point de vue de la forme d'un fragment de moyeu de soufflante de l'événement. Cependant, dans un premier temps, il a été jugé suffisant d'utiliser ce moyeu comme pièce de test et d'essayer de le détecter et de le localiser à l'aide du radar ONERA SETHI. De plus, l'opération de test s'est faite par opportunité et il aurait fallu trop de temps pour usiner le moyeu en plusieurs pièces juste pour se rapprocher de la forme des fragments de l'événement. Une aube de soufflante mise au rebut fournie par Air France a également été utilisée comme cible pour le test de détection.

L'opération de test a eu lieu à l'aéroport de Nîmes-Garons, de la fin novembre à la mi décembre 2017. Dans la mesure où il s'agissait d'un test par opportunité, il n'était pas possible d'enfoncer les pièces dans la neige ou la glace. Les pièces ont simplement été placées sur un taxiway de l'aéroport (figure 41), ce qui n'était pas représentatif de la situation au Groenland. Toutefois, la possibilité de réaliser ce test dans un délai aussi court était inattendue et très profitable. L'effet de la neige et/ou de la glace sur la réponse du radar n'a pas été évalué lors de ces tests, mais il a néanmoins été estimé à partir de la littérature scientifique disponible (voir le paragraphe 3.3.2).



Figure 41 : moyeu de soufflante et aube de soufflante sur l'aéroport de Nîmes-Garons pour les tests de détection

Les tests ont permis de détecter le moyeu de soufflante et l'aube de soufflante avec les bandes L, P et X (figure 42). Cependant, les bandes X et P ont produit les meilleurs résultats en matière de contraste, tandis que la bande L semblait moins efficace.

Sur les images radar, tout les objets manufacturés ont une réponse brillante forte. Pour rappel, sur la calotte glaciaire du Groenland, les pièces recherchées seraient les seules pièces manufacturées. La détection de ces pièces serait nettement plus facile que sur les images de la figure 42, où le moyeu de test et l'aube de test sont très proches de nombreuses infrastructures créées par l'homme.

En ce qui concerne la différence entre un moyeu complet et des fragments de moyeu, l'ONERA a estimé que, même si les fragments de moyeu sont plus petits, la géométrie des pièces, avec de nombreuses arêtes (alvéoles d'aubes), était tout de même favorable à une rétrodiffusion importante et devrait se comporter comme une cible ponctuelle plutôt que comme une cible diffuse.

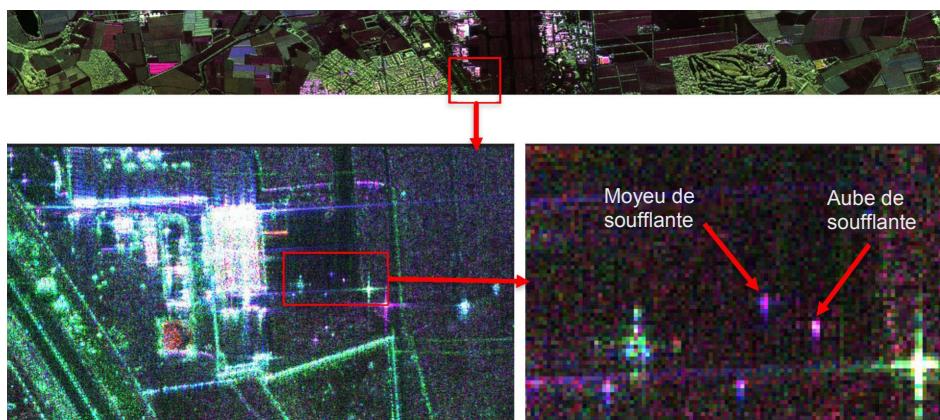


Figure 42 : images en bande L, cap de vol 270°, polarisation totale, angle de dépression 45°, résolution 90 cm x 90 cm

3.3.2 Comportement du SAR dans la neige et la glace

Le comportement du SAR dans la neige et la glace représentait une autre incertitude. L'ONERA a réalisé une étude de faisabilité basée sur la littérature et les données radar disponibles concernant le Groenland.

Il a tout d'abord estimé la rétrodiffusion de la calotte glaciaire, à l'aide d'images TerraSAR-X datées de 2015 fournies par Airbus (pour la bande X), d'une image PALSAR datée de janvier 2010 (pour la bande L) et de données AIRSAR datées de juillet 1991 (pour la bande P).

Sur ces données, aucune crevasse n'était visible.

Une estimation de l'atténuation des ondes électromagnétiques et de la profondeur de pénétration dans la calotte glaciaire était également nécessaire. Une étude bibliographique a été réalisée.

L'ONERA a conclu que la neige fraîche (qui recouvrait les fragments de moyeu perdus) devrait correspondre à une profondeur de pénétration d'environ 4 m aller et retour avec la bande X et d'avantage avec les bandes L et P. La neige tombée devait être de l'ordre de 2 m d'épaisseur. L'ONERA s'attendait donc à voir les fragments du moyeu à travers la couche de neige fraîche. En dessous, en raison de la percolation, les couches présenteraient une forte rétrodiffusion et agiraient comme des inhomogénéités, augmentant ainsi la perte de propagation des ondes.

L'hypothèse suivante a été considérée : les fragments de moyeu perdus reposent au-dessus de cette couche de glace formée durant l'été précédent l'accident.

Des tests de détection sous la neige ont néanmoins été évoqués fin 2017. Le test de détection du moyeu de soufflante effectué à Nîmes-Garons était une campagne par opportunité qui s'est déroulée de novembre à décembre 2017. Si une recherche aéroportée devait avoir lieu en hiver/au printemps 2018, c'est-à-dire avant que la neige ne commence à devenir trop « *humide* » (à partir de mai), il ne restait plus de temps pour effectuer des essais en vol pour des raisons de disponibilité de l'aéronef et de logistique.

De plus, si des essais en vol devaient être effectués pour estimer la pénétration dans la neige, il serait nécessaire de reproduire exactement les caractéristiques de la neige se trouvant sur la calotte glaciaire pour que les tests soient représentatifs.

L'ONERA était confiant dans le fait que le radar pénétrerait dans la neige à une profondeur suffisante pour détecter les fragments de moyeu de soufflante. Par conséquent, aucun essai en vol de pénétration dans la neige n'a été effectué.

3.3.3 Récupération des pièces

Les chances qu'une campagne de recherche aéroportée menée par l'ONERA à la fin de l'hiver ou au début du printemps permettraient de localiser les fragments de moyeu de soufflante se trouvant sous la neige, sur la calotte glaciaire étaient estimées comme raisonnables à ce stade.

Si cette opération réussissait, il fallait alors réfléchir au moyen de récupérer les pièces.

Peu de temps après l'événement, il a été demandé à la GEUS de proposer une opération de recherche au sol consistant à réaliser une recherche à l'aveugle des zones prioritaires calculées dans la zone de recherche, au cours d'une campagne s'étendant sur quatre semaines au printemps.

En raison des conditions météorologiques sur la calotte glaciaire, il était inenvisageable d'envoyer quiconque sur place pendant une période de temps prolongée durant l'hiver (jusqu'à la fin du mois de mars). Même pour un court séjour, l'équipe d'enquête n'a pu trouver personne qui soit autorisée à travailler par des températures aussi froides ou qui accepterait de le faire.

Une recherche à l'aveugle sur plusieurs kilomètres carrés dans cette zone, avec la présence potentielle de crevasses, est un travail de longue haleine qui offre des perspectives de succès minimes.

Une opération aéroportée préalable pourrait améliorer sensiblement les probabilités de récupérer les pièces, si toutefois elles parvenaient à être localisées.

La décision de mettre sur pied une opération de récupération au sol par la GEUS après la recherche aéroportée a été prise début janvier 2018 car elle semblait offrir les meilleures chances de succès.

Même si des pièces étaient localisées lors de la recherche aéroportée, il était nécessaire de mettre en place une phase de récupération au sol. Si aucune pièce ne pouvait être localisée pendant la recherche aéroportée, la phase au sol pouvait être convertie en une recherche à l'aveugle dans les zones prioritaires.

3.3.4 Zone de recherche en cas d'échec de la recherche aéroportée

La fauchée permise par le SAR (3 à 6 km en fonction des paramètres radar et des altitudes de vol décrites au paragraphe 3.2.5) est tellement large qu'il n'était pas nécessaire de restreindre la zone de recherche. Cependant, l'équipe d'enquête devait prendre en compte le fait que, même si toutes les mesures de précaution étaient prises, il était possible que les opérations aéroportées échouent, ce qui signifie qu'aucune cible potentielle ne serait fournie à GEUS pour la campagne au sol.

Dans ce cas de figure, une réduction de la taille de la zone de recherche a été demandée.

Les zones de recherche prioritaires ont été définies comme étant les zones communes aux zones prioritaires du NTSB et au calcul d'Ariane (figure 43). La zone située entre les deux précédentes, à savoir le chevauchement entre la zone de recherche secondaire du NTSB et le calcul d'Ariane, constitue la zone de recherche secondaire (figure 44).

La zone de recherche tertiaire était une extension englobant l'ensemble des zones de recherche du NTSB et la plupart des résultats des calculs d'Ariane (voir la figure 45).

Les coordonnées des extrémités de chaque zone sont indiquées au tableau 4 :

Principale		Secondaire	Tertiaire
Bleu foncé	Rouge foncé	Orange	Vert clair
61.745422° -46.879801°	61.735346° -46.868874°	61.742268° -46.876823°	61.743276° -46.905362°
61.742268° -46.876823°	61.732873° -46.864770°	61.735346° -46.868874°	61.725735° -46.878229°
61.746599° -46.851589°	61.742179° -46.840839°	61.744385° -46.845679°	61.741007° -46.830514°
61.749263° -46.854593°	61.744385° -46.845679°	61.746599° -46.851589°	61.753678° -46.842806°

Tableau 4 : coordonnées des zones de recherche pour la campagne au sol en cas d'échec de la campagne de recherche aérienne

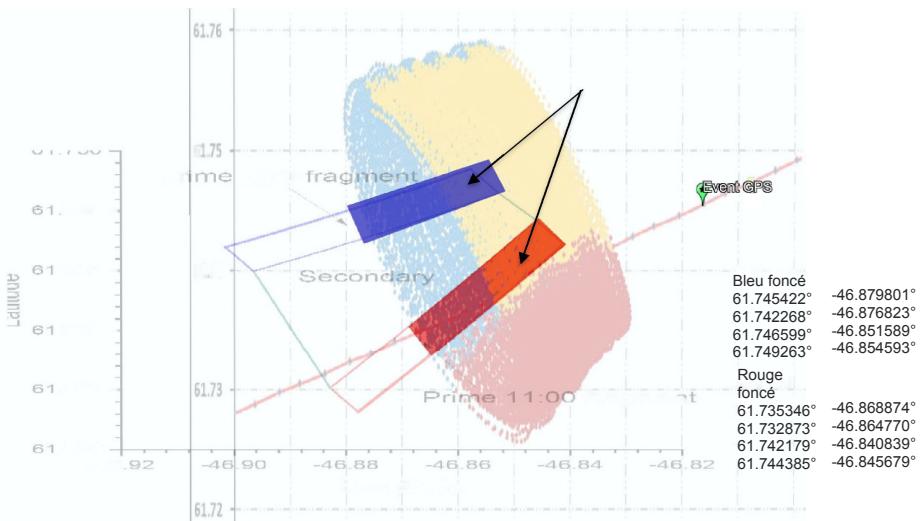


Figure 43 : zones de recherche prioritaires (bleu foncé et rouge foncé, 0,5 km² chacune), définies fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée

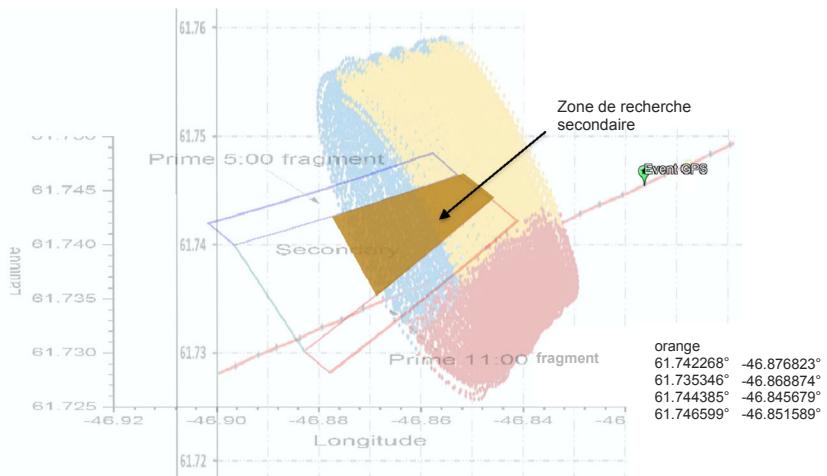


Figure 44 : zone de recherche secondaire (orange, 0,93 km²), définie fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée

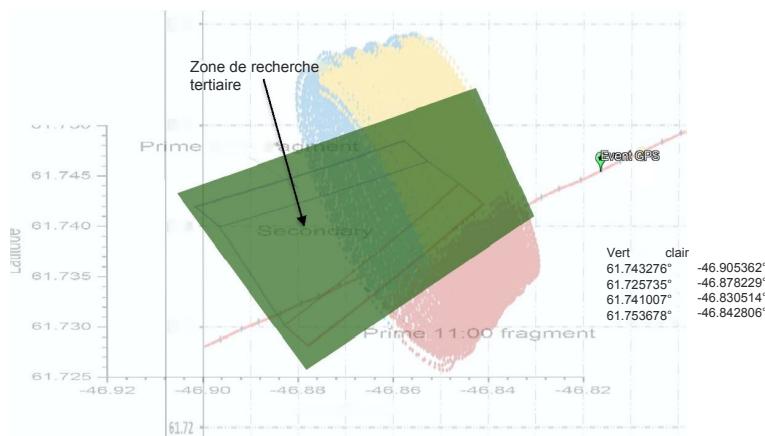


Figure 45 : zone de recherche tertiaire (vert clair, 6,35 km²), définie fin mars 2018 en cas d'échec de la recherche aéroportée

3.4 Opération GREENSAR

3.4.1 Préparation

Le BEA a demandé initialement à l'ONERA d'organiser l'opération de recherche au Groenland au cours de l'hiver 2018. L'ONERA a proposé trois composantes de radars en bandes X (9,5 GHz), L (1,3 GHz) et UHF (340 MHz) dans une configuration entièrement polarimétrique. L'objectif était de tirer parti des capacités de pénétration sous la neige des basses fréquences, en particulier de la bande UHF.

Les vols de mesure devaient avoir lieu entre février et avril 2018 pour pouvoir profiter de l'état de la neige pendant la période la plus froide où la neige est « sèche », ce qui favorise l'effet de pénétration. Cependant, il fallait également trouver un compromis avec les conditions météorologiques, car plus l'année avance, plus la température augmente, plus la météo est favorable et plus les jours s'allongent.

La mission a donc été planifiée pour le début du mois d'avril 2018.

À des fins de calibration, l'ONERA a demandé si des réflecteurs pouvaient être enfouis dans la zone de recherche. L'ONERA utilise généralement deux types de réflecteurs : un réflecteur à écho renforcé (ou en trièdre) et une sphère de Lunebourg (figure 46).

GEUS a proposé d'enfoncer ces objets à l'occasion d'une courte mission de reconnaissance, peu de temps avant la campagne de mesure, afin de limiter le déplacement des cibles provoqué par les mouvements de la calotte glaciaire (figure 47). Un fragment de moyeu de test (fabriqué à partir d'une pièce à l'échelle 0,93, voir la figure 48) a été fourni par EA et a également été enfoui sur place, à titre de référence, dans la mesure où son emplacement GPS était connu.

Cette mission a eu lieu le 24 mars 2018.



Figure 46 : trièdre et sphère dans leur caisse de transport

Pour permettre la calibration des données, le réflecteur a été enfoui avec son arête horizontale parallèle au cap 265.5° , et son ouverture en direction du cap 166.5° ce qui correspond aux valeurs du « nord géographique » de 233° et 143° respectivement, étant donné qu'à cet endroit, l'écart entre le nord géographique et le nord magnétique atteint $23,5^\circ$.

GEUS a pris l'initiative de créer une lentille de glace afin de vérifier quelle serait sa rétrodiffusion sur les images radar. Cela a été fait en enfouissant une luge remplie d'eau fondue.

La position finale des réflecteurs et des objets de référence (une sphère de Luneburg, un réflecteur à écho renforcé, un moyeu de test, une lentille de glace et un trou rebouché) est illustrée à la figure 49.



Figure 47 : membre de la GEUS enfouissant la sphère de Luneburg sur la calotte glaciaire



Figure 48 : partie d'un moyeu de moyeu de soufflante de test sur sa luge, appelée ci-après « moyeu de test » (photo de gauche), et une fois enfouie (photo de droite)

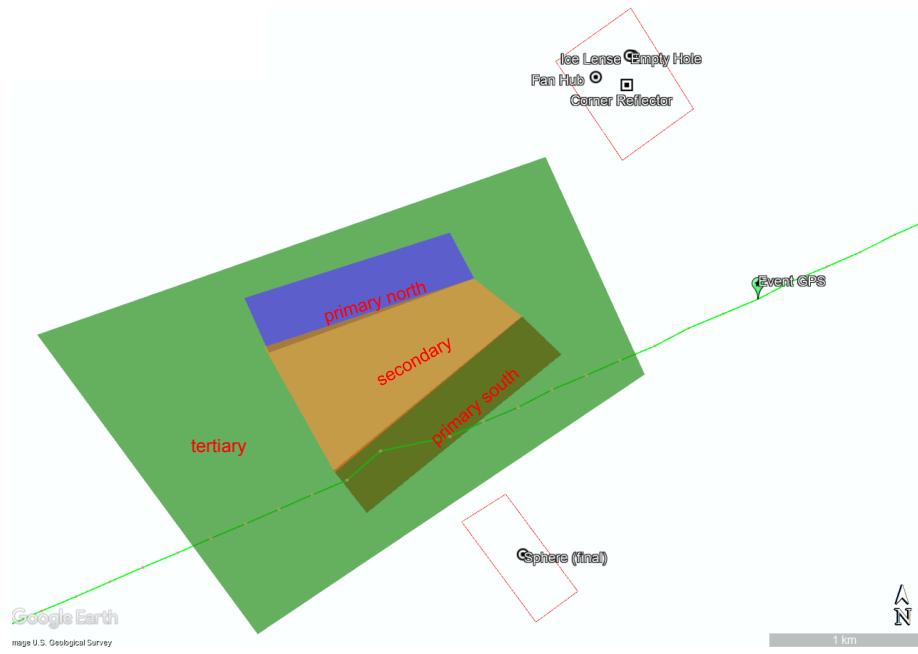


Figure 49 : position des réflecteurs et des objets de référence par rapport à la zone de recherche définie au paragraphe 3.3.4

Les infrastructures locales destinées aux aéronefs et au personnel ont amené l'équipe à considérer Kangerlussuaq (avec une piste de 2 810 m) comme base principale et Narsarsuaq (avec une piste de 1 830 m) comme base secondaire (figure 50). Les mesures seraient effectuées à partir de ces deux aéroports au-dessus de la zone de recherche dans laquelle les pièces du F-HPJE étaient supposées se trouver.

En raison du temps de vol limité consacré aux mesures (pour des raisons de sécurité, l'avion doit conserver une réserve de carburant pour pouvoir se dérouter vers l'un ou l'autre de ces aéroports), l'ONERA a proposé l'acquisition de 5 à 8 lignes de mesure par vol, l'aéronef ayant une autonomie d'environ 2,5 heures.

L'équipe sur site se composait d'un participant du BEA, d'un participant d'AIRBUS, d'un participant du NTSB, de deux pilotes (commandant de bord et officier pilote) et d'un mécanicien d'AVDEF, ainsi que de neuf membres de l'ONERA : cinq opérateurs radar, deux experts en traitement des données et deux chefs de projet. Le chef des opérations d'AVDEF a également été présent pendant trois jours.

L'ONERA et l'équipe d'enquête se sont installés du 3 au 19 avril 2018 à l'aéroport de Kangerlussuaq, et disposait de matériel de traitement des données en provenance de France, afin de pouvoir produire rapidement des images après chaque vol.

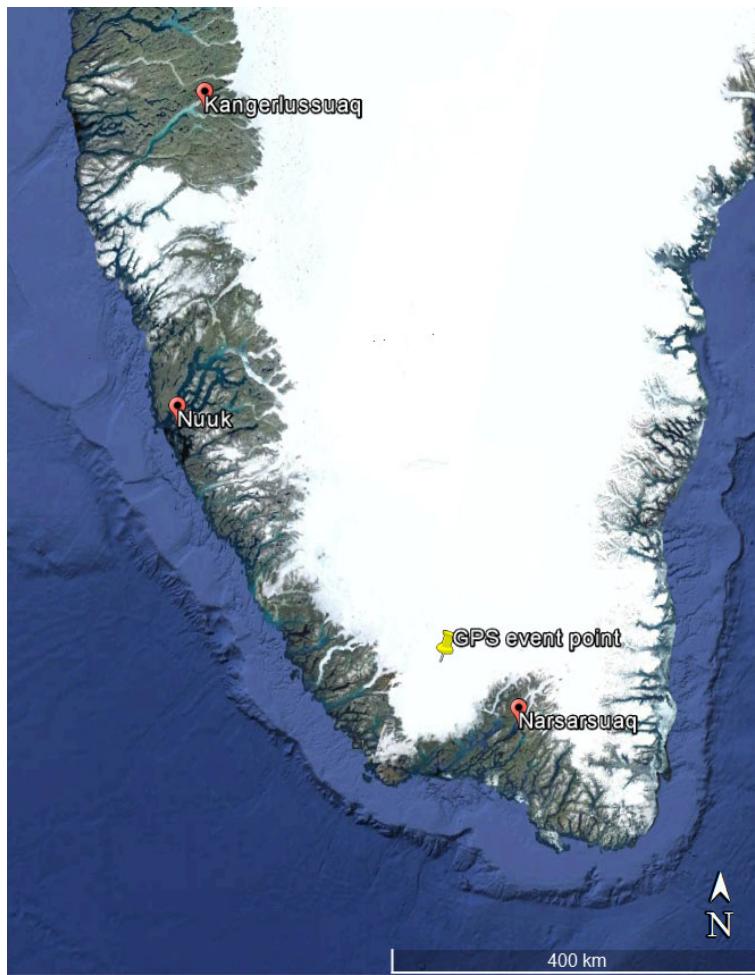


Figure 50 : point de l'événement comparé aux emplacements de Kangerlussuaq et Narsarsuaq - Nuuk est la capitale et la plus grande ville du Groenland, mais la piste de son aéroport ne mesure que 950 m de long.

3.4.2 Vol de validation (5 avril 2018)

Les objectifs du vol de validation étaient de s'assurer que tout le matériel informatique et les logiciels fonctionnaient comme prévu, d'optimiser les paramètres de post-traitement et de déterminer quels étaient les retards électroniques du système.

À cet effet, un deuxième trièdre (un premier trièdre était déjà enfoui sous la neige sur la zone de recherche) a été positionné avec précision sur le parcours de golf de Kangerlussuaq ($67^{\circ}01'27,14729N\ 52^{\circ}38'1,29678W$), aligné sur 062° (figure 51).



Figure 51 : position du trièdre

Le vol de validation a été effectué le 5 avril. Au cours de ce vol, deux passages en bande X et deux passages en bandes L et UHF ont été effectuées au-dessus de l'emplacement du trièdre (« *région de Kangerlussuaq* »). Ensuite, deux autres passages ont été effectuées au-dessus d'une zone présentant des caractéristiques jugées analogues à celles de la calotte glaciaire près de la zone de recherche. Celle-ci était située à 100 Nm à l'est de Kangerlussuaq, à 20 minutes de vol depuis le parcours de golf. Le premier passage était consacré aux bandes L et UHF et le second passage à la bande X.

Le post-traitement des données a commencé immédiatement après le vol. Les retards électroniques ont été mesurées et les paramètres de traitement ont été affinés. Des images radar des zones ont été produites, tel qu'illustré à la figure 52. Sur cette image, le trièdre (cercle rouge) pouvait être clairement détecté. Il était également possible de voir les caractéristiques du sol sous la neige, ce qui démontre que la bande X traversait bien la neige.

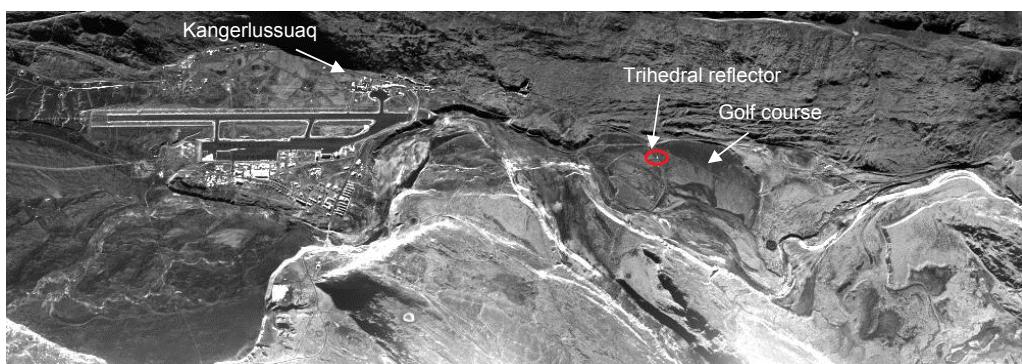


Figure 52 : imagerie radar en bande X de la région de Kangerlussuaq

Les activités de post-traitement se sont poursuivies pour un étalonnage précis du système et un affinage des paramètres de post-traitement.

3.4.3 Première série de vols de mesure (du 6 au 8 avril 2018)

Les objectifs de la première série de vols de recherche étaient d'effectuer plusieurs passages de mesure prédéfinis au-dessus de la zone de recherche. Compte tenu des conditions météorologiques à Narsarsuaq (UAK) qui étaient assez contraignantes pour l'aéronef équipé de ses deux pods SETHI, les vols suivants ont été effectués :

- Kangerlussuaq (SFJ) - Narsarsuaq (UAK) : mesures en bande X, trois passages selon le cap 233° et trois passages selon le cap 053° ;
- UAK - SFJ : mesures en bande UHF (P) et L, trois passages (caps 233°, 53° et 323°).

Le vol aller (SFJ-UAK) consacré aux mesures en bande X a été effectué le 6 avril.

Les passages de mesure sont illustrés à la figure 53. La couverture radar de ces passages est illustré à la figure 54.

En raison des conditions météorologiques, l'équipage n'a pas pu décoller d'UAK le même jour. Ce n'est que le 8 avril (deux jours plus tard), en fin de matinée, que les conditions ont été à nouveau acceptables. Il a été décidé de ne pas prendre le risque d'effectuer un vol UAK-UAK local qui aurait permis de recueillir davantage de données, mais de se rendre plutôt directement à l'aéroport SFJ, afin de décharger les données le plus rapidement possible et de ne pas bloquer encore une fois l'aéronef à l'aéroport UAK. Le vol de retour a été effectué le 8 avril avec les mesures en bande L et UHF (P).

Les passages de mesure sont illustrés à la figure 55. La couverture radar de ces passages est illustré à la figure 56.

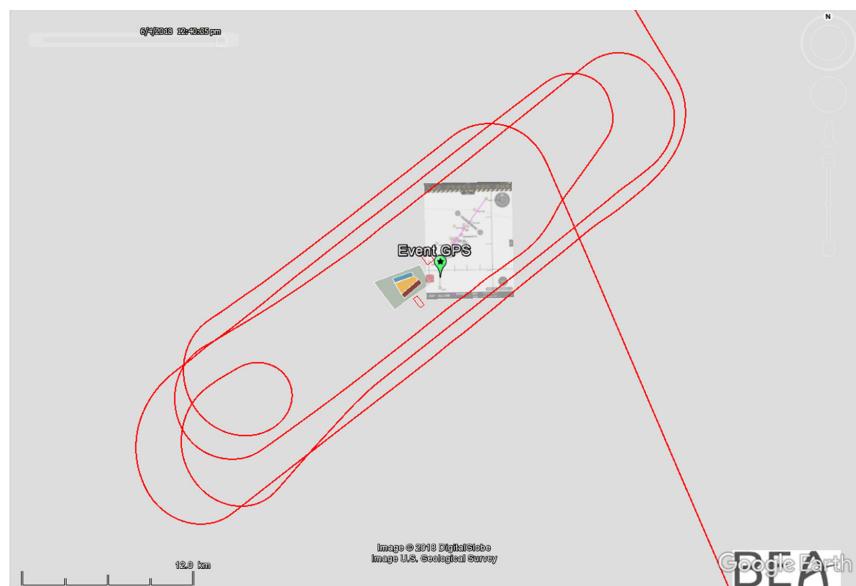


Figure 53 : passages de mesure en bande X - trajectoire de l'aéronef (vol aller)

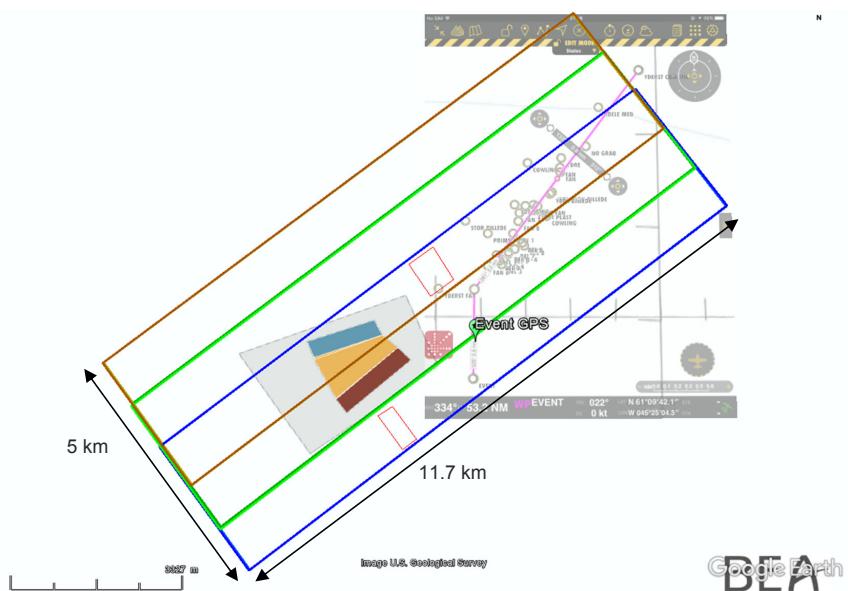


Figure 54 : couverture en bande X des six passages de mesure (vol aller)



Figure 55 : passages de mesure en bande L et UHF (P) - trajectoire de l'aéronef (vor retour)

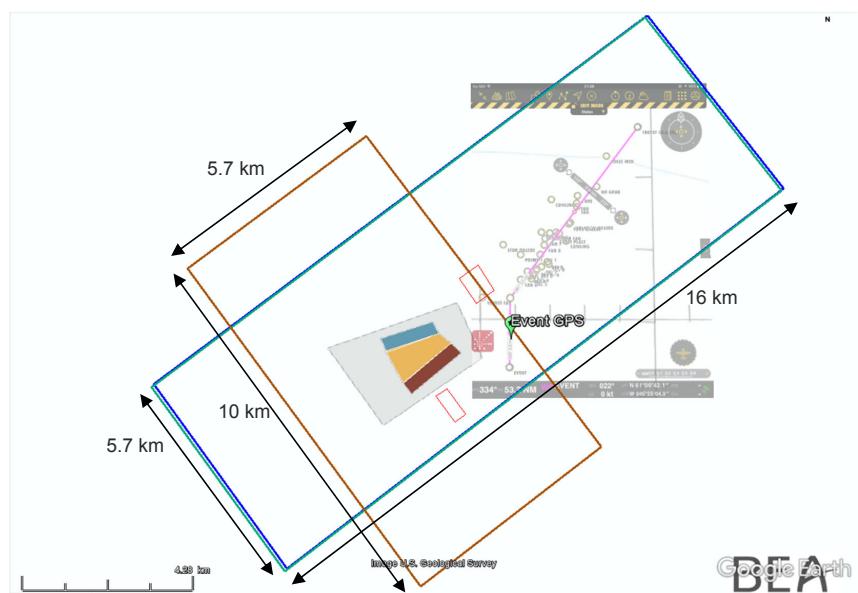


Figure 56 : couverture en bande L et UHF (P) des trois passages de mesure (vol retour)

Le post-traitement des données a révélé ce qui suit :

- Le trièdre a pu être détecté avec la bande X. La sphère a été détectée avec les bandes UHF (P) et X. Le moyeu de test n'a pas pu être détecté à ce moment-là, que ce soit avec les bandes X, L ou UHF (P).
- Plusieurs filtres ont été testés sans réelle amélioration. Les images ont été analysées visuellement (pour information, une image en bande P pèse 1,6 Go (11 630 x 18 229 pixels), une image en bande L pèse 1,3 Go (9 000 x 18 711 pixels) et une image en bande X pèse 13 Go (22 135 x 76 000 pixels).

- La zone de recherche se trouve sur un champ de crevasses, clairement visible avec les bandes L et UHF (P), et à peine visible avec la bande X (voir la figure 57). Une analyse dans la zone des crevasses a montré que la bande UHF (P) pouvait pénétrer la calotte glaciaire/le manteau neigeux d'au moins 15 m, la bande L d'au moins 3 et 5 m, et il a été estimé que la bande X détectait uniquement la surface (ou pénétrerait une faible quantité de neige en surface).
- Plusieurs « *candidats* » ont été identifiés. Le travail consistait alors à distinguer les vrais des faux candidats, en observant les images dans leur ensemble, et à gagner en fiabilité dans le processus de détection.

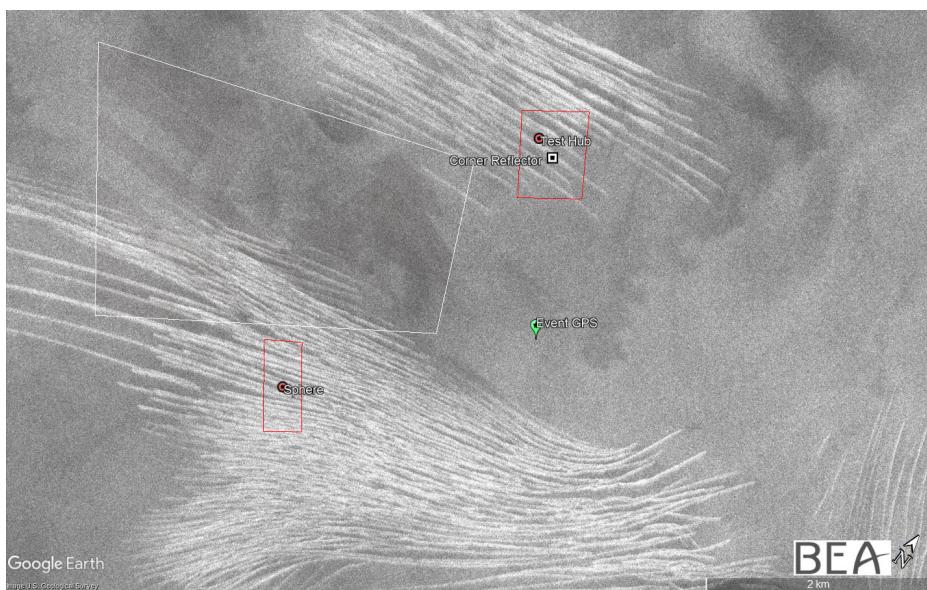


Figure 57 : zone de recherche avec crevasses vue avec la bande P

3.4.4 Seconde série de vols de mesure (du 10 au 11 avril 2018)

L'objectif de la deuxième série de vols de recherche était d'effectuer les passages de mesure au-dessus de la zone de recherche qui n'avaient pas encore été réalisés, afin de compléter les données enregistrées.

Afin d'obtenir une meilleure probabilité de détection dans les crevasses, le radar a été reconfiguré avec un angle de dépression de 50° au lieu de 40° pour la bande L. La bande UHF(P) est restée configurée avec un angle de dépression de 45°.

Le premier vol de cette deuxième série a été effectué le 10 avril avec des mesures en bande UHF (P) et L. La trajectoire de l'aéronef est illustrée à la figure 58. La couverture radar correspondante est illustrée à la figure 59. En raison des conditions météorologiques, l'aéronef n'a pas pu redécoller le même jour que le premier vol. Le vol suivant a été effectué le lendemain, le 11 avril, durant la matinée. Les conditions météorologiques ont permis un vol local (figure 60) et l'acquisition des données des six passages manquants en bande X (figure 61). L'avion a de nouveau atterri à UAK.

Enfin, l'avion a redécollé d'UAK le même jour pour le vol retour vers SFJ, juste avant que les conditions météorologiques ne se dégradent rapidement (figure 62). Ce troisième vol de la série était dédié à la calibration, avec un angle de dépression radar de 50°. Des passages ont à nouveau été effectués au-dessus du trièdre, qui était disposé sur le parcours de golf à cette fin. La trajectoire du vol de calibration est illustrée à la figure 63.



Figure 58 : premier vol de la série (SFJ-UAK) : cinq passages en bande UHF (P) et L

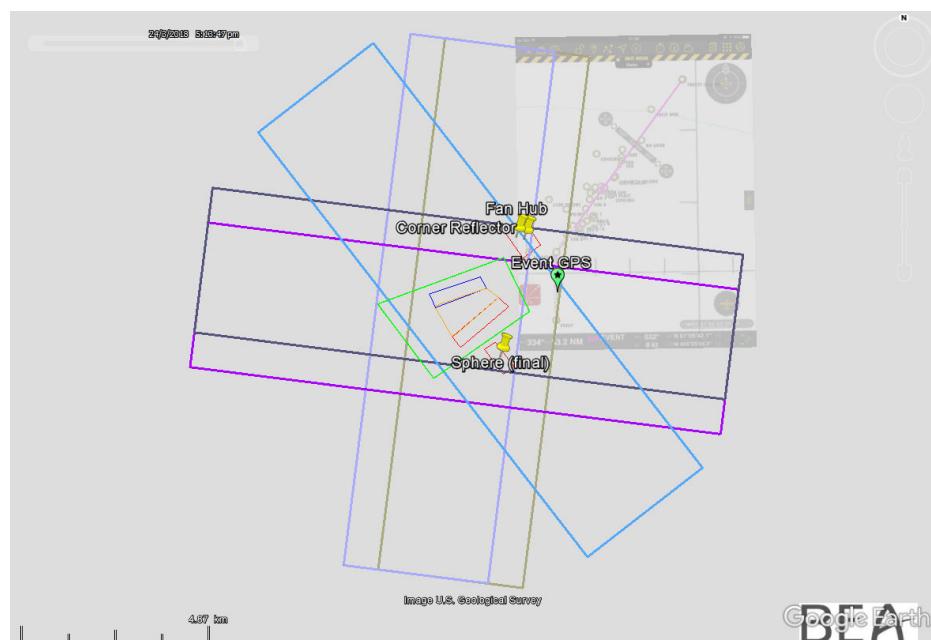


Figure 59 : couverture en bandes UHF(P) et L, deuxième série de vols



Figure 60 : deuxième vol de la série (UAK-UAK), six passages en bande X - trajectoire de l'aéronef

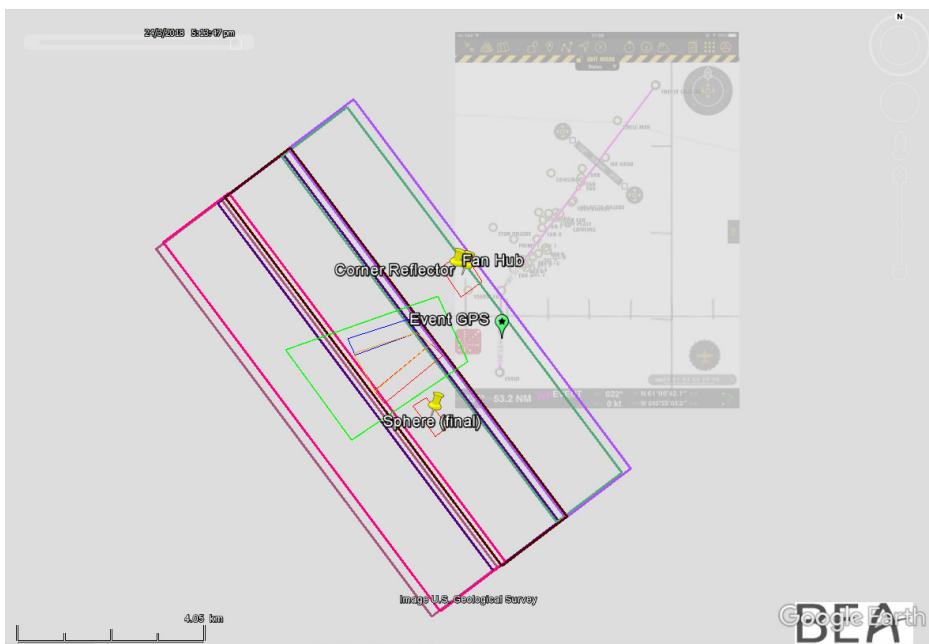


Figure 61 : couverture en bande X, deuxième vol de la série

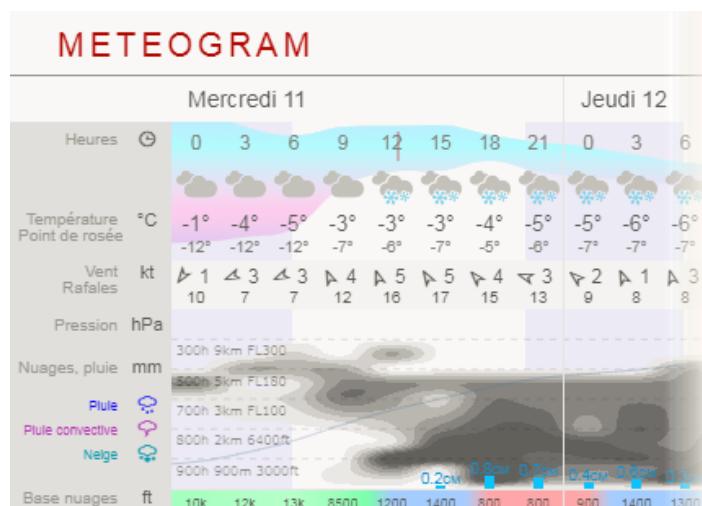


Figure 62 : prévisions météorologiques du 11 avril, mises à jour le matin même



Figure 63 : troisième vol de la série, calibration au-dessus de Kangerlussuaq

Le post-traitement des données a commencé immédiatement après l'atterrissement de l'aéronef et le déchargement des enregistrements.

Après la deuxième série de vols, l'ONERA a établi que :

- Le radar en bande X n'a pas pénétré la neige autant que prévu (même si la pénétration dans la neige pendant le vol de validation était satisfaisante) - il a été suggéré que les performances de la bande X au-dessus de la zone de recherche étaient dues aux caractéristiques de la neige.
- Les radars en bandes P et L ont pénétré dans la calotte glaciaire et ont détecté les crevasses dans la zone de recherche.
- Le bruit de fond ambiant sur les images empêchait les algorithmes de recherche automatique de détecter les cibles, le rapport de contraste n'étant pas assez élevé.
- La bande X a détecté le trièdre et la sphère.
- Les bandes L et P ont détecté la sphère.
- Le moyeu de test était toujours recherché dans l'ensemble de données du deuxième vol.

En raison du grand nombre de crevasses sur le terrain et du bruit de fond plus élevé que prévu, divers algorithmes ont été créés pour éliminer les détections non fiables et se concentrer sur les cibles potentielles. La profondeur a été sélectionnée comme critère de recherche (les cibles en dessous de 10 m de profondeur n'étaient plus prises en compte). Les images avec une direction de balayage parallèle aux crevasses ont été analysées de manière préférentielle pour fournir des cibles indépendantes des caractéristiques des crevasses.

Plusieurs zones d'intérêt ont été identifiées, mais un traitement et une analyse plus poussés étaient encore nécessaires pour vérifier leur validité.

3.4.5 Troisième série de vols de mesure (le 14 avril 2018)

L'objectif principal de la troisième et dernière série de vols était d'effectuer des passages de radar interférométrique⁽¹⁵⁾ au-dessus de la zone afin d'obtenir des informations sur la hauteur des cibles détectées à l'aide d'une autre technique, et de déterminer si la hauteur pouvait être utilisée comme fonction discriminante pour la détection (les couches de glace auront une altitude inférieure à celle du pixel contenant le moyeu).

En gardant cela à l'esprit, il a été décidé de réaliser des passages de mesure en bande UHF(P) et L avec les caps suivants : 008°, 143° et 323°. Le radar a été reconfiguré avec un angle de dépression de 40° pour la bande L et la bande UHF(P) est restée configurée avec un angle de dépression de 45°. L'altitude a été modifiée entre les passages en gardant le même cap pour permettre une analyse interférométrique (l'altitude du premier passage était de 18 100 pieds, celle du deuxième passage de 17 100 pieds et celle du troisième passage de 17 940 pieds).

La trajectoire du vol aller (Kangerlussuak - zone de recherche - Narsarsuaq) est indiquée en rouge dans les figures 64 et 65. La figure 65 illustre également la couverture radar pour ce vol.

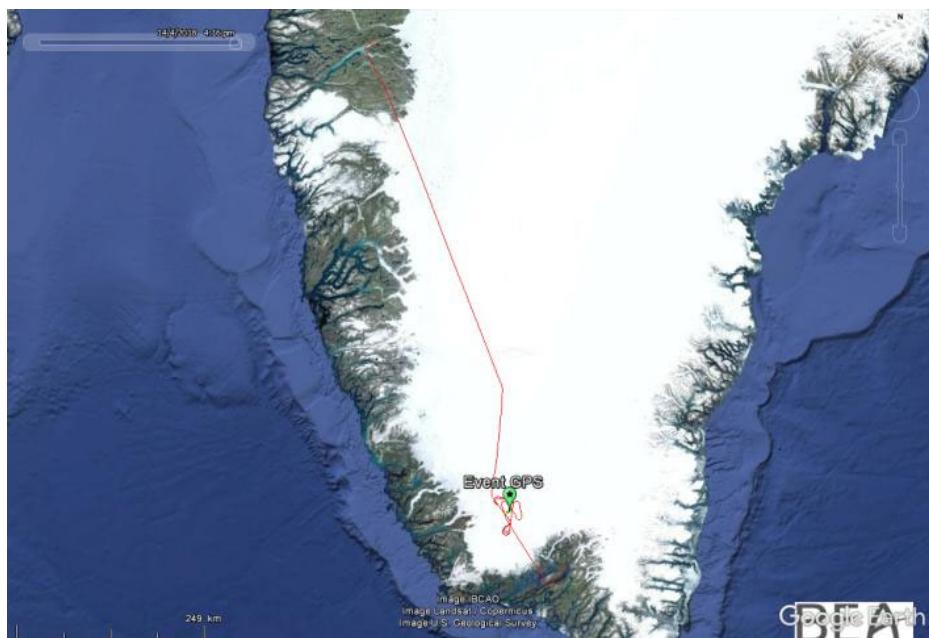


Figure 64 : trajectoire du premier vol pour les mesures interférométriques

⁽¹⁵⁾L'interférométrie est une famille de techniques dans lesquelles les ondes se superposent, provoquant le phénomène d'interférence, afin d'extraire des informations.

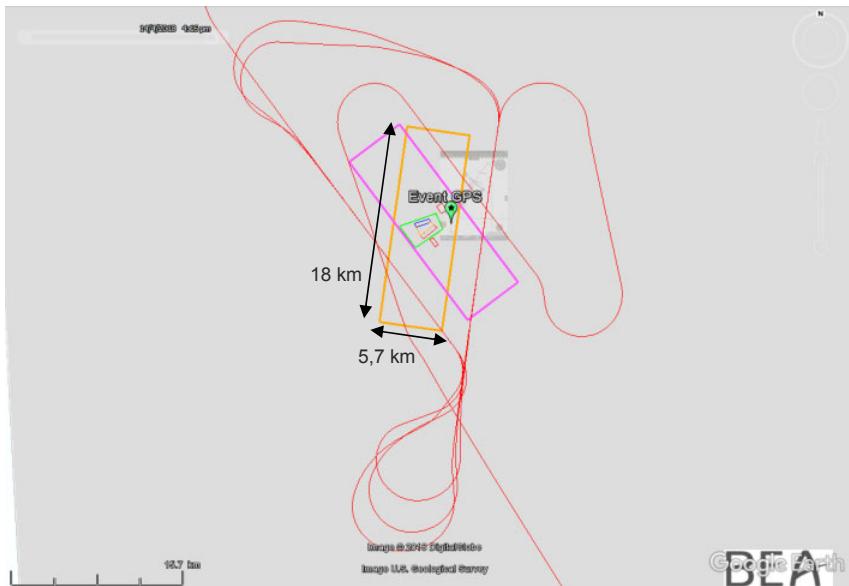


Figure 65 : couverture en bandes UHF(P) et L et première trajectoire de vol pour les mesures interférométriques

Le vol de retour (Narsarsuaq - zone de recherche - Kangerlussuaq) a été effectué le même jour. Les trajectoires et la couverture radar sont présentées aux figures 66 et 67.

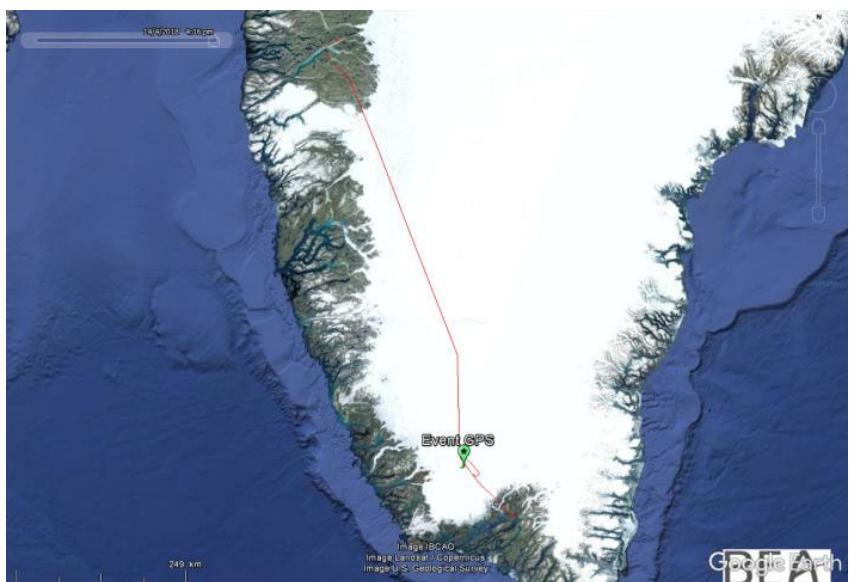


Figure 66 : trajectoire du deuxième vol pour les mesures interférométriques



Figure 67 : couverture en bandes UHF(P) et L et trajectoire du deuxième vol pour les mesures interférométriques



Figure 68 : Falcon 20 Avdef équipé de ses deux pods radar, de retour à l'aéroport de Kangerlussuaq

Le post-traitement des données a commencé immédiatement après l'atterrissement de l'aéronef et le déchargement des données. Après la série de vols n° 2, 11 points ont été retenus comme des cibles potentielles. Il s'agit de ceux qui étaient communs aux trois images de polarisation avec des caps différents, communs aux bandes radar P et L et d'une profondeur inférieure à 10 m, mais aucun n'était situé dans la zone de recherche prédefinie.

Un fragment de moyeu pouvant ne pas refléter les ondes radar dans toutes les directions, puisqu'il ne s'agit que d'une partie d'un moyeu, il a été demandé à l'ONERA de refaire l'analyse en recherchant les points communs dans deux des trois images de polarisation uniquement, et non plus les points communs aux trois images comme précédemment.

Avec ce nouveau critère, de nouvelles cibles ont été identifiées dans la zone de recherche, mais une confirmation de la pertinence de ces cibles faisait toujours l'objet d'analyses les jours suivants au moyen de techniques de traitement avancées (figure 69).

Après les trois séries de vols, les pods ont été retirés de l'aéronef pour son vol de retour vers la France. Le post-traitement et l'analyse des données se sont poursuivis avant et pendant l'opération de recherche au sol effectuée par l'équipe GEUS (voir le chapitre suivant) afin de lui communiquer des informations mises à jour si nécessaire.



Figure 69 : points potentiels dans la zone de recherche, analysés plus avant pour confirmation et établissement de leur pertinence

3.5 Camp Recovery

3.5.1 Introduction

La campagne au sol de GEUS avait pour objectif d'atteindre les cibles de l'ONERA, de confirmer la détection avec un GPR, de creuser un trou au niveau du site de détection pour déterminer ce qui se trouvait sous la neige si la détection était confirmée par le GPR et, si un fragment de moyeu de soufflante était découvert, de le récupérer et de la transporter à l'aéroport de Narsarsuaq.

Si aucune détection de l'ONERA n'était confirmée comme étant un débris, le plan alternatif consistait à effectuer une recherche à l'aveugle avec le GPR, dans toute la zone de recherche, en se concentrant d'abord sur les zones prioritaires, puis sur les zones secondaires et tertiaires, telles que définies au paragraphe 3.3.4.

L'approche finale de l'ONERA en matière de détermination des cibles consistait à retenir des cibles qui :

- répondaient aux bandes P et L et n'étaient pas trop directionnelles (c'est-à-dire qui répondaient à au moins deux caps) ;
- se situaient à une profondeur inférieure à 10 m par rapport au modèle numérique d'altitude ICESAT⁽¹⁶⁾.

⁽¹⁶⁾ Le modèle numérique d'altitude (MNA) ICESAT est un modèle de détermination de l'altitude d'un terrain qui a été utilisé par l'ONERA pour calculer la profondeur des cibles sous la surface (voir le site <https://nsidc.org/data/nsidc-0305> et (DiMarzio, 2007) pour plus d'informations).

Les coordonnées GPS des cibles les plus cohérentes de l'ONERA ainsi obtenues étaient les suivantes :

NOM LAT LONG
Cible_01 61.745517° -46.880175°
Cible_02 61.744321° -46.871506°
Cible_03 61.744267° -46.871818°
Cible_04 61.735043° -46.868160°
Cible_05 61.746310° -46.830680°
Cible_06 61.764459° -46.818955°

La figure 70 illustre les emplacements des cibles ainsi que les zones de recherche pour la recherche à l'aveugle. Les coordonnées des cibles ont été transmises à la GEUS. Selon l'ONERA, un cercle de 5 m de rayon devait être pris en compte comme incertitude de mesure.

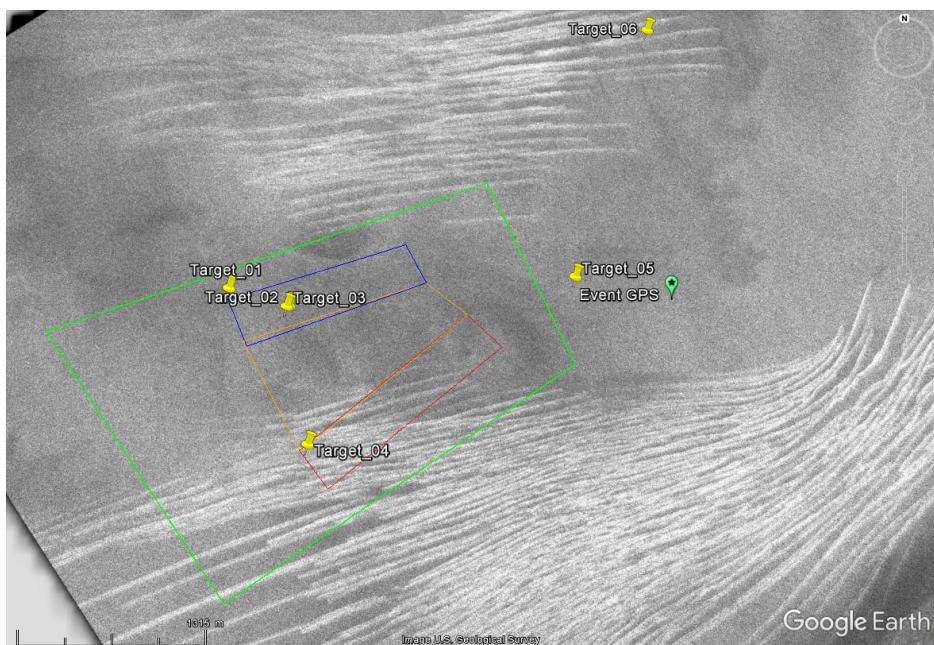


Figure 70 : cibles identifiées par l'ONERA, communiquées à l'équipe GEUS. L'image d'arrière-plan est une image radar fournie par l'ONERA à partir de la campagne de mesure, montrant des champs de crevasses bien marqués.

Le planning prévu pour la campagne au sol était le suivant :

1. Identification formelle du moyeu de test avec les moyens de détection disponibles (GPR).
2. Vérification des cibles 01 à 03 comme cibles prioritaires (en partant du principe que le balayage par GPR du moyeu de test avait déjà été effectué et s'était révélé fructueux...).
3. Vérification de la cible 04, si l'évaluation de la sécurité est favorable, cette cible se trouvant au-dessus d'un champ de crevasses.
4. Recherche à l'aveugle dans les deux premières zones prioritaires (rectangles bleus et rouges) - pour le rectangle rouge, il a été demandé à GEUS de s'appuyer sur son évaluation de sécurité pour réaliser son balayage (si toute la zone était sûre ou seulement une partie de celle-ci).

5. Balayage de la deuxième zone prioritaire (orange) (même principe que le rectangle rouge en matière de sécurité).
6. Vérification de la cible_05.
7. Si rien n'a été trouvé jusqu'alors, achèvement du balayage de la troisième zone prioritaire.
8. S'il restait du temps, vérification de la cible_06 (avec le même souci de sécurité).

L'ONERA a fourni à GEUS un fichier GEOTIFF du terrain balayé, indiquant l'emplacement des champs de crevasses. Ce fichier a aidé GEUS à effectuer son évaluation de sécurité.

Un back-office a été mis en place à Narsarsuaq, dans le sud du Groenland, à compter du 24 avril. L'équipe était composée de deux enquêteurs de sécurité du BEA (dont un métallurgiste), un enquêteur de sécurité du NTSB, un enquêteur de sécurité de l'AIB-D et un conseiller d'EA. Le rôle de ce back-office consistait à recevoir, examiner et gérer les pièces récupérées, le cas échéant, et à conseiller ou réorienter la campagne sur le terrain si nécessaire.

Presque tous les jours, lorsque cela était possible (la communication étant parfois difficile depuis cette région reculée), GEUS envoyait un rapport journalier à l'AIB-D, qui était transmis au back-office de Narsarsuaq. Un résumé des activités de la campagne au sol et du back-office est présenté au chapitre suivant.

3.5.2 Déroulement de la mission

Les premiers membres de l'équipe GEUS ont atterri à Narsarsuaq le 17 avril 2018. Les trois premiers jours ont été consacrés à la logistique : réunion avec les pilotes d'hélicoptère, emballage du matériel (bouteilles de propane, carburant, motoneiges, groupes électrogènes, matériel personnel et scientifique, nourriture) et chargement des élingues.

Le 19 avril, deux élinguées ont été placées sur la calotte glaciaire par hélicoptère.

Le même jour, 250 kg de fret et une motoneige ont été chargés à bord d'un Twin Otter de Norlandair. Le lendemain, il a transporté deux passagers et la cargaison jusqu'au site. L'avion est retourné à Narsarsuaq où il a récupéré une autre motoneige, 300 kg de fret et deux autres passagers. Après un autre aller-retour, le reste de la cargaison et les deux derniers passagers ont été transportés depuis Narsarsuaq jusqu'au site. Toute la cargaison et six personnes se trouvaient sur la calotte glaciaire le 20 avril à 13 heures. L'équipe a monté une tente de cuisine, une tente de toilette, une tente scientifique et les tentes de couchage individuelles, organisé le chargement, éloigné le carburant du camp, mis en place une zone cargo et installé un câble de protection contre les ours polaires autour du lieu de couchage. La figure 71 offre un bon aperçu du camp.

Le lendemain (21 avril), le groupe électrogène a été mis en route et les batteries du radar ont été chargées. La sécurité dans le camp a été améliorée : l'équipe a testé les fusils, mis en place des drapeaux pour pouvoir s'orienter en cas de voile blanc et installé un câble de protection contre les ours polaires autour des tentes de cuisine et scientifiques.

Un carottage de 3,1 m a été creusé dans la neige pour obtenir une mesure précise de la densité de la neige, qui était nécessaire au calcul de la profondeur des signaux radar (figure 72). Le radar a été mis sous tension et testé autour du camp.

Le 22 avril, les tests du radar se sont poursuivis, et les données de la veille ainsi que les mesures de densité ont été analysées. Quatre personnes se sont rendues sur l'un des champs de crevasses identifiés par le radar aéroporté. À l'aide de cordes, une personne a traversé de manière sécurisée une crevasse avec le radar. De retour au camp, l'analyse des données n'a révélé aucun signe de crevasses dans les premiers 60 mètres de profondeur, ce qui signifie qu'elles étaient probablement remplies de neige. Un traîneau permettant de tirer les radars derrière la motoneige a ensuite été construit.

Pour éviter que la neige s'amonceille dans les tentes, des murs de neige ont été construits autour des tentes.



Figure 71 : camp recovery - tente de couchage (premier plan), tente de cuisine et scientifique (arrière-plan) - des drapeaux sont utilisés pour s'orienter en cas de voile blanc (références photographiques : GEUS)



Fig. 72: échantillons de neige pour la mesure de la densité (références photographiques : GEUS)

Le 23 avril, le groupe électrogène a cessé de fournir de l'électricité. Heureusement, un groupe électrogène de secours était disponible. Malgré plusieurs tentatives de réparation, l'équipe a dû commander un groupe électrogène de rechange à Copenhague.

Dans l'après-midi, la cible ONERA n°5 a été vérifiée. Il s'agissait de la cible la plus proche du camp et GEUS pensait qu'il s'agissait d'une bonne occasion de tester le traîneau du radar dont la construction avait été achevée dans la matinée. Ils ont effectué un quadrillage dense de 20 m sur 20 m avec un espacement de 1 m, mais n'ont pas trouvé de signaux évidents les incitant à poursuivre leurs investigations. Pour aider à calculer la profondeur, ils ont creusé un autre trou dans la neige à une profondeur de 5,2 m afin d'obtenir une caractérisation détaillée de la densité de neige. Ils ont vu plusieurs lentilles de glace très épaisses. Deux d'entre eux se sont ensuite rendus sur le champ de crevasses situé à proximité, où le moyeu de test a été enfoui, et ils ont traversé plusieurs crevasses. Ils ont vu des crevasses enfouies à 40 m de profondeur, mais pas à l'endroit où le balayage radar aéroporté l'indiquait (en raison de la géométrie du radar, un écart d'altitude entraîne un écart apparent de localisation).

Sur la base de ce relevé, ils ont décidé que le niveau de sécurité étant suffisant pour pouvoir sortir en motoneige et récupérer le moyeu de soufflante enfoui et le trièdre. Le trièdre était trop proche de la surface pour apparaître sur le radar, mais le moyeu de soufflante de test était quant à lui bien visible (figure 73). Il apparaissait que l'antenne radar devait idéalement se trouver à moins d'un mètre du moyeu de soufflante pour que le signal soit clair ; les trajectoires radar ont dû être revues pour que le quadrillage soit densifié. Sur la base des résultats du moyeu de test, il a été déterminé que l'espacement entre les passes était trop large pour permettre une détection fiable. L'espacement entre les passes a été réduit à 2 m et finalement à 1 m.

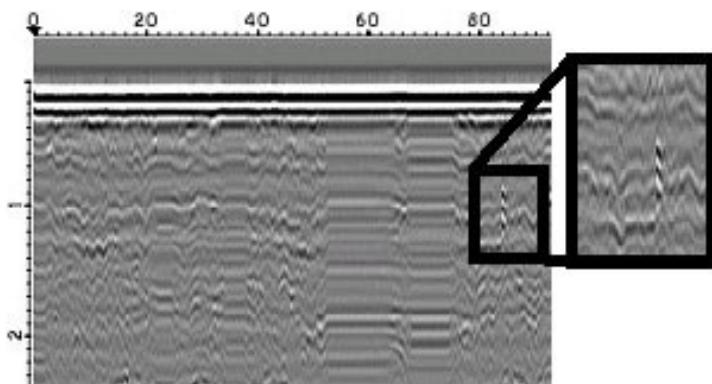


Figure 73 : signal du moyeu de test sur l'imagerie GPR

Le 25 avril, une équipe a vérifié les sites n° 1 et 2. Aucune détection n'a été obtenue avec le GPR. L'équipe a décidé de vérifier si les paramètres du radar étaient optimisés et a de nouveau enfoui le moyeu de test à une profondeur d'environ 2,5 m, pour s'en servir comme point de test. Ils ont traversé le site d'enfouissement à plusieurs reprises et pouvaient identifier un signal la plupart du temps. Malheureusement, ils ont également obtenu des faux positifs et ont donc décidé de continuer à optimiser les paramètres de détection.

Après avoir testé différentes approches, ils ont établi qu'une fréquence de 250 MHz offrait les résultats les plus cohérents.

Le lendemain, ils sont retournés aux cibles 1, 2 et 3 et ont réalisé un quadrillage dense avec l'antenne de 250 MHz.

Afin de mieux comprendre les données fournies par l'ONERA, ils ont étudié les propriétés de la neige en forant une carotte à 11 m de profondeur. Ils ont vu des lentilles de glace très épaisses, certaines mesurant jusqu'à 60 cm d'épaisseur, indiquant une fonte substantielle en été.

Le 27 avril, l'équipe est retournée aux cibles n° 1, 2 et 3 pour les examiner à nouveau avec des quadrillages radar plus denses et des orientations de passes différentes afin de s'assurer que ces trois sites pourraient être définitivement écartés. La zone de recherche prioritaire nord a ensuite été marquée en prévision d'une recherche systématique (zone bleue prioritaire de la figure 75).

En prévision d'une tempête de neige, l'équipe a construit des murs de neige autour de toutes les tentes et a sécurisé le camp.

Le 28 avril, l'équipe GEUS a décidé de poursuivre l'acquisition radar en dépit des mauvaises conditions météorologiques. Deux détections proches des cibles n° 2 et 3 ont été observées. Le forage de ces deux signaux les plus prometteurs, à une profondeur de 2,5 à 3 m, n'a révélé que des lentilles de glace très épaisses.

À ce moment-là, aucune cible de l'ONERA n'ayant été confirmée comme étant un débris, l'équipe du back-office a décidé de transformer la campagne au sol en recherche systématique à l'aveugle. Cependant, étant donné la nécessité d'un quadrillage radar plus dense que prévu (voir un exemple de balayage en quadrillage dense à la figure 74), et compte tenu des contraintes de temps, il était nécessaire de définir pour une recherche systématique des zones prioritaires moins étendues par rapport aux zones prioritaires initiales. Il était évident que les zones prioritaires initiales telles que définies à la figure 75 étaient trop étendues pour pouvoir être passées en revue avant la fin de la campagne.

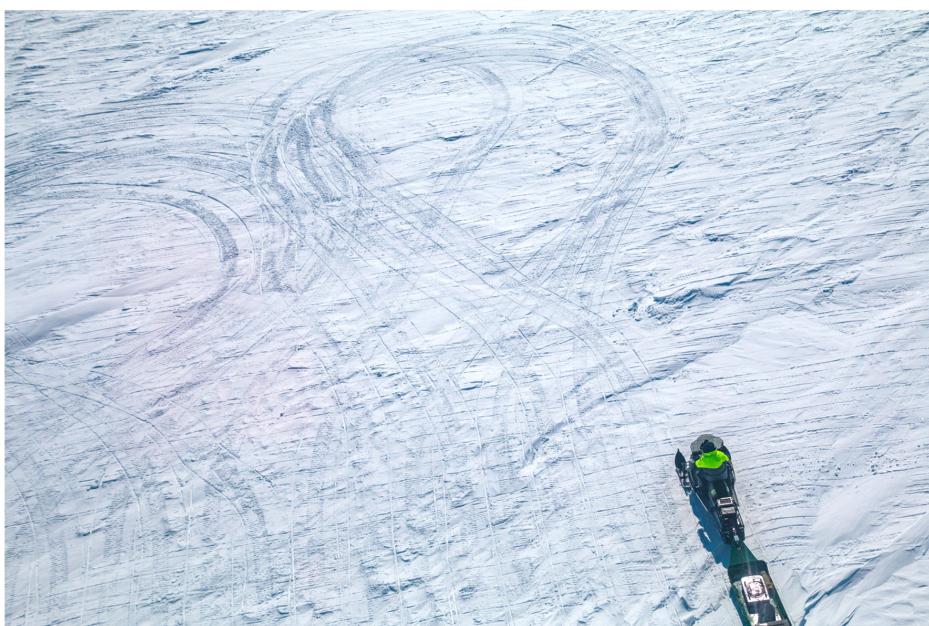


Figure 74 : balayage en quadrillage dense

La taille probable des fragments de moyeu décrits au paragraphe 3.1.3 et les résultats des calculs d'Ariane et du NTSB (voir les paragraphes 2.3 et 2.4) ont été pris en compte pour affiner les zones de recherche. La figure 76 montre les nouvelles zones obtenues, appelées zones A, B, C et D. Les zones A et B sont devenues les zones avec la priorité la plus élevée.

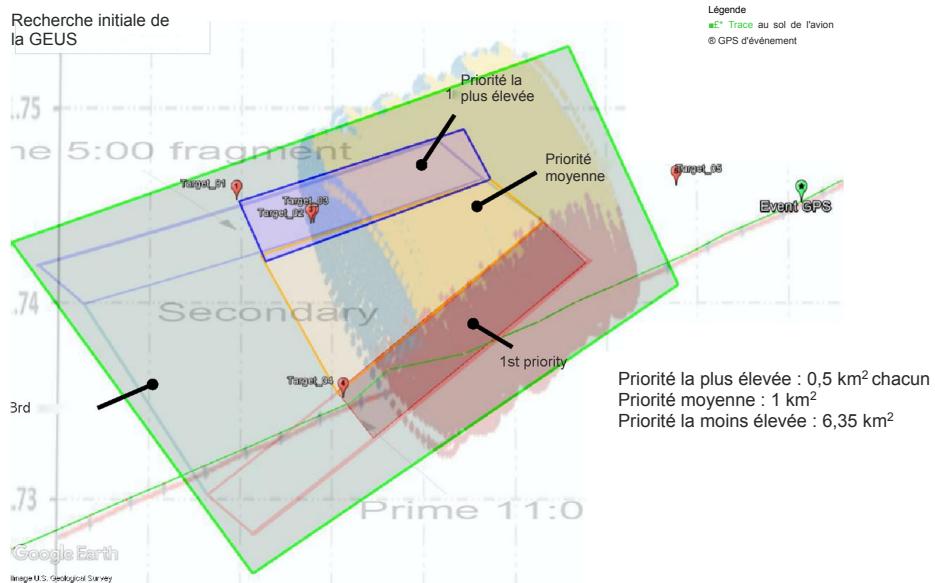


Figure 75 : zones de recherche initiales

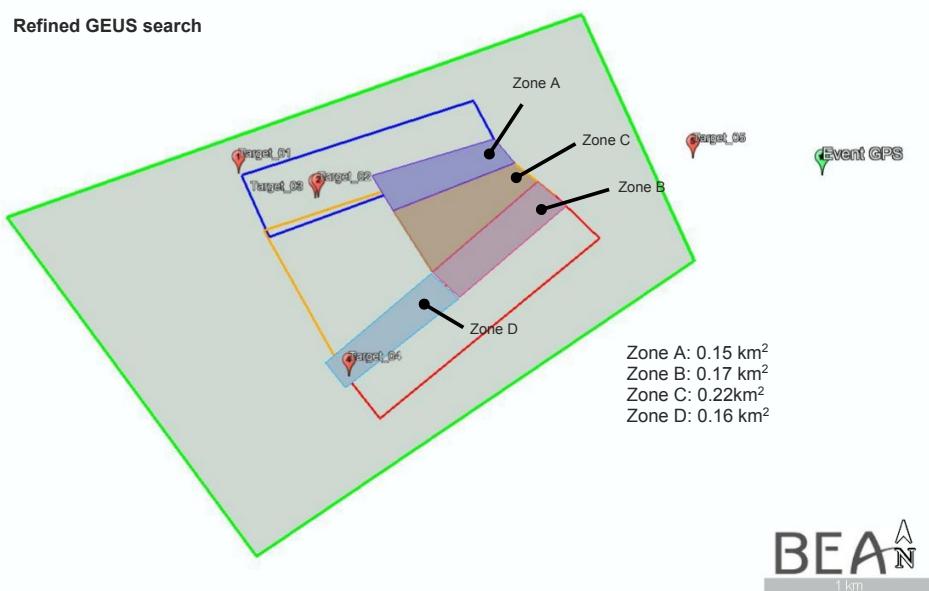


Figure 76 : zones de recherche affinées

Le groupe électrogène de rechange a finalement été livré par hélicoptère le 29 avril. L'équipe du back-office a profité de ce vol en hélicoptère pour fournir à GEUS les coordonnées mises à jour de la zone de recherche. Les quelques jours suivants ont été consacrés au balayage radar en quadrillage dense de la zone A.

En parallèle, l'évaluation de la sécurité du champ de crevasses sud a été lancée afin de déterminer si l'extension de la recherche dans cette région était réalisable. Au premier abord, les crevasses semblaient remplies de neige.

Le 2 mai, GEUS a remarqué que les nouvelles zones de recherche étaient déterminées par rapport au mois d'octobre 2017 et que la glace avait bougé d'environ 30 à 40 m depuis lors, en direction du sud-ouest. Cela signifiait que 15 % de la zone qui avait été l'objet des recherches au cours des deux jours précédents se situait en dehors de la zone de recherche principale (au nord, dans la zone de recherche principale précédente, de sorte que le temps n'a pas été entièrement perdu), mais aussi que 15 % de la partie la plus méridionale de la nouvelle région « *principale* » n'avait pas été balayée. Après avoir constaté cette erreur, les extrémités de la zone de recherche ont été ajustées en considérant la vitesse moyenne annuelle de 2016 (MEaSUREs NSIDC 0725)⁽¹⁷⁾.

⁽¹⁷⁾<https://nsidc.org/data/nsidc-0725>
voir §3.1.2

Le 4 mai, deux trous ont été creusés, chacun d'une profondeur de 2,5 m et d'une largeur d'environ 2 m, après l'identification de signaux inhabituels au radar. L'un contenait une lentille de glace épaisse mais localisée qui a probablement provoqué l'élément d'intérêt sur le radar, et l'autre ne contenait rien qui ne revête d'intérêt particulier. Le même jour, la recherche dans la zone principale nord (zone A) a été effectuée, sans résultat.

Le 7 mai, l'équipe a réalisé une évaluation de la sécurité du champ de crevasses sud. À la suite de celle-ci, GEUS a décidé de ne pas étudier la zone D et d'éliminer le coin sud-ouest de la zone B. Dans la zone D, le champ de crevasses était en train de s'ouvrir et de nombreuses crevasses affleuraient à moins de 3 m de la surface environ. Leur largeur était apparemment d'environ 5 à 7 m et l'absence de stratification visible des crevasses signifiait qu'elles étaient potentiellement remplies d'air. Dans le coin sud-ouest de la zone B, une grande crevasse s'étendait à moins de 6 m de la surface, mais toutes les couches situées au-dessus présentaient un affaissement, suggérant une large crevasse et/ou un manteau neigeux plus fragile au-dessus de celle-ci.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les crevasses situées au sud étaient récentes et en train de s'ouvrir, et affleuraient jusqu'à proximité de la surface, tandis que les crevasses situées au nord, étaient anciennes et en train de se refermer, et avaient environ 10 ans (40 m) de neige accumulée par-dessus. Il était plus sûr de travailler au-dessus de ces dernières. Toutes ces crevasses semblaient être des crevasses de tension.

Le 8 mai, l'équipe a exploré la zone B, à l'exception du coin sud-ouest où se trouvaient les crevasses. Elle a commencé à étudier le coin nord-ouest de la zone D après avoir déterminé qu'il ne présentait aucun danger. Elle a par ailleurs également commencé à étudier la zone C.

Une cible avait été identifiée dans les données recueillies la veille dans la zone B, mais ressemblait aux cibles précédentes, qui se sont révélées être des lentilles de glace. Cette cible a été creusée le 9 mai, sur 2,5 m de profondeur, 2 m de largeur et 6 m de longueur, pour ne trouver au final que de la neige et de la glace.

Les 9 et 10 mai, l'équipe a terminé les recherches dans le coin nord-est de la zone D et a continué par la zone C. Aucune cible d'intérêt n'a été identifiée.

Le nouvel emplacement du moyeu de test a été enregistré en vue d'une opération de recherche ultérieure via un GPS portatif, selon les coordonnées suivantes : N 61,74631° W46,83067°. Il a été enseveli sous 2,7 m de neige, avec sa surface concave (intérieure) orientée vers le nord-ouest. Son emplacement a été balisé à mi-chemin entre deux grands groupes de drapeaux, dont on pouvait espérer qu'ils soient visibles depuis l'espace sur des images haute résolution.

Aucune recherche supplémentaire n'a été effectuée car l'équipe a été confrontée à des conditions météorologiques extrêmes jusqu'à la fin de la campagne (voir le paragraphe 3.5.3). La couverture radar correspondante de la campagne au sol est illustrée à la figure 77. Elle représente environ 430 km de traces radar de 1 m de large.

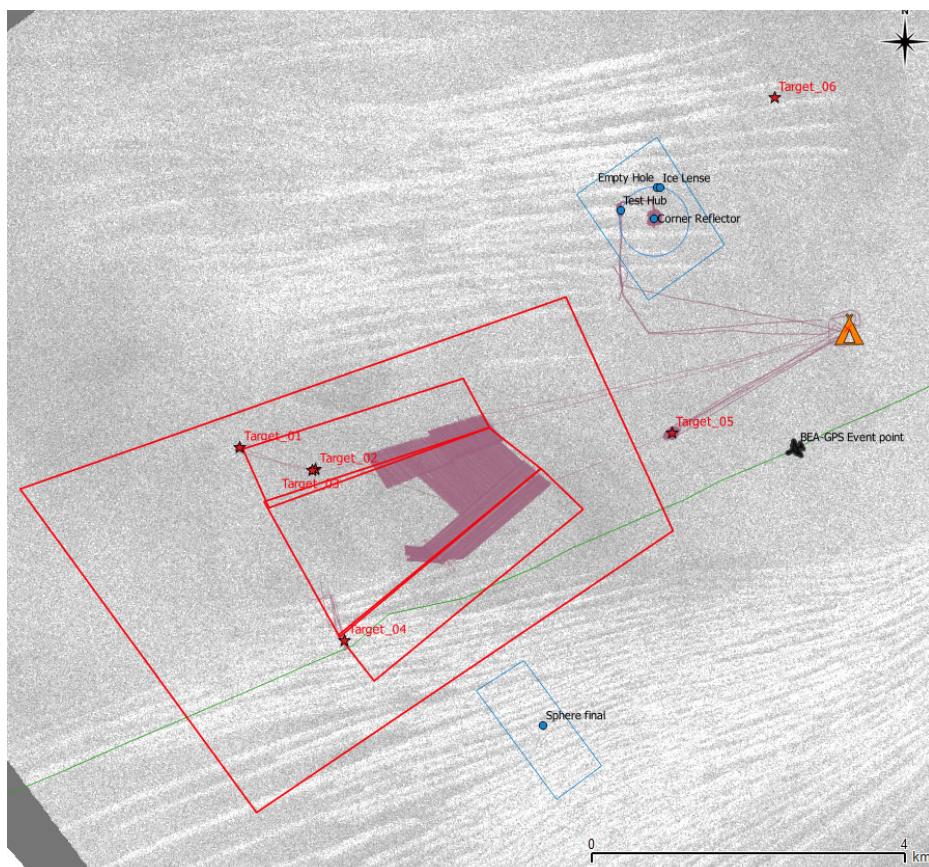


Figure 77 : couverture de recherche au sol (en violet) par l'équipe GEUS - l'arrière-plan est une image radar en bande P

3.5.3 Conditions météorologiques

La météo a posé problème à plusieurs reprises, car la journée commençait parfois avec des températures très basses (-30,5 °C, après le lever du soleil). De manière générale, la température au camp était 5 ou 10 °C plus froide que celle prévue dans le bulletin météo. Après une semaine au camp, l'équipe a décidé de repousser le début des opérations d'une heure pour éviter les matinées les plus froides, et de travailler plus tard le soir. Les rafales de neige posaient également un problème car les traces des motoneiges étaient recouvertes trop rapidement, de sorte qu'il n'était pas possible d'être sûr de se trouver sur la bonne ligne lors des passes avec un quadrillage dense de 1 m.

À titre d'exemple, la journée du 3 mai a commencé par une température de -30 °C, des vents de 10 m/s et une température ressentie de -50 °C. Personne n'a travaillé ce matin-là à cause des fortes rafales de neige et de l'effet du vent. Lorsque les vents se sont calmés (à 13 heures), les travaux ont démarré et se sont poursuivis par intermittence lorsque le temps le permettait, avec des températures de -20 °C et des vents de 5 m/s. Ils se sont terminés à 22 heures. Il a également fallu passer du temps à reconstruire les murs de neige en raison des prévisions météorologiques pour le lendemain, avec des vents estimés à 17 m/s. En effet, la journée du 4 mai a commencé avec des températures matinales de -25 °C, des vents réguliers de 18 m/s, et des rafales de plus de 21 m/s. Les vents se sont maintenus à plus de 15 m/s toute la journée. Ainsi, aucun travail au radar n'était possible en raison de la température ressentie et des rafales de neige. Les tentes elles-mêmes menaçaient d'être enfouies sous la neige qui s'amoncelait, et ont dû être déplacées. Au cours de ce type d'événement, le travail en équipe consistait à examiner des images de lignes radar existantes et à sélectionner des sites de fouille.

À la fin de la campagne, les 11 et 12 mai, l'équipe a fait face à des conditions météorologiques extrêmes (vents allant jusqu'à 25 m/s et fortes chutes de neige).

Certaines tentes ont été endommagées (poteaux tordus ou cassés, ouverture des fermetures à glissière occasionnant l'accumulation de neige à l'intérieur des tentes), d'autres ont été abandonnées le matin. Des conditions de voile blanc ont été rencontrées presque toute la journée. La visibilité était de 2 à 3 m seulement (zéro à un drapeau visible). Des cordes ont été utilisées pour guider les personnes des tentes de couchage à la tente de cuisine. La tente de toilette s'est renversée et s'est effondrée.

Une fois que les vents se sont calmés, l'équipe a finalement quitté la calotte glaciaire le 14 mai. Certains membres de l'équipe y sont retournés le 15 mai pour terminer le démontage du camp, charger le matériel dans un Twin Otter et préparer les élingues pour les derniers vols en hélicoptère.



Figure 78 : visibilité dans le camp lors d'une tempête de neige avec un vent violent - Références photographiques : GEUS

3.5.4 État de la glace

Au cours de la campagne sur le terrain, des signes de fortes variations des chutes de neige ont été observés sur des échelles spatiales relativement limitées, ce qui est probablement dû à la redistribution de la neige par le vent. Par exemple, en septembre 2017, la surface a été identifiée à une profondeur approximative de 1,5 m à proximité du camp, mais cette profondeur n'était quasiment plus que de 1 m à seulement 1,4 km du camp. Cette variation de profondeur était tout aussi visible dans les données radar. GEUS a identifié de multiples lentilles de glace avec des étendues spatiales variables et à des profondeurs différentes. La taille des lentilles de glace variait de quelques centimètres à 60 cm sur un plan vertical et dépassait souvent 1 mètre sur un plan horizontal. Les données radar indiquaient que ces lentilles de glace étaient répandues dans la majeure partie de la zone de l'étude et que leur taille et leur distribution variaient apparemment de manière aléatoire. Enfin, des études par le biais de trous dans la neige ont révélé des signes évidents de percolation avec des conduites de glace gelées dans le manteau neigeux. Ces conduites sont un mécanisme de transport de l'eau liquide tandis qu'elle s'infiltre vers le bas dans la neige.

4 - CONCLUSIONS

Malgré la quantité de travail et les efforts déployés pour les opérations décrites ci-dessus, les fragments de moyeu de soufflante n'ont pas pu être détectés de manière fiable à la fin du mois de juin 2018.

La technologie SAR opérée par l'ONERA est une technologie expérimentale et son déploiement au-dessus de la calotte glaciaire pour détecter des pièces enfouies sous la neige était une première. En dépit des conditions météorologiques difficiles, aucun comportement inattendu ni aucun dysfonctionnement des composants n'a été observé. Toutefois, en raison des niveaux de bruit de fond du terrain plus élevés et de la pénétration plus faible que prévu des ondes radar de la bande X dans la zone de recherche, aucune cible présentant un indice de confiance élevée n'a été détectée dans l'intervalle de temps relativement court avant la campagne au sol de GEUS. L'ONERA a finalement indiqué six cibles à GEUS pour sa campagne au sol, avec un indice de confiance modéré. Un traitement plus poussé a été lancé afin d'améliorer la qualité des détections radar.

Dans la mesure où la campagne au sol de GEUS reposait sur les détections de cibles issues de la campagne aéroportée de l'ONERA, une fois que les six cibles fournies ont été examinées sans succès, elle a dû être reconvertisse en campagne de recherche systématique. Malheureusement, le GPR s'est avéré être un détecteur inadéquat pour une recherche systématique. Même avec 430 km de traces radar analysées, il n'a pas pu être certifié que si la pièce s'était trouvé sous ces traces, elle aurait été détectée.

Ces informations ont été analysées de manière approfondie et ont conduit à envisager la poursuite des travaux.

5 - POURSUITE DES TRAVAUX

L'équipe de l'ONERA a continué à traiter les images radar acquises au cours de l'opération GREENSAR après son retour en France. En novembre 2018, le processus était toujours en cours, car l'ONERA profitait de capacités de calcul plus importantes dans ses installations que celles avec lesquelles elle s'était rendue au Groenland. De nouveaux algorithmes spécifiques ont permis de détecter le moyeu de test dans la bande X, ce qui était un résultat prometteur par rapport à ce qui avait été jugé possible juste après la campagne sur le terrain.

L'équipe a estimé qu'il était nécessaire de tester de nouveaux capteurs avec une fauchée plus large et une réponse plus sûre, pour de nouvelles recherches au sol potentielles, à mener plus tard en 2019.

REFERENCES

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.

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

