

Bureau de la sécurité des transports
du Canada



Transportation Safety Board
of Canada

RAPPORT D'ENQUÊTE AÉRONAUTIQUE A14O0165



**PERTE DE MAÎTRISE
EXPRESSJET AIRLINES
EMBRAER EMB-145LR, N16954
LONDON (ONTARIO), 53 NM OUEST
5 SEPTEMBRE 2014**

Canada

Bureau de la sécurité des transports du Canada
Place du Centre
200, promenade du Portage, 4^e étage
Gatineau QC K1A 1K8
819-994-3741
1-800-387-3557
www.bst.gc.ca
communications@bst-tsb.gc.ca

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par
le Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2016

Rapport d'enquête aéronautique A14O0165

No de cat. TU3-5/14-0165F-PDF
ISBN 978-0-660-05758-3

Le présent rapport se trouve sur le site Web
du Bureau de la sécurité des transports du Canada
à l'adresse www.bst.gc.ca

This report is also available in English.

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a enquêté sur cet événement dans le but de promouvoir la sécurité des transports. Le Bureau n'est pas habilité à attribuer ni à déterminer les responsabilités civiles ou pénales.

Rapport d'enquête aéronautique A14O0165

Perte de maîtrise

ExpressJet Airlines

Embraer EMB-145LR, N16954

London (Ontario), 53 nm ouest

5 septembre 2014

Résumé

L'Embraer EMB-145LR (immatriculé N16954, numéro de série 145072) exploité par ExpressJet Airlines en tant que vol numéro 4538 a décollé de Grand Rapids (Michigan) pour effectuer un vol selon les règles de vol aux instruments à destination de l'aéroport international Newark Liberty, à Newark (New Jersey). Après le départ, l'aéronef s'est déroulé au nord de sa route prévue pour éviter des orages et est monté au niveau de vol 370, son niveau de vol de croisière. Vers 19 h 15, heure avancée de l'Est, l'aéronef a traversé une grosse cellule orageuse où il a été secoué par de fortes turbulences. L'équipage de conduite a perdu la maîtrise de l'aéronef, qui a perdu rapidement environ 4000 pieds d'altitude avant que l'équipage de conduite n'en reprenne la maîtrise. L'aéronef a poursuivi son vol jusqu'à destination, où il a atterri sans incident. Aucun des 26 passagers et des 3 membres d'équipage n'a été blessé, et l'aéronef n'a pas été endommagé.

This report is also available in English.

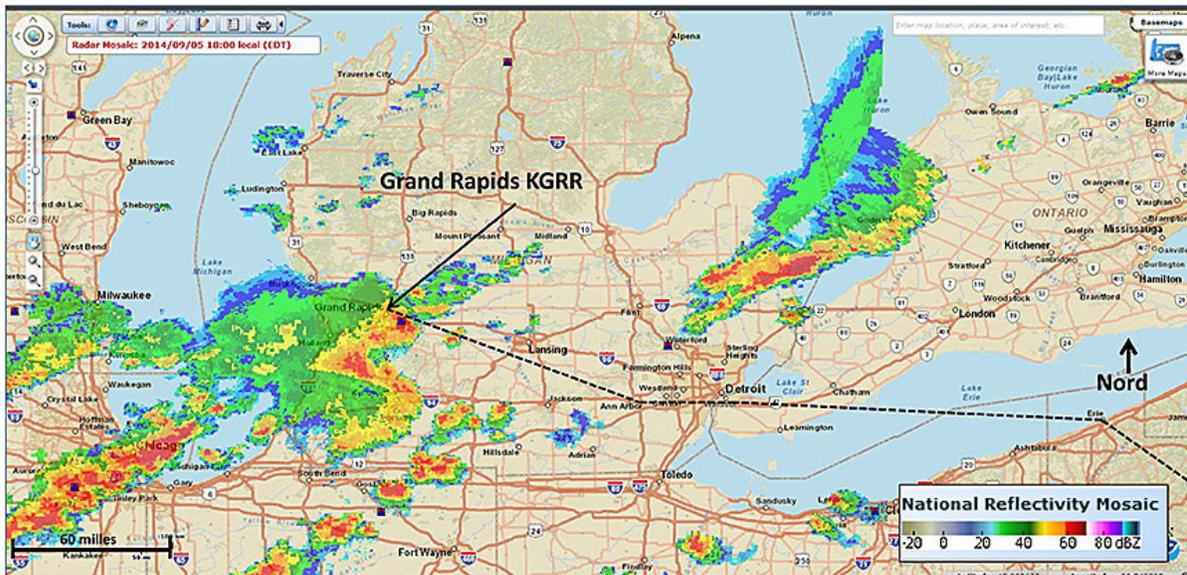
Renseignements de base

Déroulement du vol

À 17 h 59¹, l'Embraer EMB-145LR, exploité par ExpressJet Airlines (ExpressJet) en tant que vol numéro 4538 (immatriculé N16954, numéro de série 145072), a amorcé les manœuvres au sol à l'aéroport de Grand Rapids (KGRR), à Grand Rapids (Michigan) en prévision de son départ. Des orages locaux à l'aéroport ont toutefois cloué des aéronefs au sol, et l'équipage de conduite a dû interrompre les manœuvres. Durant cette interruption, les pilotes ont utilisé des applications météorologiques sur leurs téléphones mobiles pour observer l'activité convective et les précipitations, et déterminer la trajectoire la plus propice pour le vol vers l'aéroport international Newark Liberty (KEWR), à Newark (New Jersey).

L'équipage de conduite a constaté que la ligne d'orages paraissait plutôt fragmentée et qu'elle comptait assez de passages pour lui permettre de se dérouter (figure 1) afin de contourner le système météorologique. À 18 h 45, l'aéronef a décollé et s'est dérouter de 50 milles marins (nm) au nord-nord-est de KGRR. Après ce dérouterage initial, l'équipage a viré à l'est pour suivre une route parallèle à la ligne d'orages, au sud de sa position. L'aéronef se trouvait alors dans des conditions météorologiques de vol à vue (VMC).

Figure 1. Représentation de la météo au moment du départ (18 h 45) et itinéraire prévu de l'aéronef (tireté). (Source : National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], National Weather Service, avec annotations du BST)



¹ Les heures sont exprimées en heure avancée de l'Est (temps universel coordonné moins 4 heures).

L'aéronef a d'abord atteint le niveau de vol (FL) 330², où il est demeuré pendant 1 minute avant de poursuivre sa montée à son altitude de croisière assignée, FL370, l'altitude d'exploitation maximale de l'aéronef. Durant la montée, l'aéronef a traversé des turbulences légères. Pendant qu'il volait vers l'est, l'équipage a consulté le système radar météorologique embarqué pour observer le système météorologique devant lui. Comme l'aéronef volait en VMC, l'équipage de conduite a également déterminé visuellement les passages entre les orages. À mesure que le vol progressait, l'équipage observait les orages qui gonflaient et comblaient les passages devant l'aéronef.

Peu après avoir atteint le FL370, l'aéronef a commencé à être secoué par des turbulences de plus en plus fortes. L'aéronef volait à une vitesse de Mach 0,63^{3, 4}. À ce moment, l'équipage de conduite était en communication avec le Centre de contrôle régional (ACC) de Toronto qui a autorisé le déroutage pour contourner le système météorologique.

À 19 h 8, l'équipage de conduite a communiqué avec le régulateur des vols de la compagnie au moyen du système de communication et d'enregistrement de l'aéronef pour demander un itinéraire traversant le système météorologique. L'équipage avait besoin d'aide pour se frayer un chemin à travers les orages, car les passages entre les cellules orageuses se fermaient rapidement.

Vers 19 h 14, le régulateur des vols a consulté le logiciel de suivi des vols / surveillance météorologique⁵ de la compagnie (figure 2). Il a suggéré à l'équipage de conduite de se diriger directement vers l'aéroport Chris Hadfield (CYZR), à Sarnia (Ontario), puis vers l'aéroport international Erie Tom Ridge Field (KERI), à Erie (Pennsylvanie). L'équipage a alors viré vers le sud en direction de Sarnia.

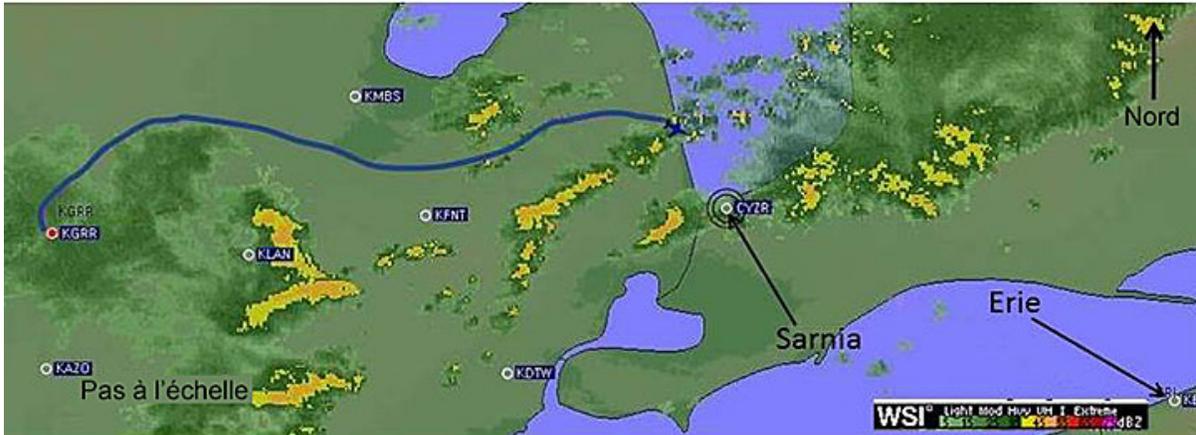
² Niveau de vol 330 (FL330, 33 000 pieds au-dessus du niveau moyen de la mer) signifie l'altitude exprimée en centaines de pieds qui est indiquée sur un altimètre calé à 29,92 pouces de mercure. Transports Canada, TP 14371, *Manuel d'information aéronautique de Transports Canada* (AIM de TC), (2 avril 2015), Généralités, 5.1 Glossaire de termes aéronautiques.

³ Le nombre de Mach est le « rapport de la vitesse d'un objet à la vitesse locale du son ». Transports Canada [en ligne], TP 11958F, *Glossaire à l'intention des pilotes et du personnel des services de la circulation aérienne* (Révision 22, août 2013), disponible à l'adresse : <https://www.tc.gc.ca/fr/aviationcivile/opssvs/secretariat-terminologie-glossaire-744.htm> (dernière consultation le 25 mai 2016).

⁴ Le constructeur recommande Mach 0,63 comme vitesse de pénétration en turbulence.

⁵ Il s'agit du logiciel WSI Fusion.

Figure 2. Vue qu'avait le régulateur des vols de la trajectoire de vol de l'aéronef vers 19 h 15. On voit la trajectoire de vol réelle (ligne bleue) et la météo. La représentation de la météo provenait d'une source radar de réflectivité de base, générée au moyen du plus faible des angles de réflectivité. (Source : ExpressJet, avec annotations du BST)



Peu après le déroutage du vol vers le sud, l'aéronef est entré dans des conditions météorologiques de vol aux instruments

À 19 h 14 min 55 s, les turbulences ont augmenté et se sont intensifiées pendant 1 minute.

À 19 h 15 min 20 s, les pilotes ont changé le mode de gestion de la poussée des moteurs au mode CRZ⁶ et ont réduit l'angle de manette des gaz (TLA) de 76° à 61°. Les vitesses de rotation compresseur du moteur (N_1) ont décéléré de 94 % à 85 % en 7 secondes.

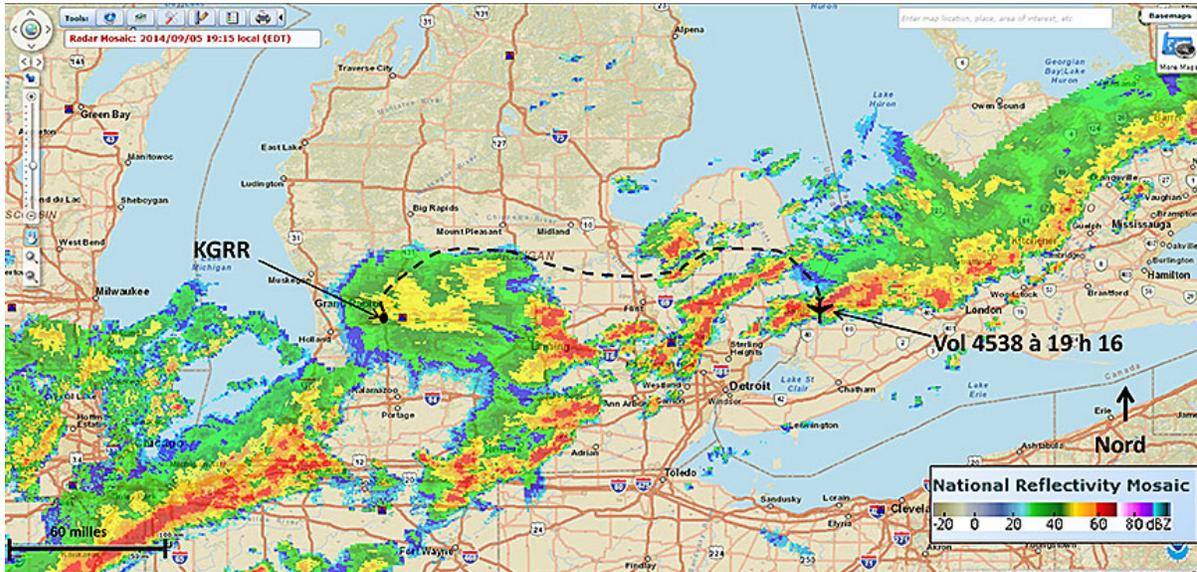
À 19 h 15 min 27 s, l'équipage de conduite a progressivement accru le TLA, de 61° à 74°, et la N_1 des moteurs a augmenté de 85 % à 93 %. Durant cette période, la vitesse a augmenté à Mach 0,76, et l'intensité des turbulences a augmenté à des valeurs maximales d'accélération verticale de 0,49g et de 1,42g.

À 19 h 15 min 51 s, les pilotes ont réduit le TLA à 25°. Au cours des 13 secondes suivantes, il y a eu une décélération correspondante de la vitesse N_1 , de 93 % à 60 %. Durant cette période de 13 secondes, la vitesse a augmenté à Mach 0,79 et les turbulences se sont intensifiées pour atteindre des valeurs maximales de 0,41g et de 1,7g. L'assiette latérale est devenue instable, et l'aéronef a atteint des angles d'inclinaison qui variaient entre 45° à gauche et 14° à droite.

Les données radar obtenues après l'événement indiquaient qu'à 19 h 16, l'aéronef volait vers le sud à travers une ligne d'orages (figure 3).

⁶ Le mode CRZ maintient une vitesse de rotation compresseur nominale du moteur (N_1) convenable pour le vol de croisière à l'intérieur d'une fourchette, selon l'angle auquel l'équipage de conduite règle la manette des gaz (TLA).

Figure 3. Trajectoire de vol (tireté), météo et emplacement de l'aéronef à 19 h 16. La représentation de la météo provenait d'une source radar de réflectivité composée utilisant la réflectivité maximale de tous les angles d'élévation. (Source : National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], National Weather Service, avec annotations du BST)



Le débrayage du pilote automatique s'est produit au moment où l'accélération verticale a atteint les valeurs maximales et que l'aéronef a dépassé la vitesse de Mach 0,78⁷. L'aéronef est monté et a dépassé l'altitude de croisière assignée (FL370) sans l'autorisation du contrôle de la circulation aérienne.

L'équipage de conduite a embrayé de nouveau le pilote automatique, mais l'aéronef a poursuivi sa montée en franchissant le FL374 dans des turbulences accrues. L'accélération verticale a atteint les valeurs maximales de 0,20g et 1,7g en 3 secondes, et le pilote automatique a de nouveau débrayé. L'assiette en tangage était de $-1,7^\circ$, l'angle d'attaque oscillait de $3,8^\circ$ à $-9,9^\circ$, la température extérieure de l'air était de $-45,4^\circ\text{C}$, la vitesse décelérait à Mach 0,68, et l'aéronef continuait de monter en franchissant le FL375.

À 19 h 16 min 19 s, l'aéronef a atteint le FL376, le sommet de sa saute d'altitude, soit 600 pieds au-dessus de l'altitude d'exploitation maximale⁸ de l'aéronef. L'angle d'inclinaison intempestive à droite a alors atteint 45° , et les valeurs maximales momentanées des turbulences étaient de 0,44g et de 1,6g. L'équipage de conduite n'a effectué aucun braquage en profondeur ni aucune compensation qui auraient contribué à la montée.

Pendant ces fortes turbulences, aussi bien avant que durant la saute d'altitude :

⁷ Le nombre de Mach maximal admissible en exploitation (M_{MO}) est 0,78.

⁸ L'altitude d'exploitation maximale est l'altitude maximale à laquelle il est permis de faire voler un aéronef. Elle est limitée par les caractéristiques de vol, structurales, fonctionnelles, de propulsion ou d'équipement. L'article 25.1527 des *Federal Aviation Regulations* (FARs) stipule et régit les limites d'altitude. La section « Limitations » [Limites d'exploitation] du manuel d'exploitation d'aéronef de l'EMB-145 stipule une altitude d'exploitation maximale de 37 000 pieds (FL370).

- les valeurs maximales d'accélération verticale ont fluctué rapidement entre 0,15g et 2,07g;
- l'angle d'attaque a fluctué rapidement entre $-11,9^\circ$ et $3,8^\circ$;
- la température extérieure de l'air a varié entre -51°C et -45°C .

À 19 h 16 min 26 s, peu après avoir atteint le FL376, l'aéronef a piqué du nez de 11° et s'est incliné de 30° à droite. L'équipage de conduite a augmenté la poussée (en avançant le TLA à 70°) et, en utilisant les commandes de vol, a effectué un roulis additionnel à droite. Cette commande a entraîné l'aéronef dans un angle d'inclinaison à droite de 63° . L'assiette en tangage a augmenté à 13° en piqué, et l'aéronef a atteint un taux de descente de 3100 pieds par minute (pi/min). L'équipage a brièvement effectué une entrée en roulis à gauche, et l'angle d'inclinaison à droite a diminué de 63° à 33° .

À 19 h 16 min 27 s, le système de détection de givrage a indiqué la présence de givre. L'aéronef est entré dans des conditions de givrage fort. Les systèmes antigivrage des surfaces des ailes, du stabilisateur et des moteurs se sont mis en marche (ON) automatiquement.

À 19 h 16 min 38 s, alors que l'aéronef franchissait en descente le FL368, le taux de descente a augmenté à 4400 pi/min; l'aéronef affichait alors un angle d'inclinaison à droite de 42° . L'équipage de conduite a utilisé les commandes de vol pour effectuer une entrée en roulis à droite. Par conséquent, l'angle d'inclinaison à droite a augmenté de 42° à 77° . Durant la descente intempestive, l'équipage de conduite a effectué des entrées en roulis contraires aux techniques connues de rétablissement en cas de perte de contrôle d'un aéronef⁹. La bonne technique consiste à effectuer une entrée en roulis dans le sens qui permet la remise à l'horizontale des ailes la plus rapide¹⁰.

L'assiette en tangage a augmenté à 17° en piqué. La vitesse de l'aéronef augmentait à Mach 0,76, et les fortes turbulences persistaient.

Alors que l'aéronef franchissait en descente le FL364, l'équipage de conduite a effectué des entrées en roulis à gauche, et l'angle d'inclinaison à droite a diminué à 26° par la suite. Le taux de descente était alors de 7500 pi/min, et l'angle de tangage était de 24° en piqué.

À partir de 19 h 16 min 48 s, alors que l'aéronef franchissait en descente le FL355, l'équipage de conduite a réduit la poussée (en reculant le TLA de 70° à 25°) pendant 6 secondes. Durant ces 6 secondes, les turbulences sont passées de fortes à modérées, l'assiette en tangage de l'aéronef s'est redressée à 5° en piqué, et le taux de descente a diminué à 6900 pi/min.

À 19 h 17 min 2 s, alors que la vitesse de l'aéronef était de Mach 0,80, le pilote automatique s'est embrayé brièvement (1 seconde) avant de débrayer. L'assiette de l'aéronef était stable, et

⁹ Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), *Manuel sur la formation à la prévention des pertes de contrôle et aux manœuvres de rétablissement*, 2014. On définit la perte de contrôle comme « la situation d'un avion en vol lorsque les paramètres normalement appliqués dans le service en ligne ou la formation sont involontairement dépassés ».

¹⁰ Federal Aviation Administration (FAA), Advisory Circular (AC) 120-111: Upset Prevention and Recovery Training (14 avril 2015).

le taux de descente avait diminué à 2700 pi/min alors que l'aéronef franchissait en descente le FL338. Les turbulences étaient toujours modérées.

À 19 h 17 min 11 s, au FL336, la descente s'est arrêtée; l'aéronef avait perdu environ 4000 pieds d'altitude. Peu après, les indicateurs de détection de givre se sont éteints, et l'aéronef s'est mis à monter.

Durant la période de perte de maîtrise¹¹ décrite ci-dessus, l'aéronef avait enregistré un taux de virage moyen de 200° par minute. En conséquence, son cap de 180° magnétique (M) était rendu à 240 °M, et l'aéronef avait atteint un taux de descente maximal de 9300 pi/min. De fortes turbulences ont persisté durant la période de perte de contrôle et de perte de maîtrise. L'ACC de Toronto a tenté à maintes reprises de rétablir la communication radio avec l'aéronef. La seule réponse de l'équipage de conduite était « attendez », mais le ton et le volume employés laissaient entendre qu'une situation de nature urgente se dessinait.

Durant 3 minutes, l'aéronef a affiché un taux de montée variable avant de rétablir une altitude de croisière au FL370. Les moteurs produisaient une poussée de 85 % à 95 %. Les turbulences sont passées de modérées à légères, et les conditions de givrage ont cessé.

Pendant que l'aéronef montait, le pilote automatique s'est embrayé momentanément à 3 reprises. Chaque fois, il a débrayé durant des épisodes de turbulences accrues. Les conditions de givrage ont réapparu.

Alors que l'aéronef suivait un cap de 240 °M, l'équipage de conduite a demandé à l'ACC de Toronto un nouveau cap qui lui permettrait de quitter ce système météorologique. Là encore, le ton et le volume de voix laissaient sous-entendre une urgence. L'ACC de Toronto a suggéré un cap vers le sud; l'aéronef a viré au sud et, peu après, est sorti du système météorologique.

L'aéronef a ensuite viré à l'est, et le vol s'est poursuivi jusqu'à sa destination, KEWR, sans croiser d'autres fortes turbulences.

Dès l'arrivée à Newark, l'équipage de conduite a signalé l'épisode de fortes turbulences à l'exploitant. Le personnel de maintenance a donc effectué une inspection en cas de fortes turbulences sur l'aéronef et a téléchargé les données de l'enregistreur de données de vol (FDR), conformément au manuel de maintenance de l'aéronef EMB-145. Comme aucun dommage et aucune anomalie n'ont été relevés, l'aéronef a été remis en service.

Dans le cadre de son enquête, le BST a analysé les données du FDR et a noté un état de survitesse de l'aéronef. Le BST en a avisé l'exploitant, qui a ensuite fait une inspection en cas de survitesse.

¹¹ Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), *Aviation Occurrence Categories, Definitions and Usage Notes*, octobre 2013 (4.6). On définit une perte de maîtrise en vol comme étant [traduction] « [u]ne manifestation extrême d'un déroutage de la trajectoire de vol prévue ».

Suivi des vols et surveillance des conditions météorologiques

ExpressJet utilise le logiciel WSI Fusion pour suivre les vols et surveiller les conditions météorologiques. Cet outil produit notamment des données en temps réel sur l'emplacement de l'aéronef, le suivi des vols, le temps convectif, et ce, au moyen de l'angle d'inclinaison le plus faible, et affiche un produit de réflectivité de base. Grâce à ce logiciel, un exploitant aérien peut planifier les vols de façon proactive, évitant les tempêtes ou autres événements perturbateurs sur la trajectoire de vol, et déterminer les routes optimales des vols. Ces fonctions permettent d'éviter une ligne d'orages, comme celle que l'équipage en cause a croisée, et de changer la route d'un aéronef avant même qu'il s'approche du mauvais temps.

Aéronef et radar météorologique

Un examen des données consignées dans les registres des anomalies en vol n'a révélé aucune incohérence ni anomalie pour le vol à l'étude.

L'aéronef était muni d'un système radar météorologique embarqué Primus 660 fabriqué par Honeywell. Ce système est conçu pour détecter et analyser les précipitations au sein des tempêtes qui se trouvent sur la trajectoire de vol d'un aéronef. Il indique visuellement aux équipages de conduite l'intensité des précipitations par 4 couleurs (magenta, rouge, jaune et vert) sur fond noir à l'écran principal de vol et sur l'affichage du radar embarqué en mode météo. Le magenta représente les précipitations de plus forte intensité, et le vert, celles de plus faible intensité. Le système de radar météorologique peut détecter la pluie, la neige mouillée, la grêle humide et la grêle sèche (selon le diamètre). Il ne peut détecter la vapeur d'eau, ni les cristaux de glace, ni la grêle sèche de petit diamètre.

Voici un aperçu de certaines des limites et des problèmes relatifs aux systèmes radar météorologiques embarqués :

- Atténuation : [traduction] « Les tempêtes aux taux de précipitations élevés peuvent atténuer l'énergie du radar et rendre impossible la détection d'une seconde cellule [orageuse] dissimulée derrière la première¹² ». La taille, la forme et l'intensité de la zone de précipitations pourraient être plus importantes que celles que peut voir le pilote. Quand un radar balaie une tempête, plus l'intensité des précipitations est forte, plus la distance de détection du radar est courte¹³.
- Pellicule d'eau sur la surface du radôme (le dôme qui couvre le radar) : lorsqu'un aéronef vole dans la pluie à certaines altitudes et vitesses particulières, une pellicule d'eau peut se former sur le radôme et ainsi fausser les indications du radar

¹² EMB-145 ExpressJet Airlines, *Airplane Operations Manual (AOM)*, Volume 1 (31 octobre 1996), 2-18-45, p. 9.

¹³ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service, *The Front* (décembre 2014).

météorologique. Le niveau d'intensité des précipitations qui s'affichent à l'écran radar peut disparaître ou devenir rouge¹⁴.

- Graisse sur le radôme : la présence de graisse ou de saletés sur la surface du radôme nuit à la transmission radar¹⁵.
- Radôme fissuré : [traduction] « De petits trous causés par des décharges électrostatiques, des dommages mineurs à la structure ou à la peinture peuvent permettre à l'eau de s'infiltrer dans la structure en matériau composite alvéolée du radôme. Cela peut entraîner une importante atténuation ou distorsion du signal radar, et dans certains cas la formation de points noirs à l'écran radar¹⁶ ».

Le radar météorologique comprend plusieurs fonctions, notamment la portée, l'inclinaison (contrôle manuel de l'angle de l'antenne) et le gain (la quantité d'énergie transmise par le radar concentrée dans une direction particulière), que l'on doit utiliser correctement. Si l'on utilise mal ces fonctions, on risque de rater ou de sous-estimer les cibles météorologiques. Comme le FDR ne consigne pas les paramètres du radar météorologique, on n'a pu déterminer avec certitude comment l'équipage de conduite avait réglé le radar météorologique embarqué. En outre, on n'a pu déterminer comment l'équipage de conduite utilisait le radar météorologique. Aucune donnée n'a permis de conclure que le radar météorologique était défectueux.

Enregistreur de données de vol et enregistreur de conversations de poste de pilotage

Ni l'exploitant ni le commandant de bord (CdB) n'a signalé l'événement au BST. On n'a pas mis le FDR et l'enregistreur de conversations de poste de pilotage (CVR) en quarantaine après le vol. C'est plutôt l'ACC de Toronto qui a signalé l'événement au BST environ 24 heures après le fait.

L'enregistrement audio CVR de l'événement avait été oblitéré. Toutefois, le BST a obtenu de l'exploitant le fichier numérique téléchargé depuis le FDR. Ce fichier contenait plus de 26 heures d'enregistrements de 17 vols, y compris le vol à l'étude.

Équipage de conduite

Selon les dossiers, les 2 pilotes possédaient les certifications et les qualifications requises pour effectuer le vol, conformément à la réglementation en vigueur.

Le commandant était le pilote aux commandes. Il avait accumulé environ 10 000 heures de vol, dont 7000 heures à bord de l'EMB-145, dont 5000 heures comme CdB. Pilote vérificateur

¹⁴ EMB-145 ExpressJet Airlines, *Airplane Operations Manual (AOM)*, Volume 1 (31 octobre 1996), 2-18-45, p. 18.

¹⁵ *Ibid.*

¹⁶ *Ibid.*

de la compagnie, le commandant était au service de l'exploitant depuis 10 ans et avait réussi sa plus récente formation périodique sur type en avril 2014.

Le premier officier était le pilote surveillant. Il avait accumulé environ 3400 heures de vol, dont environ 2200 heures à bord de l'EMB-145; il était au service de l'exploitant depuis 3 ans. Le premier officier avait réussi sa plus récente formation périodique sur type en juillet 2014.

Au moment de l'événement, la Federal Aviation Administration des États-Unis n'avait aucune réglementation exigeant une formation sur la prévention des pertes de maîtrise et les manœuvres de rétablissement. Toutefois, à compter du 12 mars 2019, tous les transporteurs aériens aux États-Unis assujettis à la partie 121 des *Federal Aviation Regulations* (FARs) devront former leurs équipages de conduite sur le rétablissement en cas de perte de contrôle.

Les entrées en roulis de l'équipage de conduite durant la phase de descente de la perte de contrôle étaient contraires aux techniques connues de rétablissement en cas de perte de contrôle. Ces manœuvres n'ont fait qu'accentuer l'angle d'inclinaison, ce qui a accru la perte d'altitude et le temps de rétablissement.

Quoique la réglementation en vigueur ne l'exige pas encore, la formation périodique que donne ExpressJet à ses équipages de conduite comprend une formation sur le rétablissement en cas de perte de contrôle. La formation de la compagnie comprenait au moins 2 mises en situation distinctes pour le pilote aux commandes : une assiette en cabré et une assiette en piqué avec un angle d'inclinaison. Dans ces 2 cas, les manœuvres se déroulent à une altitude qui varie de 20 000 à 25 000 pieds et à une vitesse anémométrique de 280 nœuds. L'examineur décide des conditions atmosphériques qu'il programme dans le simulateur.

Quoique l'équipage de conduite avait déjà suivi la formation sur le rétablissement en cas de perte de contrôle, c'était la première fois qu'il était confronté à une perte de contrôle dans des turbulences de cette intensité. Actuellement, les simulateurs de vol à système de mouvement complet ont des limites de fidélité inhérentes, et les mises en situation de la formation comprennent un certain niveau de prévisibilité; il est donc difficile de reproduire la perte de contrôle dans des turbulences aussi fortes que celles auxquelles a été confronté l'équipage de conduite en cause dans l'événement à l'étude.

Conditions météorologiques

Une ligne d'orages, associée à un front froid, se déplaçait d'ouest en est dans le sud de l'Ontario en après-midi et en soirée, le jour de l'événement. Les prévisions de zone graphique (GFA) pour le sud de l'Ontario (GFACN33) émises le jour de l'événement (annexe A) indiquaient un potentiel d'orages étendus occasionnels; leurs sommets devaient atteindre de 42 000 à 44 000 pieds au-dessus du niveau de la mer (asl) à 14 h (1800Z). La carte GFACN33 émise à 20 h (0000Z) prévoyait les conditions météorologiques suivantes le long du front froid : cumulonimbus fréquents aux sommets à 52 000 pieds asl, orages de forte intensité, pluie, grêle et vents en rafales jusqu'à 40 nœuds.

Lorsque des orages ont commencé à se former, des avertissements de dangers météorologiques (SIGMET)¹⁷ ont été émis après 14 h sur la principale ligne d'orages qui croisait la trajectoire de vol de KGRR à KEWR. Un message SIGMET couvrait déjà la zone au moment et à l'endroit où se trouvaient de fortes turbulences, entre le FL330 et le FL390. Les radars météorologiques dans le sud de l'Ontario faisaient également état de précipitations à des sommets dépassant 52 000 pieds asl, et de fortes pluies accompagnées de grêle à la surface.

D'après l'imagerie radar d'Environnement Canada, la formation de petites lignes d'orages avait commencé autour de 13 h le long de la vallée de la rivière des Outaouais et s'étendait jusqu'au centre du Michigan. Dès 16 h, une ligne d'orages s'étendait de Wiarton (Ontario) jusqu'au sud du Michigan. Dès 19 h, des lignes de grains s'étaient formées le long du front froid. À 20 h 30, les images radar montraient des taux de précipitations supérieurs à 65 mm/h et des nuages dont les sommets dépassaient 52 000 pieds asl.

À 16 h 59, le régulateur des vols d'ExpressJet a généré un exposé météorologique qui faisait partie des documents d'autorisation de vol. Avant le départ, l'équipage de conduite du vol à l'étude a examiné les documents, qui comprenaient l'information météorologique et les *convective SIGMET*¹⁸ pour la trajectoire de vol prévue; les 2 pilotes étaient au courant de ces conditions météorologiques.

¹⁷ NAV CANADA émet des messages de renseignements météorologiques significatifs (SIGMET) pour modifier les prévisions de zone graphique (GFA) correspondantes. Les messages SIGMET sont des avertissements à court terme concernant certains phénomènes météorologiques potentiellement dangereux. NAV CANADA, *Guide des services météorologiques à l'aviation* (août 2011).

¹⁸ Un *convective SIGMET* est [traduction] « un avertissement météorologique émis en vol en cas de temps convectif dangereux qui peut compromettre la sécurité de tous les vols ». On émet des *convective SIGMET* en cas d'orages violents accompagnés de vents de surface de plus de 50 nœuds, de grêle à la surface d'un diamètre d'au moins 3/4 pouce, ou de tornades. On les émet aussi pour avertir les pilotes en cas de cellules orageuses encastrées, de lignes d'orages, ou d'orages accompagnés de précipitations fortes ou plus intenses qui touchent au moins 40 % d'une zone de 3000 pieds carrés ou plus. » Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-25A, *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* (2008), chapitre 12, p. 12-14.

Après l'événement, Environnement Canada a réalisé un examen météorologique exhaustif qui montrait que le temps au moment de l'événement était généralement conforme aux prévisions.

Turbulences et orages

L'air turbulent a de nombreuses sources. Les plus courantes comprennent, sans s'y limiter, l'air convectif, les fronts de tempête, la turbulence de sillage, et la turbulence en ciel clair. Cette dernière comprend de façon générale la turbulence en altitude élevée dans des conditions qui ne présentent aucun indice visuel (comme des nuages) pour indiquer la présence d'air instable. Il est difficile de prévoir et d'éviter la turbulence en ciel clair sans l'aide de rapports météorologiques de pilote.

Lors de l'événement à l'étude, même si l'aéronef volait à haute altitude, la turbulence qu'il a croisée n'était pas de la turbulence en ciel clair. Une reconstruction de la trajectoire de vol, superposée sur la représentation graphique du temps et synchronisée avec celle-ci, indique clairement que l'aéronef a croisé l'air convectif turbulent associé à des cumulonimbus bourgeonnants.

D'après le *Manuel d'information aéronautique de Transports Canada*, les fortes turbulences produisent d'importants et brusques changements d'altitude ou d'assiette. Elles produisent normalement de fortes variations de la vitesse indiquée [et] le pilote peut perdre momentanément la maîtrise de l'aéronef. « Les occupants ressentent de violentes pressions des ceintures ou harnais de sécurité. Les objets libres sont projetés de toutes parts. Il est impossible de servir la nourriture et de se déplacer¹⁹. »

Les cumulonimbus sont des nuages verticaux denses et bourgeonnants associés aux orages et à l'instabilité atmosphérique. Ces nuages se forment habituellement à partir de vapeur d'eau qui s'élève en altitude grâce à des courants d'air convectif. Ils peuvent produire de la foudre et d'autres conditions météorologiques violentes et dangereuses, comme des tornades.

Dans un cumulonimbus, de l'air généralement chaud et humide s'élève en périphérie de la structure du nuage, tandis que de l'air froid descend en son centre. En hautes altitudes, le croisement de ces 2 masses d'air peut entraîner de fortes turbulences et des précipitations sous forme de cristaux de glace, de grêle ou de gouttelettes d'eau surfondues, qui entraînent des conditions de givrage.

Les orages ont tendance à se former en amas de 2 ou plus. Ces amas, composés d'orages individuels à des stades de développement divers, peuvent couvrir de grandes surfaces et durer plusieurs heures.

Les orages dont il est question dans l'événement à l'étude étaient associés à un front froid. Les orages frontaux forment habituellement une ligne qui peut s'étendre sur des centaines de

¹⁹ Transports Canada, TP 14371, *Manuel d'information aéronautique de Transports Canada* (AIM de TC), (2 avril 2015), MET 3.7, Tableau des critères de compte rendu de turbulences, p. 154.

milles. Ils présentent un danger particulier pour les pilotes, car ils sont souvent encastrés dans la surface supérieure d'autres nuages, ce qui les rend invisibles à l'œil nu. Une ligne d'orages frontaux qui avance est à éviter²⁰, car une forte turbulence peut s'étendre dans un rayon de 20 nm d'un orage violent²¹.

Federal Aviation Regulations des États-Unis

D'après les FARs, c'est le CdB qui a le dernier mot à l'égard de l'utilisation d'un aéronef. L'article 91.3 des FARs (Responsabilité et autorité du commandant de bord) stipule :

[traduction]

(a) Le commandant de bord d'un aéronef est directement responsable et a le dernier mot à l'égard de l'utilisation de cet aéronef.

Dépassement du nombre de Mach maximal admissible en exploitation

Le nombre de Mach maximal admissible en exploitation (M_{MO}) est la vitesse au-delà de laquelle l'aéronef atteint ses limites de conception structurales et aérodynamiques. La formule qui sert à déterminer le M_{MO} comprend une marge de protection qui permet à l'aéronef qui passe en piqué inopiné de résister aux charges de manœuvres subséquentes nécessaires pour sortir du piqué, sans subir de dommages structuraux.

Le M_{MO} fournit également une marge de protection qui permet à l'aéronef de résister aux charges de rafale qui donnent lieu au tremblement à haute vitesse et entraînent une perte de stabilité. Une marge de protection typique serait de l'ordre de Mach 0,05. Malgré ces marges, la réglementation interdit l'utilisation intentionnelle d'un aéronef au-delà du M_{MO} ²².

Quand un aéronef dépasse le M_{MO} , les marges de protection diminuent. On met ainsi à risque l'intégrité structurale, la stabilité et la manœuvrabilité de l'aéronef. Ces risques augmentent lors de navigation dans des conditions turbulentes; il faut donc les éviter.

Le M_{MO} de l'EMB-145 est 0,78. Durant le vol à l'étude, il y a eu des dépassements du M_{MO} avant et durant la perte de maîtrise (annexe B). Ces dépassements sont survenus comme suit :

- juste avant la saute d'altitude au-dessus du FL370, alors que le nombre de Mach a atteint un pic transitoire unique de 0,79. Les turbulences passaient de modérées à fortes, ce qui correspond aux rafales horizontales associées aux cumulonimbus de stade adulte dans lesquels l'aéronef volait. Ces rafales horizontales auraient contribué au pic transitoire du nombre de Mach qui a dépassé le M_{MO} .

²⁰ S.A.F. Macdonald, *From the Ground Up* (Aviation Publishers, 2012), Thunderstorms, p. 151.

²¹ Transports Canada, TP 14371, *Manuel d'information aéronautique de Transports Canada* (AIM de TC), (2 avril 2015), 2.7.1 Opérations près des orages.

²² L'article 25.1505 des *Federal Aviation Regulations* (FARs) stipule et régleme les limites du M_{MO} .

- durant le rétablissement, alors que l'équipage de conduite ralentissait le taux de descente de l'aéronef. Durant une période de 45 secondes, la vitesse a atteint les pics transitoires de Mach 0,782, Mach 0,801, Mach 0,791, Mach 0,788 et Mach 0,787. Au cours des secondes qui ont précédé cette période, l'aéronef avait atteint un taux de descente rapide de 9300 pi/min.

Phénomènes se produisant à haute altitude et à grande vitesse

L'utilisation d'un aéronef à haute altitude et à grande vitesse donne lieu à des phénomènes qui peuvent compromettre la sécurité du vol si l'équipage aux commandes de l'aéronef ne les comprend pas bien²³. Les risques d'une telle utilisation comprennent, sans toutefois s'y limiter, les conditions météorologiques défavorables, l'air turbulent, le cisaillement du vent, le givrage, la compensation de Mach²⁴, et le tremblement de compressibilité (vitesse élevée)²⁵.

Le laboratoire du BST a examiné la compensation de Mach et le tremblement de compressibilité observés dans l'événement à l'étude pour déterminer si ces phénomènes ont contribué à la perte de contrôle de l'aéronef. On a déterminé qu'il était peu probable que la compensation de Mach et le tremblement de compressibilité aient contribué à l'événement.

Rapports du laboratoire du BST

Le BST a complété le rapport de laboratoire suivant dans le cadre de la présente enquête :

- LP172/2014 – FDR Analysis [Analyse de l'enregistreur de données de vol]

²³ Federal Aviation Authority (FAA), Advisory Circular (AC) 61-107B: Aircraft Operations at Altitudes Above 25,000 Feet Mean Sea Level or Mach Numbers Greater Than .75 (29 mars 2013).

²⁴ [Traduction] La compensation de Mach correspond à une tendance d'assiette en piqué attribuable à un changement de position du centre de poussée causé par un mouvement vers l'arrière de l'onde de choc qui survient lorsqu'un aéronef en vol transsonique accélère au-delà de son nombre de Mach maximal admissible en exploitation (M_{MO}). EUROCONTROL SKYbrary [en ligne], « Mack Tuck », disponible à l'adresse : http://skybrary.aero/index.php/Mach_Tuck (dernière consultation le 25 mai 2016).

²⁵ Semblable au tremblement de décrochage à basse vitesse, le tremblement à haute vitesse survient lorsque les filets d'air décollent de la surface portante. Lorsqu'un aéronef vole à une vitesse Mach élevée, les charges verticales augmentent l'angle d'attaque sur le profil d'aile. L'écoulement de l'air accélère au-delà de la vitesse du son locale, ce qui cause des ondes de choc transitoires. L'important et abrupt ébranlement de pression causé par les chocs transitoires perturbe la couche limite, ce qui mène au décollement des filets d'air.

Analyse

L'enquête n'a révélé aucune défaillance et aucun mauvais fonctionnement d'un système qui aurait contribué à l'événement avant ou durant le vol. Par conséquent, la présente analyse portera sur la suite d'événements qui a mené à la présence de l'aéronef dans une zone de fortes turbulences et à la perte de maîtrise de ce dernier.

L'équipage de conduite était au courant des conditions météorologiques et de l'activité orageuse qui se trouvaient sur la trajectoire de vol prévue. Il pensait toutefois pouvoir naviguer entre les orages ou les contourner. Le temps était généralement conforme aux prévisions.

Le BST a examiné la représentation du radar météorologique de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), qui montrait des passages dans la ligne d'orages au moment du départ. Toutefois, la taille et l'intensité des orages peuvent changer rapidement à mesure qu'ils prennent forme ou se dissipent.

Après le départ, l'équipage de conduite a tenté de naviguer à travers une longue ligne d'orages. Toutefois, à mesure que progressait le vol, les orages se sont intensifiés et ont bloqué la trajectoire de vol que prévoyait suivre l'équipage de conduite.

Alors que l'aéronef volait vers l'est, l'équipage de conduite n'a pu trouver de passage qui lui permettrait de poursuivre sa route vers sa destination. L'équipage a donc demandé l'aide du régulateur des vols de la compagnie pour trouver une trajectoire à travers la ligne d'orages.

Le régulateur a proposé une trajectoire à partir de ce qu'il voyait à son écran et de son évaluation des conditions météorologiques. D'après l'image à son écran (figure 2), cette trajectoire était envisageable, étant donné la position de l'aéronef et l'emplacement du mauvais temps.

Toutefois, peu de temps après avoir viré dans la direction suggérée par le régulateur, l'aéronef s'est trouvé dans une zone de fortes turbulences, et l'équipage a perdu la maîtrise de l'aéronef. On peut en déduire que l'écran du régulateur ne montrait pas toute l'intensité de l'orage à cet endroit.

Après l'événement, on a comparé la représentation à l'écran du régulateur (figure 2) à celle du radar météorologique de la NOAA. L'image radar de la NOAA (figure 3) montre un orage plus important et plus contigu que celle de l'écran du régulateur. La différence entre les 2 représentations est en partie attribuable au type de réflectivité radar. L'écran du régulateur affiche un produit de réflectivité de base qui utilise le plus faible des angles de réflectivité. À l'opposé, l'affichage de la NOAA montre une image radar composite qui utilise la réflectivité maximale de tous les angles d'élévation.

Ainsi, la représentation de la NOAA qui montrait le mauvais temps comme étant plus intense ne correspondait pas à l'image que voyait le régulateur au moment où l'équipage de conduite a demandé son aide. Le régulateur a fondé sa décision sur le logiciel de suivi des vols, conçu pour surveiller de façon proactive les conditions météorologiques et faire le suivi

des vols. Lorsque l'on y est attentif, cet outil permet de changer la trajectoire d'un vol avant qu'il croise du mauvais temps, comme une ligne d'orages. Il est ainsi possible d'éviter complètement une zone de tempête.

Lors de l'événement à l'étude, lorsque l'équipage de conduite a demandé l'aide du régulateur des vols, l'aéronef se trouvait déjà dans la ligne d'orages, et l'équipage de conduite naviguait entre les cellules orageuses individuelles. Le logiciel de suivi des vols n'a donc pas été utilisé comme prévu. Au lieu de servir à éviter de façon proactive le mauvais temps, il a servi de réponse réactive au milieu orageux. Si l'équipage de conduite avait demandé plus tôt l'aide du régulateur, celui-ci lui aurait peut-être suggéré une trajectoire qui aurait permis d'éviter complètement ce système météorologique.

La décision de demander au régulateur une autre trajectoire de vol était raisonnable, car il s'agit là d'une ressource à la disposition des équipages de conduite. Toutefois, le CdB n'était pas tenu d'emprunter la trajectoire suggérée, étant donné qu'il est directement responsable et a le dernier mot à l'égard de l'utilisation de l'aéronef.

On n'a signalé aucun problème lié au système radar météorologique embarqué. Dans la mesure où l'équipage de conduite respectait les limites d'utilisation de ce système, il aurait tôt ou tard vu les orages affichés à l'écran. Par moments, l'aéronef se trouvait dans des conditions météorologiques de vol à vue, et l'équipage de conduite pouvait voir l'activité orageuse. Ainsi, il avait à sa disposition 3 sources de renseignements clés pour l'aider à déterminer sa trajectoire : les indices visuels, le radar météorologique embarqué, et les conseils du régulateur des vols. L'équipage de conduite a déterminé sa trajectoire de vol à partir de ces renseignements. Ainsi, l'équipage de conduite a traversé un orage au stade adulte, ce qui a causé la perte de contrôle de l'aéronef et l'équipage en a perdu la maîtrise.

L'équipage de conduite avait reçu une formation sur les techniques de rétablissement en cas de perte de contrôle, quoiqu'une telle formation n'ait pas été obligatoire au moment de l'événement. Naviguer à travers des orages et être confronté à de fortes turbulences de cette ampleur ne sont pas chose courante. L'équipage de conduite a probablement croisé un niveau de turbulence impossible à reproduire durant les exercices d'entraînement, et n'avait donc pas les compétences voulues pour rétablir l'aéronef après une perte de contrôle de cette nature. Durant la perte de maîtrise, l'équipage de conduite a utilisé momentanément des commandes de vol qui ont accentué l'inclinaison latérale de l'aéronef. Par conséquent, la perte d'altitude et le temps de rétablissement s'en sont trouvés accrus.

Au début du vol, alors qu'il se trouvait à l'altitude de croisière, l'aéronef volait à une vitesse de Mach 0,63, soit la vitesse recommandée de pénétration en turbulence. Peu après, en traversant des turbulences modérées, l'équipage de conduite a accru la puissance moteur, ce qui a porté la vitesse de l'aéronef à Mach 0,13 au-dessus de la vitesse de pénétration en turbulence. Bien que la vitesse de pénétration en turbulence soit recommandée, et non exigée, si les équipages de conduite utilisent un aéronef au-delà des recommandations du constructeur, ils augmentent les risques de conséquences négatives.

Durant la phase initiale de la perte de maîtrise, l'aéronef a dépassé son altitude d'exploitation maximale. Durant la descente rapide, la vitesse a augmenté, et l'aéronef a

dépassé son nombre de Mach maximal admissible en exploitation (M_{MO}). Ces 2 dépassements excédaient les limites de l'aéronef. Ces dépassements n'étaient pas intentionnels, mais si l'on utilise un aéronef au-delà des limites établies par le constructeur, il y a un risque de compromettre la sécurité du vol et de causer des blessures aux occupants et des dommages à l'aéronef.

L'enregistrement audio de cet événement par l'enregistreur de conversations de poste de pilotage a été oblitéré. Si l'enregistrement des conversations de poste de pilotage n'est pas disponible dans le cadre d'une enquête, il pourrait être impossible de déterminer et de communiquer les lacunes de sécurité qui permettrait d'accroître la sécurité des transports.

Faits établis

Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs

1. L'équipage de conduite était au courant des conditions météorologiques et a quitté l'aéroport en pensant qu'il pourrait naviguer à travers une importante ligne d'orages. Toutefois, à mesure que progressait le vol, les orages se sont intensifiés et ont bloqué la trajectoire de vol que prévoyait suivre l'équipage de conduite.
2. L'équipage de conduite a traversé un orage au stade adulte, ce qui a causé la perte de contrôle de l'aéronef et l'équipage en a perdu la maîtrise.
3. Durant la perte de maîtrise, l'équipage de conduite a utilisé momentanément des commandes de vol qui ont accentué l'inclinaison latérale de l'aéronef. Par conséquent, la perte d'altitude et le temps de rétablissement s'en sont trouvés accrus.

Faits établis quant aux risques

1. Si les équipages de conduite utilisent un aéronef au-delà des recommandations du constructeur, ils augmentent les risques de conséquences négatives.
2. Si l'on utilise un aéronef au-delà des limites établies par le constructeur, il y a un risque de compromettre la sécurité du vol et de causer des blessures aux occupants et des dommages à l'aéronef.
3. Si l'enregistrement des conversations de poste de pilotage n'est pas disponible dans le cadre d'une enquête, il pourrait être impossible de déterminer et de communiquer les lacunes de sécurité qui permettrait d'accroître la sécurité des transports.

Mesures de sécurité

Mesures de sécurité prises

ExpressJet Airlines

ExpressJet Airlines a effectué une évaluation interne de ses opérations aériennes comme suite à l'événement à l'étude. Dans le cadre de cette évaluation, la compagnie a cerné des risques connexes et a pris des mesures pour les atténuer. ExpressJet Airlines a pris les mesures correctives suivantes :

- L'exploitant a amélioré l'utilisation que font les régulateurs des vols du logiciel de suivi des vols pour miser davantage sur la fonctionnalité de détection de la foudre du volet météorologique de ce logiciel.
- Grâce au système de gestion de la sécurité de la compagnie, l'exploitant a cerné des améliorations possibles; tout le personnel concerné a reçu une formation ciblée de calibration dans divers domaines, y compris :
 - la responsabilité partagée du commandant de bord et du régulateur des vols, en insistant particulièrement sur la communication de l'information nécessaire à la sécurité du vol;
 - la politique de suspension des opérations;
 - la politique et les procédures sur les phénomènes liés au mauvais temps;
 - la surveillance météorologique en route;
 - les avis météorologiques aux navigants (AIRMET²⁶); les avertissements des dangers météorologiques en vol (*convective SIGMET*); les types d'orage, leur développement et les méthodes d'évitement; la turbulence; et les comptes rendus de pilote (PIREP);
 - l'interprétation des données radar;
 - les tâches et responsabilités du régulateur des vols.
- L'exploitant a conçu, à l'intention de tous les membres d'équipage de conduite, un module de formation qui insiste sur des techniques d'utilisation du radar météorologique pour identifier les tempêtes qui se forment et pour éviter le temps violent. Mesure proactive qui vise à renforcer les concepts déjà enseignés, cette formation a été intégrée dans la formation des équipages de conduite en 2016.

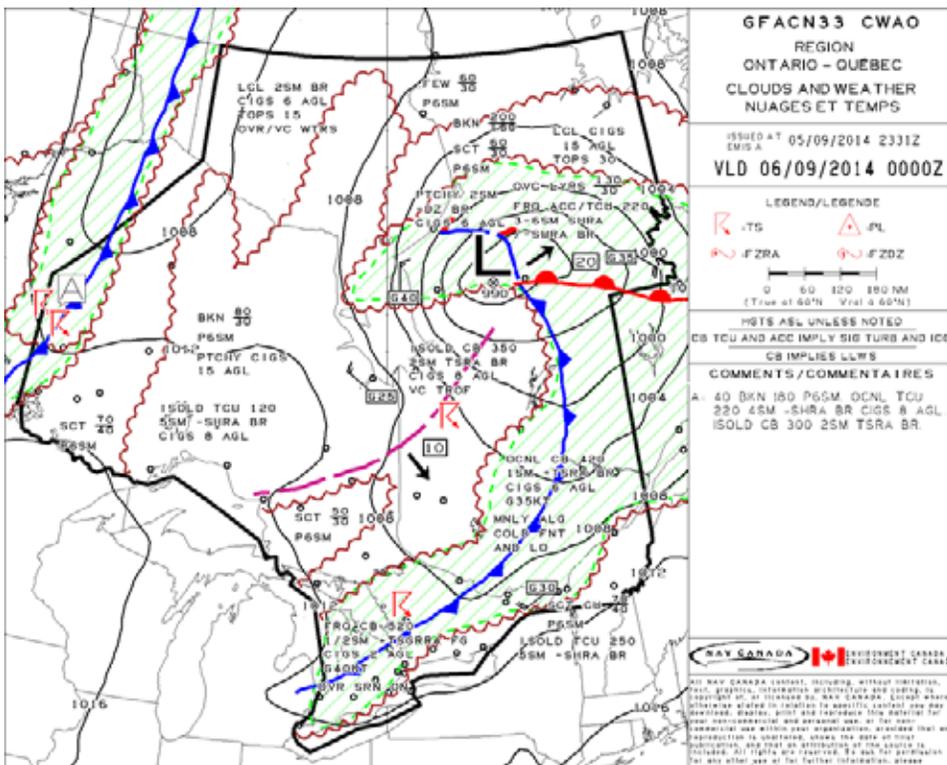
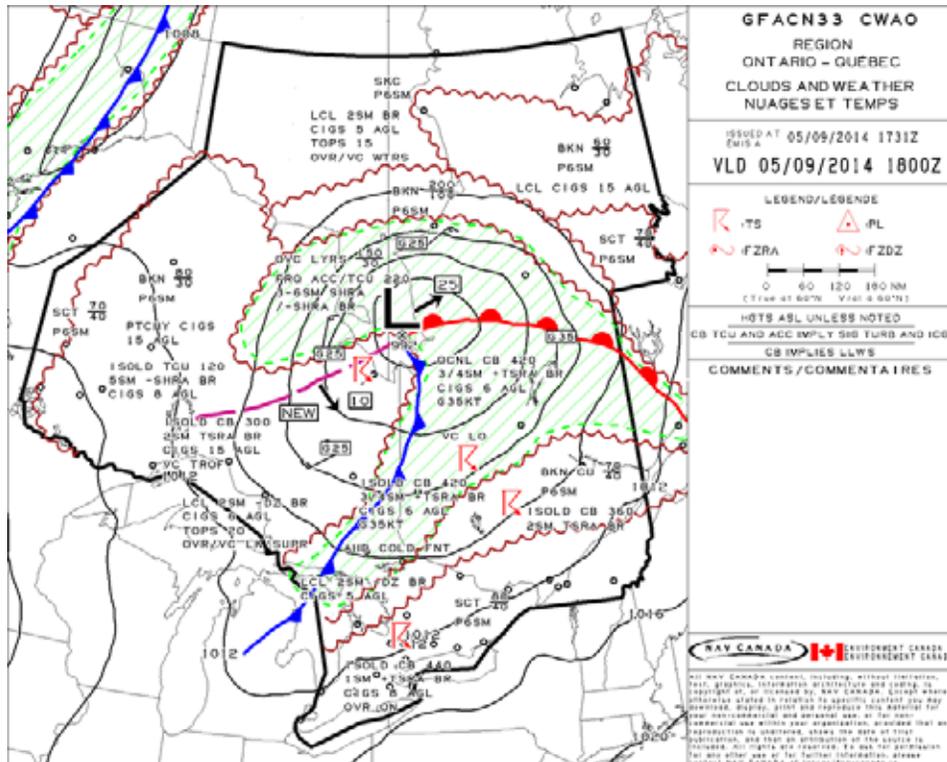
²⁶ Les AIRMET sont des « renseignements météorologiques à court terme destinés principalement à avertir les pilotes en vol de conditions météorologiques potentiellement dangereuses qui ne sont / pas décrites dans les prévisions de zone en vigueur, et qui ne nécessitent pas l'émission de renseignements météorologiques significatifs (SIGMET) ». Transports Canada [en ligne], TP 11958F, « Glossaire à l'intention des pilotes et du personnel des services de la circulation aérienne » [Révision 22, août 2013], disponible à l'adresse: <https://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/opssvs/secretariat-terminologie-glossaire-744.htm> (dernière consultation le 25 mai 2016).

Le présent rapport conclut l'enquête du Bureau de la sécurité des transports sur cet événement. Le Bureau a autorisé la publication de ce rapport le 8 juin 2016. Le rapport a été officiellement publié le 6 juillet 2016.

Visitez le site Web du Bureau de la sécurité des transports (www.bst.gc.ca) pour obtenir de plus amples renseignements sur le BST, ses services et ses produits. Vous y trouverez également la Liste de surveillance, qui énumère les problèmes de sécurité dans les transports qui posent les plus grands risques pour les Canadiens. Dans chaque cas, le BST a constaté que les mesures prises à ce jour sont inadéquates, et que le secteur et les organismes de réglementation doivent adopter d'autres mesures concrètes pour éliminer ces risques.

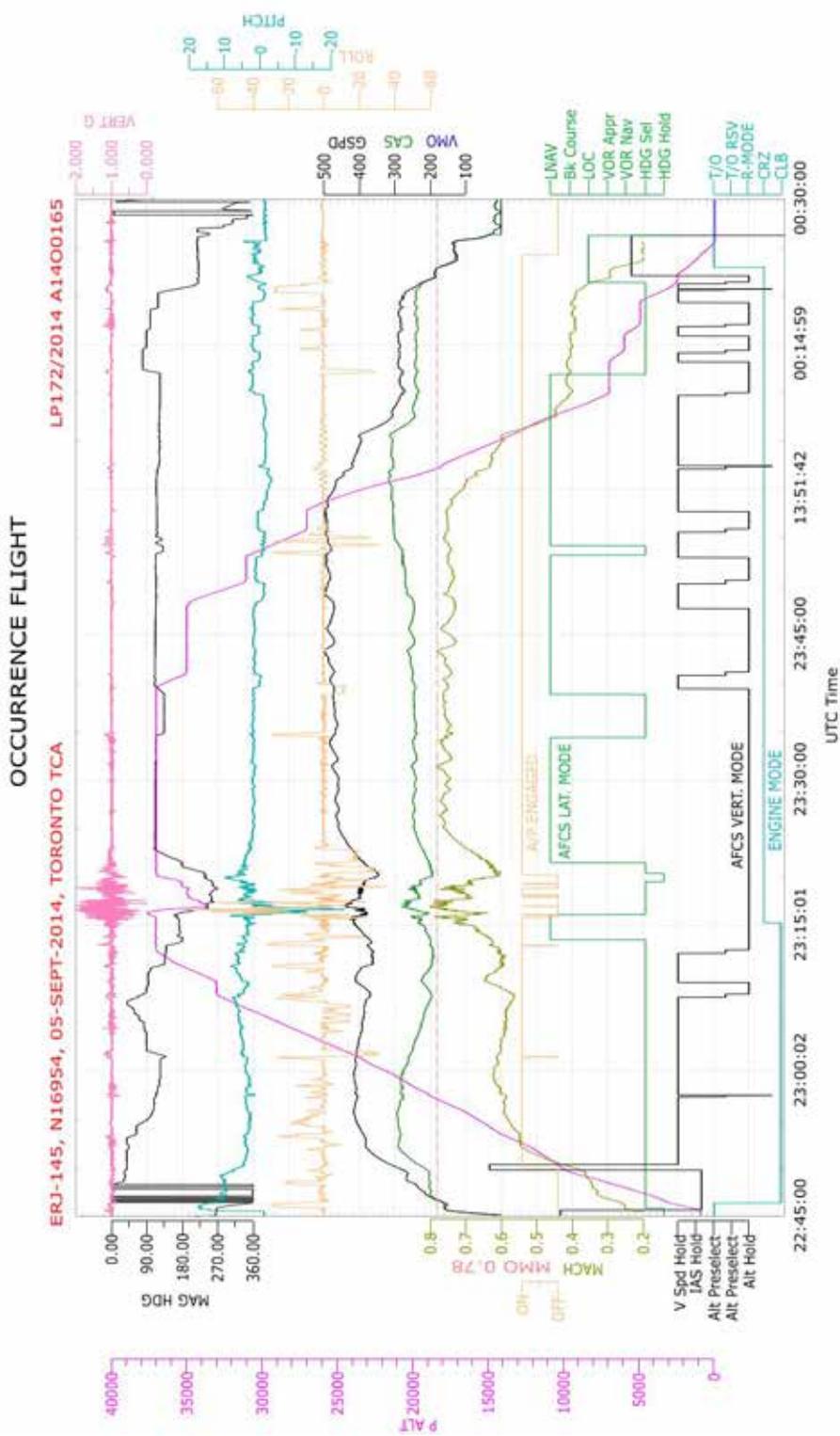
Annexes

Annexe A – Prévisions de zone graphique



Source : NAV CANADA et Environnement Canada

Annexe B – Tracés de l'enregistreur de données de vol



Created: 16-SEPT-2014
Recorders & Vehicle Performance Division - TSBC