

Bureau de la sécurité des transports
du Canada



Transportation Safety Board
of Canada

RAPPORT D'ENQUÊTE SUR UN ÉVÉNEMENT AÉRONAUTIQUE
A00Q0094



SORTIE EN BOUT DE PISTE

ROYAL AIR MAROC
BOEING 747-200 CN-RME
AÉROPORT INTERNATIONAL DE
MONTRÉAL/DORVAL (QUÉBEC)
LE 23 JUILLET 2000

Canada

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a enquêté sur cet événement dans le seul 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 sur un événement aéronautique

Sortie en bout de piste

Royal Air Maroc

Boeing 747-200 CN-RME

Aéroport international de Montréal/Dorval (Québec)

Le 23 juillet 2000

Rapport numéro A00Q0094

Sommaire

Le Boeing 747-200 du vol 203 de Royal Air Maroc en provenance de New York (États-Unis) a atterri sur la piste 24 droite (24R) de l'aéroport international de Montréal/Dorval (Québec). La piste était mouillée, et son extrémité qui avait été relocalisée était glissante. La distance d'atterrissage utilisable était de 8 000 pieds. L'avion a touché des roues à environ 1 700 pieds du seuil de piste, et les déporteurs sol sont sortis automatiquement. Les freins et les inverseurs de poussée ont été utilisés, mais l'appareil ne s'est pas immobilisé avant l'extrémité de piste relocalisée et a heurté des barricades. L'appareil a parcouru 700 pieds de plus que la distance d'atterrissage utilisable avant de s'immobiliser. Peu de temps avant que l'appareil s'immobilise, le personnel de la tour a observé des flammes qui s'échappaient du réacteur numéro 2 et a avisé l'équipage de conduite. On a fait appel aux Services d'urgence. Le réacteur numéro 2 a subi des dommages internes. Il n'y a pas eu d'évacuation. Personne n'a été blessé.

This report is also available in English.

Autres renseignements de base

Déroulement du vol

Le Boeing 747-200 était exploité par Royal Air Maroc sous l'indicatif de vol RAM203. Il transportait trois membres d'équipage de conduite, 15 agents de bord et 362 passagers. Il effectuait un vol régulier selon les règles de vol aux instruments (IFR) entre New York (États-Unis) et Casablanca (Maroc), avec une escale à Dorval (Québec).

À New York, l'équipage de conduite a révisé son plan de vol et vérifié la météo à destination. À l'heure prévue d'arrivée à Dorval, on prévoyait une visibilité supérieure à six milles dans des averses de pluie légère et des nuages fragmentés à 3 000 pieds. L'équipage a également pris connaissance d'un avis aux aviateurs (NOTAM) indiquant que la distance d'atterrissage utilisable sur la piste 24 droite (24R) était réduite à 8 000 pieds à cause de travaux au sol.

Avant d'exécuter l'approche à Dorval, l'équipage de conduite a pris connaissance de l'information fournie par le service automatique d'information terminale (ATIS). À 17 h, heure avancée de l'Est (HAE), soit 57 minutes avant l'incident, l'ATIS signalait les conditions suivantes : vents du 330 degrés à 3 noeuds, visibilité de 30 milles dans des averses de pluie légère, quelques nuages épars à 4 000 pieds, plafond à 8 000 pieds avec nuages fragmentés. L'approche devait être exécutée à l'aide du système d'approche aux instruments (ILS) en vue de l'atterrissage sur la piste 24R. La distance d'atterrissage utilisable était de 8 000 pieds.

Pendant le vol, le premier officier était aux commandes en place droite, et le commandant de bord assumait les tâches du pilote non aux commandes (PNF). Lors de l'exécution de la liste de vérifications d'approche, le système de freinage automatique a été sélectionné à la position minimum (MIN) et les déporteurs sol ont été placés à la position de déploiement automatique pour l'atterrissage. L'appareil a été guidé et autorisé à effectuer une approche directe ILS sur la piste 24R. Pendant l'approche, l'équipage de conduite a accusé réception du rapport de la tour qui indiquait que le vent au sol soufflait du 140 degrés à 6 noeuds. L'équipage a été avisé qu'un Boeing 747 de la compagnie Air France, qui venait de se poser il y avait environ quatre minutes, avait signalé que la piste était glissante à l'intersection de la voie de circulation B2, située à environ 7 800 pieds du seuil de la piste 24R. D'autres pilotes avaient signalé que la piste semblait glissante, mais sans toutefois décrire l'efficacité ou la qualité du freinage. L'approche a été effectuée avec le pilote automatique et l'automanette jusqu'à environ 230 pieds au-dessus du sol (agl); le premier officier a ensuite repris les commandes manuellement, jusqu'à l'atterrissage. À l'exception de quelques variations de vitesse, l'approche s'est déroulée normalement jusqu'à l'atterrissage.

L'appareil a franchi le seuil de piste un peu au-dessous de la pente de descente, à une hauteur de 25 pieds agl et à une vitesse indiquée de 160 noeuds. L'avion a touché des roues fermement à environ 1 700 pieds du seuil de piste, à une vitesse indiquée de 149 noeuds, et les déporteurs sol sont sortis automatiquement au toucher des roues. Percevant que la décélération de l'appareil était insuffisante, les deux pilotes ont serré fermement les freins, et les inverseurs de poussée ont été sélectionnés au maximum jusqu'à l'immobilisation de l'appareil. Toutefois, l'avion n'a pu s'immobiliser sur la distance d'atterrissage utilisable; il a fini sa course à environ 700 pieds au-delà de l'extrémité de piste relocalisée, heurtant des barricades.

Peu de temps avant que l'appareil s'immobilise, le personnel de la tour de contrôle a observé des flammes qui s'échappaient du réacteur numéro 2 et a aussitôt informé l'équipage de conduite et demandé l'intervention des Services d'urgence. Le mécanicien navigant a remarqué que la température des gaz d'échappement (EGT) du réacteur numéro 2 avait excédé la limite maximale permise et a avisé le commandant de bord. Ce dernier, qui était occupé à immobiliser l'appareil, n'a pas ordonné l'arrêt du réacteur. Une fois l'avion immobilisé, l'équipage de conduite a constaté que le régime du compresseur basse pression (N1) et du compresseur haute pression (N2) étaient en réduction, indiquant que le réacteur s'était éteint. Aucune alarme sonore ou visuelle indiquant un incendie réacteur ne s'est déclenchée dans le poste de pilotage. L'équipage a procédé à la ventilation du réacteur afin de réduire la température des gaz d'échappement. À l'arrivée des pompiers, les flammes s'étaient dissipées et les pompiers n'ont pas eu à intervenir. Le commandant de bord a jugé bon de ne pas ordonner l'évacuation des passagers. Le réacteur numéro 2 a subi des dommages internes.

Enregistreurs de bord

L'appareil était équipé d'un enregistreur de données de vol (FDR) et d'un enregistreur de la parole dans le poste de pilotage (CVR). Les deux enregistreurs ont été retirés de l'appareil pour permettre au Laboratoire technique du BST de les dépouiller et d'en faire l'analyse. Le CVR contient un ruban boucle sans fin qui enregistre les conversations des 30 dernières minutes dans le poste de pilotage. Comme l'alimentation électrique de l'appareil n'a pas été interrompue après l'incident, il ne restait aucune information valable sur le CVR pour les besoins de l'enquête.

L'analyse des données du FDR a révélé ce qui suit : l'appareil a franchi le seuil de piste à une hauteur d'environ 25 pieds agl, avec une vitesse indiquée de 160 noeuds. Le toucher des roues s'est effectué fermement avec une vitesse verticale correspondant à une charge d'impact vertical de 1,35g, à environ 1 700 pieds du seuil, à une vitesse indiquée de 149 noeuds. Peu de temps avant le toucher des roues, les vents de surface ont changé subitement, résultant en une composante variable de vent arrière avoisinant les 15 noeuds à l'atterrissage. Le réacteur numéro 2 a surchauffé et s'est éteint pendant le roulement au sol après avoir dépassé l'extrémité de piste relocalisée. Presque au même moment, la puissance du réacteur numéro 1 a fluctué, mais est revenue à la normale peu de temps avant que l'appareil s'immobilise.

Renseignements sur l'équipage de conduite

L'équipage de conduite possédait les licences et les qualifications nécessaires pour effectuer le vol, conformément à la réglementation en vigueur. Le commandant de bord était au service de la compagnie Royal Air Maroc depuis plus de 25 ans et totalisait environ 15 000 heures de vol dont 500 sur le Boeing 747 à titre de commandant de bord. Le premier officier était au service de la compagnie depuis une dizaine d'années et totalisait environ 6 000 heures de vol dont près de 2 000 sur le Boeing 747. Le mécanicien navigant était au service de la compagnie depuis 40 ans et avait passé les 20 dernières années sur le Boeing 747; il totalisait environ 16 000 heures de vol. L'équipage de conduite connaissait bien l'aéroport de Dorval, y ayant atterri à plusieurs reprises au cours des mois précédents. Chacun des membres de l'équipage de conduite avait subi avec succès un contrôle de compétence sur simulateur au cours des six mois précédant l'incident, en plus d'une vérification de compétence en ligne au cours des 12 derniers mois. Lors de leur formation sur le Boeing 747, les membres d'équipage de conduite doivent

effectuer divers exercices en vol visant à évaluer leur habilité au pilotage et leur capacité à prendre des décisions, tout en respectant les limites d'utilisation de l'appareil, les procédures normalisées établies par la compagnie et la réglementation aérienne. Selon le programme de formation, les exercices de décollage et d'atterrissage en simulateur sont effectués en conditions normales ou d'urgence, tout en simulant différentes conditions météorologiques et diverses conditions de piste.

Renseignements sur l'aéronef

L'appareil était certifié, équipé et entretenu conformément à la réglementation en vigueur et aux procédures approuvées. L'examen de l'avion effectué après l'incident n'a révélé aucun dommage ni défectuosité ou problème qui aurait pu contribuer à l'incident. L'avion était équipé de quatre réacteurs Pratt & Whitney : trois JT9D7F, et un JT9D7A (le réacteur numéro 2). Le manuel d'utilisation de l'aéronef (*Aircraft Flight Manual*) permet l'exploitation de l'appareil avec différents modèles de réacteurs, pourvu que certaines limitations soient respectées et que des corrections soient apportées aux performances de décollage et d'atterrissage, s'il y a lieu.

Le réacteur numéro 2 a surchauffé et s'est éteint pendant le roulement au sol après que l'avion a franchi l'extrémité de piste relocalisée. L'inspection visuelle des ailettes de soufflante du réacteur numéro 2 n'a révélé aucun dommage permettant de penser que le réacteur aurait pu ingérer des corps étrangers. Toutefois des débris d'aubes et d'ailettes de turbine présentant des signes de surchauffe ont été observés dans la tuyère d'échappement du turboréacteur.

Performances d'atterrissage

Pour fins de certification d'un appareil de catégorie transport comme le Boeing 747, l'annexe 6 de l'Organisation de l'Aviation civile internationale (OACI) indique que l'appareil doit être en mesure d'effectuer un arrêt complet sur au plus 60 p. 100 de la distance d'atterrissage utilisable. Lorsque la piste est mouillée, la distance d'atterrissage sur piste sèche doit être multipliée par un facteur de 1,15. Cette norme de certification offre donc une marge de sécurité de 40 p. 100 qui permet de tenir compte des techniques d'atterrissage utilisées et de l'état de la piste, s'il est moins qu'idéal.

Les diagrammes de performances d'atterrissage figurant dans le manuel du Boeing 747 (*Boeing 747 Operations Manual*) permettent de déterminer la longueur de piste requise pour l'atterrissage, en fonction de différents facteurs pouvant influencer la distance de roulement au sol comme la masse de l'appareil, le braquage des volets, l'altitude de l'aéroport par rapport au niveau de la mer et les vents au sol. Les diagrammes permettent également d'apporter des corrections aux longueurs de piste requises, advenant que la piste soit mouillée, que le fonctionnement automatique des déporteurs sol soit défectueux, ou que deux freins soient désactivés, ou même la combinaison de ces trois éléments. Ces diagrammes incluent la marge de protection de 40 p. 100 qu'exigent les règles de certification pour ce type d'appareil. Rien n'indique que l'équipage de conduite ait pris connaissance de ces diagrammes avant l'atterrissage, se fiant plutôt à leur expérience et à leur connaissance des performances de l'appareil afin de déterminer si la longueur de piste était suffisante. La masse calculée de l'appareil à l'atterrissage était de 263 000 kg. Selon le diagramme de performances d'atterrissage,

l'appareil pouvait, par vent calme, se poser sur une piste mouillée d'une longueur de 7 200 pieds, tout en respectant les règles de certification.

Compte tenu de la masse de l'appareil à l'atterrissage, l'équipage de conduite avait calculé une V_{ref} de 145 noeuds. Selon le *Aircraft Flight Manual*, la V_{ref} est la vitesse minimum à une hauteur de 50 pieds lors d'un atterrissage normal et est égale à 1,3 de la vitesse de décrochage en configuration d'atterrissage. Il s'agit de la base pour calculer la vitesse désirée et la vitesse au seuil. La vitesse désirée est la vitesse à laquelle l'approche est effectuée. Le *Boeing 747 Operations Manual* recommande que la vitesse d'approche soit égale à la V_{ref} , plus la moitié de la composante vent de face, plus la valeur totale des rafales de vent jusqu'à un maximum de 20 noeuds de correction. Lorsque les vents sont légers et variables et qu'il n'y a pas de cisaillement du vent, le manuel recommande de maintenir une vitesse d'approche égale à $V_{ref} + 5$ noeuds et de réduire à la V_{ref} avant le toucher des roues.

Renseignements météorologiques

Pendant l'approche, les vents au sol étaient variables en provenance du sud-est et du nord-ouest et soufflaient à une vitesse entre cinq et sept noeuds, ce qui offrait une composante de vent traversier pour l'atterrissage, en provenance de la gauche ou de la droite. Une cellule orageuse occasionnant une averse de pluie modérée était au-dessus de l'aéroport quelques minutes avant que l'appareil se pose sur la piste. Lorsque l'équipage de conduite a aperçu la cellule orageuse, cette dernière était située au nord-est de l'aéroport et réduisait la visibilité pendant l'approche. Toutefois à environ 500 pieds agl, la pluie a cessé, et l'équipage de conduite avait la piste en vue et a terminé l'atterrissage.

Un cisaillement du vent est un changement subit, dans la direction ou la vitesse des vents. Il est associé aux micro-rafales, au passage d'un front, aux inversions de température et aux rafales de vent associé aux orages. Le cisaillement du vent est un phénomène qui peut s'avérer extrêmement dangereux surtout en approche et au décollage. La vitesse de l'appareil par rapport au sol peut augmenter rapidement juste avant le toucher des roues et augmenter la distance d'atterrissage. La vitesse peut également diminuer soudainement au-dessous de la V_{stall} , se retrouvant ainsi au-dessous de la marge de protection de 30 p. 100 de la vitesse de décrochage, amenant l'appareil à décrocher.

Même si aucun cisaillement du vent n'avait été signalé, l'équipage anticipait la possibilité d'un tel phénomène pendant l'approche puisqu'il y avait une cellule orageuse près de l'aéroport. De plus, l'équipage a remarqué des sautes sur l'anémomètre pendant l'approche, ce qui pouvait être caractéristique d'un cisaillement du vent. L'équipage de conduite a donc décidé d'effectuer l'approche à une vitesse supérieure à la V_{ref} afin d'avoir une marge de sécurité advenant une chute de vitesse imprévue.

L'approche

Il est important que la vitesse d'approche soit maintenue au minimum en fonction de la configuration de l'appareil et des conditions d'approche. Un excès de vitesse durant l'approche cause un surplus d'énergie qui se doit d'être dissipé pendant l'atterrissage. Afin de minimiser l'impact sur l'augmentation de la distance d'atterrissage, il est préférable de maintenir la vitesse, même si elle est trop élevée, jusqu'au toucher des roues plutôt que de

tenter de réduire la vitesse pendant l'arrondi. L'analyse du FDR démontre que la technique d'atterrissage utilisée par le pilote aux commandes a consisté à réduire une bonne partie de la vitesse trop élevée durant l'arrondi, ce qui a rallongé la distance d'atterrissage.

Pendant l'approche, le PNF jette occasionnellement un coup d'oeil aux données fournies par le système de navigation par inertie (INS), comme la direction et la vitesse des vents. Cela lui permet d'être en mesure de reconnaître la possibilité d'un cisaillement du vent et de prendre les mesures correctives nécessaires. L'information recueillie indique qu'aucun signe de cisaillement du vent n'a été observé à partir des données fournies par l'INS pendant l'approche. Toutefois, peu de temps avant le toucher des roues, les vents de surface ont changé subitement, résultant en une composante variable de vent arrière avoisinant les 15 noeuds à l'atterrissage. Une composante de vent arrière de 15 noeuds, lorsque la piste est mouillée, augmente la distance de roulement entre 1 000 pieds et 1 400 pieds, selon la méthode de freinage utilisée (voir les annexes B et C).

Techniques d'atterrissage

La technique d'atterrissage du Boeing 747 consiste à amorcer l'arrondi lorsque le train d'atterrissage principal est à environ 30 pieds au-dessus du sol en augmentant le cabrage de l'appareil d'environ deux degrés, à amener les manettes des gaz au ralenti et à maintenir l'assiette de l'appareil jusqu'au toucher des roues. La distance horizontale normalement franchie entre le début de l'arrondi et le toucher des roues du train principal est d'environ 1 300 pieds. Toutefois, on recommande de planifier le toucher des roues à environ 1 000 pieds du seuil lorsque la piste est mouillée. Sachant que la piste était mouillée et pouvait être glissante en bout de piste, l'équipage de conduite s'était entendu pour effectuer l'atterrissage de manière ferme, comme le recommande le *Boeing 747 Operations Manual*.

Le Boeing 747 est muni d'un système de freinage automatique qui, lorsque sélectionné, s'active dès que les roues commencent à tourner en touchant le sol. Trois choix sont disponibles : minimum (MIN), moyen (MED) et maximum (MAX). Lorsque le système de freinage automatique est sélectionné sur MIN ou MED, un léger excès de décélération est fourni dès que le système est activé par la rotation des roues afin de permettre aux pilotes de reconnaître l'entrée en fonction du système de freinage automatique. Selon l'information recueillie, cet excès de décélération ne s'est pas fait sentir au toucher des roues. L'utilisation des freins de façon manuelle est également disponible; il suffit de placer le sélecteur sur *OFF* ou d'exercer une pression sur les pédales de freins. La fonction automatique du système de freinage sera alors désengagée. Toutefois, on recommande d'utiliser le système automatique, puisqu'on estime que l'utilisation manuelle des freins cause fréquemment un délai de 4 ou 5 secondes entre le toucher des roues du train principal et l'application des freins. Ce délai peut causer une augmentation de la distance de roulement de 800 à 1 000 pieds.

Selon le manuel de formation de l'équipage de conduite (*Flight Crew Training Manual*), les membres de l'équipage de conduite peuvent sélectionner le système de freinage automatique sur la position désirée en fonction de leur expérience relative aux pistes normalement utilisées. Ayant sélectionné le système de freinage automatique sur la position MIN, une fois atterri et constatant que la décélération était inadéquate, les deux pilotes ont appliqué fermement les freins au maximum, mais l'appareil ne s'est pas immobilisé sur la distance d'atterrissage utilisable. L'enquête n'a pas permis de déterminer à quel moment, après l'atterrissage,

l'équipage de conduite a remarqué que la décélération était insuffisante. Cependant, il s'est écoulé environ 18 secondes entre le toucher des roues et l'utilisation manuelle des freins au maximum.

La société Boeing suggère d'utiliser la position MED lorsque la piste est mouillée ou glissante ou lorsque le freinage positif est nécessaire, et pour tout atterrissage lorsque la distance de roulement est limitée. Sur une piste mouillée, avec une composante de vent arrière de 15 noeuds, établi à $V_{ref} + 5$, la distance d'atterrissage requise mesurée à partir d'une hauteur-écran de 50 pieds au-dessus du seuil de piste, jusqu'à l'immobilisation de l'appareil ayant une masse de 263 000 kg, est d'environ 7 800 pieds lorsque le système de freinage automatique est sur la position MED, comparativement à 9 200 pieds à la position MIN. L'avion est également équipé d'un système de freins anti-dérapant empêchant les roues de bloquer lors d'un atterrissage sur une piste mouillée, enneigée ou glacée. L'information recueillie indique que les freins et le système anti-dérapant fonctionnaient normalement au moment de l'atterrissage.

Le Boeing 747 est également muni d'un système d'inversion de poussée servant à faire décélérer l'appareil lors de l'atterrissage. Sur piste courte, mouillée ou glissante, la technique d'utilisation des inverseurs de poussée consiste à maintenir les inverseurs à la puissance maximale jusqu'à ce que l'appareil atteigne la vitesse de 60 noeuds, puis à réduire l'inversion de poussée de façon à atteindre 60 p. 100 du N1 à une vitesse de 40 noeuds. Toutefois, en cas d'urgence, les inverseurs peuvent être maintenus au maximum jusqu'à l'arrêt complet de l'appareil. Le maintien des inverseurs de poussée au maximum, alors que la vitesse de l'appareil est inférieure à 40 noeuds, risque d'occasionner des sautes de régime du réacteur pouvant l'amener à surchauffer, en plus de la possibilité d'ingestion de corps étrangers. Pendant l'utilisation des inverseurs de poussée, le mécanicien navigant doit surveiller étroitement les paramètres des réacteurs et doit être prêt à couper le réacteur si les sautes de régime persistent. La température des gaz d'échappement peut augmenter rapidement et excéder les limites spécifiées dans le *Boeing 747 Operations Manual*. Selon le *Flight Crew Training Manual*, un délai aussi minime que deux secondes peut augmenter considérablement les dommages causés par une surchauffe.

Renseignements sur l'aéroport

L'aéroport de Dorval est un aérodrome civil certifié. En tant qu'aéroport international, il peut être utilisé par les transporteurs internationaux. L'aéroport possède deux pistes parallèles : la 06 gauche (06L) et la 06 droite (06R) pour les décollages et les atterrissages en direction nord-est; les pistes 24 gauche (24L) et 24 droite (24R) servent aux atterrissages et aux décollages en sens inverse. L'aéroport possède une troisième piste (la 10/28) orientée d'est en ouest. À l'exception de la piste 28, toutes les pistes sont desservies par un ILS offrant aux avions en approche finale de l'information précise sur l'axe d'alignement et de descente vers la piste.

Le jour de l'incident, divers travaux de construction étaient en cours à l'aéroport de Dorval. Le seuil de la piste 06L avait été relocalisé, et un NOTAM avait été émis pour indiquer que la piste 06L/24R, dont la distance d'atterrissage utilisable normale est de 11 000 pieds, offrait une distance utilisable de 8 000 pieds. La piste 10/28 offrait une distance utilisable de 4 400 pieds, et la piste 06R/24L était utilisable sur sa pleine longueur de 9 600 pieds. Des travaux étaient également en cours sur l'aire de trafic nord, affectant la circulation au sol des aéronefs. Afin d'optimiser la capacité d'utilisation de l'aéroport de Dorval, l'exploitant de l'aéroport

recommandait aux Services de la circulation aérienne d'assigner la piste 24R aux gros porteurs effectuant des vols internationaux, et d'assigner la piste 24L aux appareils de l'aviation générale. De cette façon, la circulation au sol des gros porteurs vers leur passerelle de débarquement était plus simple et plus rapide. Toutefois, la piste 24L, d'une longueur de 9 600 pieds, était disponible pour l'atterrissage à qui en ferait la demande. Rien n'indique que l'équipage de conduite ait demandé à utiliser cette piste, ni qu'on lui ait offert de l'utiliser.

Transports Canada est responsable de la surveillance de tous les aérodromes certifiés au Canada pour s'assurer qu'ils satisfont aux exigences et conditions énoncées dans le manuel d'exploitation d'aéroport de l'exploitant. À la suite de l'incident, une inspection spéciale a été effectuée par Transports Canada afin de vérifier les marques et les balises de fermeture d'une partie de la piste 06L/24R; les marques et les balises répondaient aux normes de la publication *Aérodromes - Normes et pratiques recommandées* (TP 312).

État des pistes

La surface de la piste 06L/24R a été complètement refaite en béton asphaltique dans le cadre de travaux qui ont été achevés en 1999. La piste présente une surface sans irrégularité, conformément aux exigences de la publication TP 312. L'état de l'aire de mouvement et le fonctionnement des installations connexes doivent être surveillés, et des comptes rendus doivent être faits pour décrire les conditions de la surface qui pourraient avoir une influence sur les opérations ou la performance des aéronefs, comme la présence d'eau sur une piste. Pour pouvoir faire des comptes rendus, on recommande d'effectuer des inspections de l'aire de mouvement au moins deux ou trois fois par jour. L'information recueillie indique que les pistes ont été inspectées dans les heures précédant l'incident, et que rien d'anormal n'a été remarqué concernant l'état de la piste 06L/24R.

La *Circulaire d'information de l'Aviation commerciale et d'affaires*, numéro 0164, définit une piste mouillée comme une piste recouverte de suffisamment d'humidité pour devenir réfléchissante sans être contaminée. Sur une piste contaminée, de l'eau stagnante, de la neige mouillée, de la neige, de la neige compactée, de la glace ou du givre recouvre plus de 25 p. 100 de la longueur et de la largeur nécessaire de la surface de cette piste. À des fins opérationnelles, on estime que la contamination d'une piste est mince ou épaisse. La contamination est mince si l'épaisseur est inférieure à 3 mm, et elle est épaisse si elle est supérieure à 3 mm. Les données d'Environnement Canada indiquent qu'il est tombé, sur l'aéroport de Dorval, 1,6 mm de pluie en 30 minutes, incluant les 27 minutes précédant l'atterrissage.

Pour assurer un assèchement aussi rapide que possible, on recommande que la surface de la piste soit, si possible, bombée, sauf dans le cas où les vents de pluie les plus fréquents soufflent transversalement et où une pente uniforme descendante dans le sens du vent permet un assèchement rapide. La publication TP 312 exige que la pente transversale des pistes ne soit pas supérieure à 1,5 p. 100, ni inférieure à 1 p. 100, sauf aux intersections des pistes ou des voies de circulation où des pentes moins prononcées peuvent être nécessaires. L'enquête a permis de déterminer que la pente transversale moyenne de la piste 06L/24R était d'environ 1,4 p. 100.

Caractéristiques de friction des pistes

L'hydroplanage est un phénomène qui se produit sur une surface mouillée. L'eau ne pouvant

être chassée complètement sous le pneu, le contact entre le pneu et la piste est imparfait. Il y a trois types d'hydroplanage : l'hydroplanage dynamique, l'hydroplanage visqueux et l'hydroplanage dû à la dévulcanisation du caoutchouc. L'hydroplanage dynamique peut se produire à des vitesses supérieures à la vitesse critique d'hydroplanage sur une piste ayant une texture inadéquate, si l'épaisseur de la couche d'eau est suffisante. L'hydroplanage visqueux diffère de l'hydroplanage dynamique en ce sens que le pneu ne pénètre pas à l'intérieur de la fine couche d'eau. Toutefois, la surface doit être lisse. On retrouve cette condition dans les zones recouvertes de caoutchouc laissé lors de la mise en rotation des roues à l'atterrissage ou lorsque la surface de la piste est polie par le passage répété des avions au même endroit. Ce type d'hydroplanage est associé aux pistes mouillées ou recouvertes de glace, et il peut persister jusqu'à une vitesse très basse. Quant à l'hydroplanage dû à la dévulcanisation du caoutchouc, il se produit lorsque le pneu n'est pas en rotation durant une période prolongée et laisse des marques témoins sur la piste. La partie du pneu touchée présentera des dommages considérables occasionnés par la chaleur générée entre le pneu et la surface de la piste.

À l'atterrissage, le coefficient de friction d'une piste est très important, surtout au toucher des roues, afin de permettre aux roues de tourner. Certains systèmes reliés à la rotation des roues, comme le système de freinage automatique, peuvent augmenter considérablement la distance d'arrêt s'ils n'entrent pas en fonction à la phase initiale de l'atterrissage. Un délai d'une seconde peut se traduire par une distance de roulement d'environ 250 pieds. Il n'est pas inhabituel que la rotation des roues soit retardée à cause d'un mauvais coefficient de friction généralement dû à l'accumulation de caoutchouc sur une piste mouillée.

Plusieurs aéroports au Canada, dont Dorval, sont dotés de décéléromètres mécaniques et électroniques qui permettent d'obtenir une valeur moyenne du frottement sur piste. Le décéléromètre, monté sur un véhicule d'essai, mesure les forces de freinage agissant sur le véhicule lorsque les freins sont appliqués. Les chiffres moyens obtenus à l'aide de ces décéléromètres sont appelés « coefficient canadien de frottement sur piste » (CRFI) et servent d'indice de freinage aux pilotes qui désirent estimer les performances de leur appareil lorsque les conditions de piste sont mauvaises. Avec le temps, on s'est rendu compte que les résultats obtenus à l'aide de différents types de décéléromètre sur des pistes recouvertes d'eau ou de neige fondante manquaient de précision, si bien qu'aucun CRFI n'est communiqué dans de telles conditions. En été et lorsqu'il pleut, les valeurs de CRFI ne sont pas fournies.

Pour s'assurer que les caractéristiques de friction respectent les normes réglementaires, il faut les mesurer régulièrement au moyen d'un appareil automouillant de mesure continue du frottement. Contrairement au décéléromètre servant à établir le CRFI, l'appareil ne mesure pas les forces de freinage, mais plutôt le coefficient de frottement. Le véhicule équipé de l'appareil de mesure effectue quatre passages à trois mètres de chaque côté du centre de la piste, sur toute la longueur de la piste. Lors de ces quatre passages, des coefficients de frottement sont notés pour chaque section de 100 mètres de longueur; ensuite on fait la moyenne des quatre essais, et cela constitue le coefficient de frottement moyen sur toute section de 100 mètres. Par la suite, on prend chaque coefficient de frottement moyen sur toute section de 100 mètres pour établir un coefficient de frottement moyen sur toute la piste. Les valeurs des coefficients se situent entre 0 et 100. Une faible valeur du coefficient de frottement correspond à un mauvais coefficient de friction.

Selon la publication TP 312, il est recommandé de considérer qu'une piste ou une section de piste est glissante lorsque les caractéristiques de frottement de la surface de la piste, déterminées au moyen d'un appareil automouillant de mesure continue du frottement, sont inférieures au niveau minimum spécifié dans le tableau 1 ci-après. Dans un tel cas, la publication TP 312 stipule que des renseignements sur une piste ou une section de piste qui peut devenir glissante lorsqu'elle est mouillée doivent être communiqués.

Tableau 1 - Normes de Transports Canada		
Normes d'entretien	Lorsque le coefficient de frottement moyen sur toute la piste est inférieur à :	Lorsque le coefficient de frottement moyen sur toute section de 100 mètres est inférieur à :
Des mesures correctives d'entretien doivent être prises	50	30
Des mesures correctives d'entretien doivent être envisagées	60	40

Entre le mois de novembre 1999 et le jour de l'incident, quatre essais du coefficient de frottement ont été effectués sur les pistes de l'aéroport de Dorval, soit le 19 novembre 1999, le 25 mai 2000, le 16 juin 2000 et le 21 juillet 2000 (voir le tableau 2 ci-après). En comparant les résultats des essais de coefficient de frottement du tableau 2 avec les normes de Transports Canada présentées au tableau 1, on peut constater, qu'à l'exception des résultats des essais du mois de mai 2000, tous les essais exigeaient la planification de mesures correctives d'entretien afin de rétablir le coefficient de frottement.

Tableau 2 - Résultats des essais de coefficient de frottement		
Date des essais	Coefficient de frottement moyen sur toute la piste	Coefficient de frottement le plus bas enregistré sur toute section de 100 mètres
19 novembre 1999	60	34
25 mai 2000	76	47
16 juin 2000	63	31
21 juillet 2000	57	34

Le rapport des essais du mois de novembre 1999 indique que la surface de la piste 06L/24R présentait une faible texture et un bas niveau de friction débutant à environ 3 300 pieds à l'est du seuil de la piste 06L, soit près de l'intersection de la voie de circulation B2, et se dégradant davantage dans la zone de poser des roues, entre 1 300 et 2 600 pieds du seuil de la piste 24R. Les résultats des essais du mois de mai 2000 étaient supérieurs à la norme stipulée dans la publication TP 312; le rapport signale cependant que ces essais ont été effectués suivant des

conditions météorologiques froides et pluvieuses, rendant la piste à sa condition de surface optimale. En effet, le rapport prévoit que le coefficient moyen sur toute la piste et le coefficient de toute section de 100 mètres se dégradent à l'approche de l'été. Les résultats des essais du 16 juin 2000 et du 21 juillet 2000 indiquent des coefficients de friction exigeant que des mesures d'entretien soient planifiées. Quant aux résultats des essais effectués le 21 juillet 2000 sur les deux autres pistes, le rapport indique, pour la piste 06R/24L, des coefficients de friction moyens de 74 et de 82 pour la piste 10/28, soit de 30 p. 100 et 43 p. 100 supérieurs à ceux de la piste 06L/24R.

À titre d'exploitant de l'aéroport de Dorval, Aéroports de Montréal (ADM) doit se conformer aux normes de la publication TP 312. L'exploitant a diverses responsabilités; il doit notamment émettre des NOTAM, s'il y a lieu, et faire l'entretien de l'aéroport conformément aux exigences spécifiées dans le manuel d'exploitation d'aéroport. Au mois de mars 2000, un NOTAM avait été émis indiquant que les 4 000 premiers pieds de la piste 24R étaient très glissants lorsque la surface était mouillée, à cause de l'accumulation de caoutchouc sur la piste. Vu les résultats des essais de friction du 25 mai 2000 qui présentaient un coefficient supérieur à la norme, le NOTAM n'a pas été renouvelé, et il est venu à expiration le 29 juin 2000.

À la suite des résultats des essais du coefficient de frottement du 16 juin 2000 et du 21 juillet 2000, Transports Canada a demandé que l'administration aéroportuaire fournisse un plan d'action acceptable afin de rétablir le coefficient de friction sur la piste 06L/24R. On recommandait également d'émettre un NOTAM indiquant qu'il se pouvait que la piste et l'extrémité de la piste 24R soient glissantes lorsqu'elles sont mouillées. ADM a été informé de cette recommandation, mais a jugé qu'il n'était pas nécessaire d'émettre un NOTAM puisque les résultats des essais de coefficient de frottement respectaient les normes de la publication TP 312 qui exigeaient seulement que des mesures d'entretien soient planifiées, et parce que la piste ne répondait pas aux critères établis pour une piste glissante. Toutefois, afin de respecter l'exigence relative à la planification de mesures d'entretien, ADM a décidé de devancer les travaux pour enlever le caoutchouc qui n'étaient prévus qu'à l'automne. Les travaux ont été effectués le 23 août 2000 par une firme spécialisée dont les services ont été retenus par ADM. Le rapport du 25 août 2000 concernant les essais de coefficient de friction indique que même s'il est évident que l'enlèvement récent du caoutchouc a permis de rétablir le coefficient de friction au-dessus de la norme, l'extrémité de la piste 24R présente toujours des signes de contamination attribuable à l'accumulation de caoutchouc, ce qui affecte la texture de la surface de la piste.

Analyse

Les membres de l'équipage de conduite possédaient les licences et les qualifications nécessaires pour effectuer le vol, conformément à la réglementation en vigueur. Les trois membres de l'équipage de conduite connaissaient bien l'aéroport de Dorval, y ayant atterri à plusieurs reprises dans les mois précédents. Le programme de formation permettait à l'équipage de conduite de bien connaître les performances d'atterrissage de l'appareil dans différentes conditions de piste.

L'appareil était certifié, équipé et entretenu conformément à la réglementation en vigueur et aux procédures approuvées. L'examen de l'avion après l'incident n'a révélé aucun dommage, ni défectuosité ou problème qui aurait pu contribuer à l'incident. La fluctuation de puissance

du réacteur numéro 1 à l'atterrissage pourrait s'expliquer par l'utilisation au maximum des inverseurs de poussée à une vitesse inférieure à 40 noeuds, ou par la composante de vent arrière, ou même par la combinaison de ces deux facteurs. Il est fort possible que le réacteur numéro 2 ait été affecté par les mêmes facteurs, mais que les sautes de régime de ce réacteur étaient plus importantes, au point de provoquer la surchauffe et l'extinction du réacteur. Les flammes qui s'échappaient du réacteur numéro 2, observées par le personnel de la tour, provenaient de la tuyère d'échappement. Puisque les boucles de détection d'incendie ne se trouvent pas dans cette partie du réacteur, l'alarme incendie dans le poste de pilotage ne pouvait se déclencher. Du fait que les flammes se sont dissipées d'elles-mêmes et qu'il n'y avait aucune indication d'incendie réacteur dans le poste de pilotage, la décision du pilote commandant de bord de ne pas faire évacuer les passagers était légitime.

Malgré les différentes contraintes opérationnelles qu'aurait causé l'utilisation de la piste 24L pour l'atterrissage, il aurait été préférable d'utiliser cette piste ou de recommander son utilisation puisque cette piste offrait une distance d'atterrissage supplémentaire de 1 600 pieds. De plus, la piste 24L avait un coefficient de friction d'environ 30 p. 100 supérieur à celui de la piste 24R. Toutefois, l'équipage de conduite ne pouvait considérer ce facteur pour prendre la décision d'utiliser cette piste puisque les conditions de friction de piste ne sont pas fournies aux pilotes. Étant donné que les valeurs de coefficient de frottement de piste ne sont pas disponibles durant l'été et lorsqu'il pleut, le pilote n'a pas d'autre choix que de se fier à l'évaluation de la qualité du freinage signalée par d'autres pilotes qui ont atterri avant lui pour juger si le freinage est adéquat pour son type d'appareil. La décision du pilote d'accepter une piste en particulier pour l'atterrissage est donc souvent fondée sur de l'information imprécise et souvent incomplète.

Vu qu'il n'est tombé que 1,6 mm de pluie dans les 30 minutes précédant l'atterrissage et que les caractéristiques de construction de la piste permettaient un écoulement adéquat de l'eau, il est permis de croire que la piste n'était pas contaminée, mais plutôt mouillée.

La piste mouillée et l'accumulation de caoutchouc sur la piste créaient des conditions propices à l'hydroplanage de type visqueux. Même si le toucher des roues a été ferme, il est possible que l'état de la piste dans la zone de poser des roues n'ait pas permis aux roues du train principal de se mettre en rotation dès qu'elles ont touché le sol, ce qui a empêché le système de freinage automatique d'entrer en fonction au toucher des roues et a rallongé la distance d'arrêt. Ce délai d'entrée en fonction du système de freinage automatique pourrait expliquer pourquoi l'équipage de conduite n'a pas senti immédiatement le léger excès de décélération normalement fourni par le système de freinage automatique au toucher initial des roues.

Vu la composante de vent arrière apparue quelques secondes avant le toucher des roues et le fait que la piste était mouillée, l'équipage de conduite se trouvait dans une situation où il ne pouvait presque pas s'écarter du profil d'atterrissage idéal. En effet, même si le freinage avait été effectué avec le système automatique sur la position MED, tel que recommandé, et même si la vitesse d'approche avait été maintenue à $V_{ref} + 5$, l'appareil avait besoin, dans de telles conditions, d'une distance de 7 800 pieds environ pour s'immobiliser, ce qui ne laissait que 200 pieds de marge de manoeuvre.

Constatant que la décélération était insuffisante, l'utilisation manuelle des freins au maximum était fondée puisqu'elle offre une plus grande décélération que la position MAX du système de

freinage automatique. Toutefois, il semble qu'il a fallu un certain temps à l'équipage de conduite avant de constater que le freinage était inadéquat pour la distance de piste restante. En effet, l'application manuelle des freins au maximum s'est effectuée environ 18 secondes après le toucher des roues alors qu'il ne restait que 1 500 pieds à parcourir avant d'atteindre l'extrémité de piste relocalisée.

Plusieurs facteurs ont contribué à rallonger la course à l'atterrissage au point que l'avion a dépassé l'extrémité de piste relocalisée. Certains de ces facteurs pouvaient être maîtrisés par l'équipage, alors que d'autres ne dépendaient pas de lui. L'équipage de conduite n'avait aucune façon de savoir dans quel état était la piste. La piste avait un coefficient de friction indiquant qu'elle pouvait être glissante si elle était mouillée, mais cette information n'a pas été fournie aux pilotes. Il est possible que le freinage de l'appareil ait été affecté par le phénomène de l'hydroplanage visqueux rencontré à certains endroits sur la piste, augmentant ainsi la distance d'arrêt. De plus, même si l'équipage de conduite était conscient qu'il pouvait y avoir un cisaillement du vent, il ne pouvait prédire l'intensité. Vu que le vent arrière est apparu alors que l'appareil franchissait le seuil de piste à très basse altitude, il était difficile pour le PNF de prendre conscience des données de vent fournies par l'INS puisqu'il devait exercer une bonne surveillance extérieure pour l'atterrissage.

Il était justifié d'augmenter la vitesse d'approche en raison de la présence possible d'un cisaillement du vent; toutefois, l'équipage de conduite était en mesure de contrôler la vitesse de l'appareil de façon à minimiser l'impact sur l'augmentation de la distance d'atterrissage causée par la vitesse supérieure à la V_{ref} . En effet, il aurait été préférable de maintenir la vitesse, même si elle était trop élevée, jusqu'au toucher des roues, plutôt que de tenter de réduire la vitesse pendant l'arrondi. Résultat, l'avion a touché des roues plus loin que le point de toucher idéal. L'équipage de conduite n'a pas utilisé les diagrammes de performances d'atterrissage lui permettant de constater que toute augmentation de vitesse ou l'équivalent d'une composante de vent arrière supérieure à 8 noeuds ne lui fournissait plus la marge de sécurité établie à 40 p. 100 qui permet de tenir compte des techniques d'atterrissage et de l'état de la piste. Il est fort probable que l'équipage aurait envisagé d'utiliser une piste plus longue s'il avait connu l'état réel de la piste et avait pris connaissance des diagrammes de performances d'atterrissage.

Transports Canada considérait que la piste pouvait être glissante si elle était mouillée et a recommandé à deux reprises à ADM d'émettre un NOTAM. ADM s'en tenait au fait que les résultats des essais de coefficient de friction n'étaient pas inférieurs à la norme exigeant que des mesures correctives d'entretien soient prises, mais plutôt inférieurs à la norme exigeant que des mesures correctives d'entretien soient envisagées et que, pour cette raison, la piste ne devait pas être considérée glissante et que l'émission d'un NOTAM n'était pas nécessaire. Il existe donc une divergence d'interprétation de l'information fournie dans la publication TP 312 qui recommande de considérer qu'une piste ou une section de piste est glissante lorsque les caractéristiques de frottement de la surface de la piste sont inférieures au niveau minimum spécifié dans le tableau 1. Il semble que les recommandations faites par Transports Canada n'ont pas force de loi, puisque à deux reprises les recommandations en question n'ont pas été observées par ADM, et Transports Canada n'a pas fait de démarches supplémentaires en guise de suivi.

L'enquête a donné lieu au rapport de laboratoire suivant :

LP 073/2000 - *FDR Analysis* (Analyse de l'enregistreur de données de vol).

On peut obtenir ces rapports en s'adressant au Bureau de la sécurité des transports du Canada.

Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs

1. La technique d'atterrissage utilisée par le pilote aux commandes, consistant à réduire une bonne partie de la vitesse trop élevée durant l'arrondi, a contribué à augmenter la distance d'atterrissage.
2. La piste mouillée et l'accumulation de caoutchouc sur la piste créaient des conditions propices à l'hydroplanage de type visqueux, contribuant ainsi à l'augmentation de la distance d'arrêt.
3. Le système automatique de freinage était à la position MIN alors qu'il est recommandé de le mettre à la position MED, ce qui a contribué à augmenter la distance d'arrêt.

Faits établis quant aux risques

1. Le coefficient de friction de la piste indiquait que la piste était glissante lorsqu'elle était mouillée, mais cette information n'a pas été fournie aux pilotes; cette information aurait pu inciter l'équipage de conduite à demander à utiliser une piste plus longue ou l'inciter à utiliser le système de freinage automatique sur la position MED plutôt que MIN.
2. L'équipage de conduite n'a pas utilisé les tables de calculs des distances d'atterrissage, et, en conséquence, n'a pas cru bon de demander une piste plus longue à l'atterrissage.
3. Aéroports de Montréal (ADM) n'a pas suivi les recommandations de Transports Canada d'émettre un NOTAM pour indiquer que la piste pouvait être glissante si elle était mouillée, ce qui a privé l'équipage de conduite d'un renseignement important.
4. En franchissant le seuil de piste et pendant une grande partie du roulement au sol, l'appareil a subi une composante moyenne de vent arrière d'environ 15 noeuds, augmentant ainsi la distance d'arrêt.

Autres faits établis

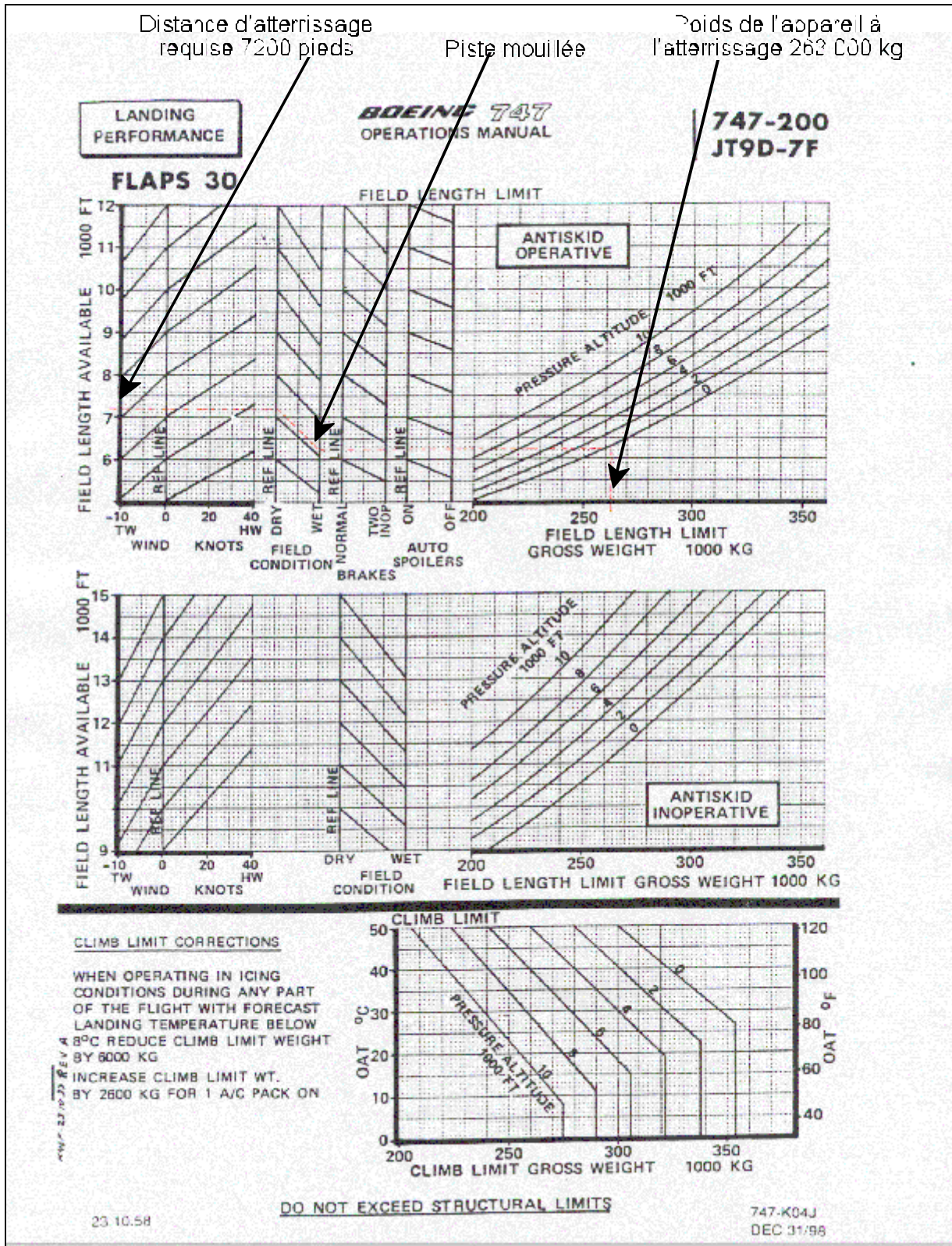
1. Il existe une divergence d'interprétation du paragraphe 2.5.2.2 de la publication *Aérodromes - Normes et pratiques recommandées* (TP 312), entre Transports Canada et ADM, quant à l'intervention que nécessitent certains niveaux de frottement d'une piste.

Mesures de sécurité

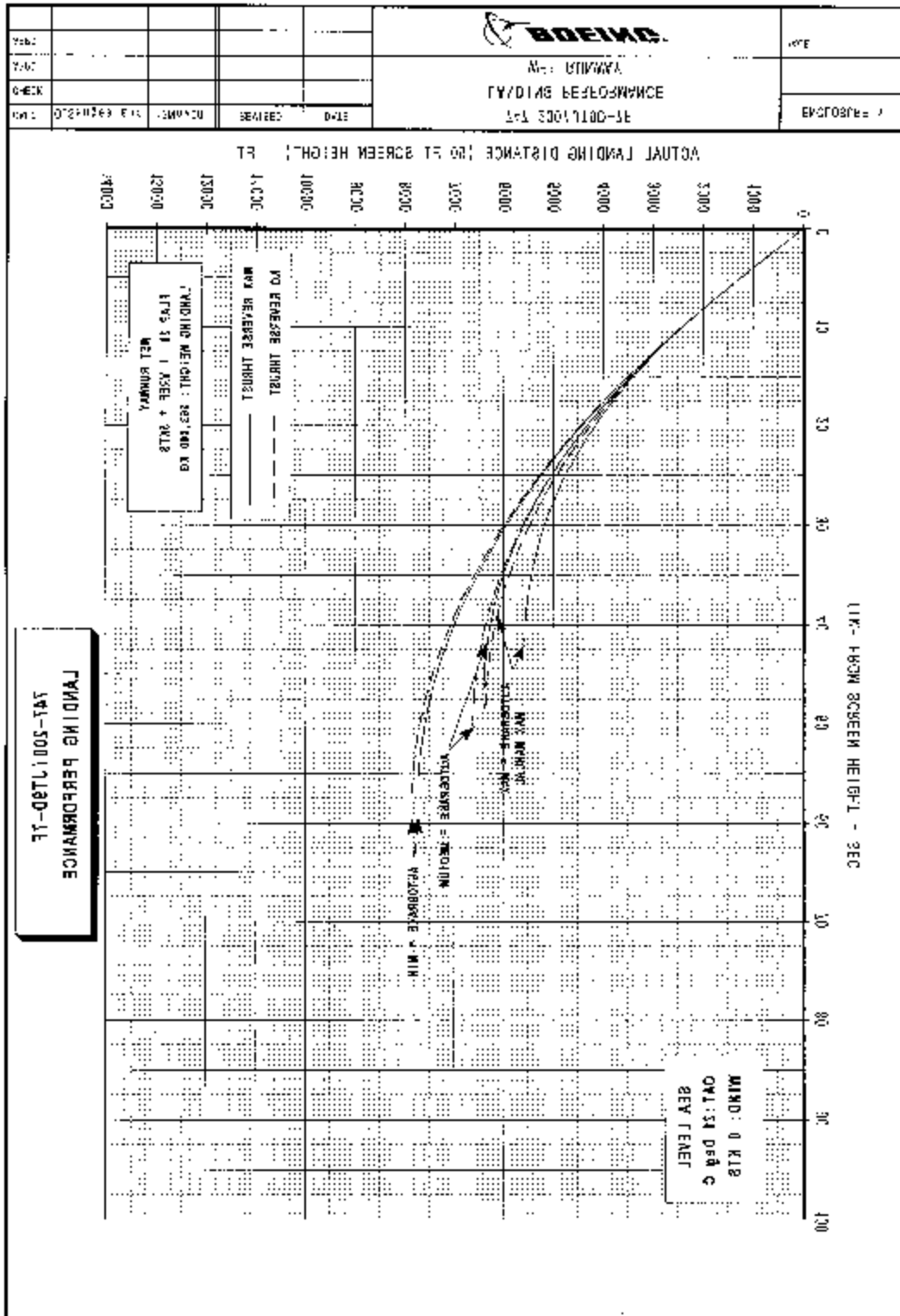
L'enlèvement du caoutchouc a été effectué le 23 août 2000 par une firme spécialisée dont les services ont été retenus par ADM, ce qui a permis de rétablir le coefficient de friction au-dessus de la norme.

Le présent rapport met fin à l'enquête du Bureau de la sécurité des transports sur cet accident. Le Bureau a autorisé la publication du rapport le 30 août 2001.

Annexe A - Diagramme de performances d'atterrissage



Annexe B - Distances d'atterrissage sur piste mouillée Vent calme



Annexe C - Distances d'atterrissage sur piste mouillée

Composante de vent arrière de 15 noeuds

