



**sur les turbulences en transport aérien  
en date du 28 août 2008**



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

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ENERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

# ***Table des matières***

<b>GLOSSAIRE</b>	<b>3</b>
<b>CADRE DE L'ÉTUDE</b>	<b>4</b>
<b>1 - PRÉSENTATION</b>	<b>5</b>
1.1 Les différents types de turbulences rencontrées et les occurrences associées	5
1.1.1 Cellules convectives	5
1.1.2 Les turbulences en air clair (CAT)	8
1.2 Prévisions des phénomènes turbulents par les services météorologiques	11
1.3 Les conséquences en cabine et la poursuite du vol	12
<b>2 - RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES</b>	<b>13</b>
2.1 Prévisions des turbulences par les services météorologiques	13
2.1.1 Cartes TEMSI	13
2.1.2 Messages SIGMET	13
2.1.3 Indice de prévision de turbulence en air clair	15
2.2 Outils à l'usage des équipages : le radar météorologique embarqué	15
2.2.1 Principe	15
2.2.2 Description et utilisation	16
2.2.3 Les limites d'utilisation	16
2.2.4 Formation	18
2.2.5 Nouvelle génération de radar	18
2.3 Outils à l'usage des services de la navigation aérienne	19
2.4 Informations obtenues en vol	20
2.4.1 Communications avec les organismes de contrôle et les équipages en vol	20
2.4.2 Communications avec l'exploitant	21
2.4.3 Communication par liaison de données	21
2.4.4 Report automatique de turbulence	21
2.5 Procédures	22
<b>3 - ANALYSE : LES PRINCIPALES CAUSES MISES EN ÉVIDENCE PAR LES ENQUÊTES</b>	<b>24</b>
3.1 Préparation du vol	24
3.2 En vol	24
3.2.1 Actualisation des informations	24
3.2.2 Vigilance	26
3.3 Conséquences en cabine	26

<b>4 - CONCLUSIONS</b>	<b>27</b>
<b>5 - RECOMMANDATIONS</b>	<b>28</b>
5.1 Mise en commun des informations météorologiques entre pilotes et contrôleurs	28
5.2 Enregistrement des paramètres de réglage du radar météorologique embarqué et des images présentées	29
<b>LISTE DES ANNEXES</b>	<b>30</b>

# Glossaire

ACARS	Aircraft Communication Addressing and Reporting System (Système de Communication par Liaison de Données)
AIREP	Compte rendu en vol spécial
AMM	Aircraft Maintenance Manual
ASPOC	Application de Signalisation et de Prévision des Orages pour la Circulation aérienne
ATC	Contrôle de la circulation aérienne
ATL	Aircraft Technical Logbook
CAT	Turbulence en Air Clair
CIV	Centre d'Information de Vol
CRNA	Centre en Route de la Navigation Aérienne
CVM	Centre de Veille Météorologique
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
ENAC	Ecole Nationale de l'Aviation Civile
FDR	Enregistreur de Paramètres
FIR	Région d'information de vol
FL	Niveau de Vol
MHz	Mégahertz
MMO	Nombre de Mach Maximal en Opération
ND	Navigation Display
NM	Mille Marin
OPL	Officier Pilote de Ligne
PNC	Equipage de Cabine
PNT	Equipage Technique
PA	Pilote automatique
SIGMET	Messages de phénomènes météorologiques en route spécifiés
SIV	Service d'Information de Vol
TEMSI	Carte de prévision du temps significatif
VMO	Vitesse Maximale en Opération
VOR	Radiophare omnidirectionnel VHF
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

Remarque : par convention, lorsque le mot « annexe » commence par une minuscule (annexe) il désigne une annexe au présent document ; lorsqu'il commence par une majuscule (Annexe) il désigne une des Annexes à la Convention de Chicago.

## CADRE DE L'ÉTUDE

Les phénomènes de turbulence occasionnent régulièrement des blessures graves parmi le personnel de cabine et les passagers, ainsi que des dommages à la structure de l'avion. Dans certains cas, ils provoquent des blessures mortelles.

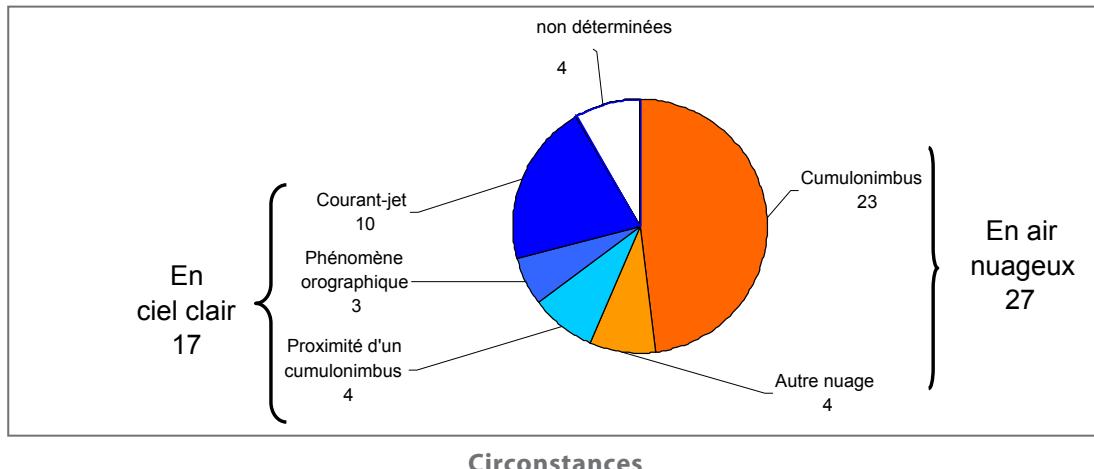
Cette étude s'intéresse aux accidents et incidents de transport public survenus en croisière au cours desquels les turbulences rencontrées sont d'origine atmosphérique. Sont donc exclus les événements pour lesquels une action sur les commandes est la cause principale des accélérations rencontrées et ceux engendrés par des turbulences de sillage. Dans ce cadre, le BEA a recensé quarante-huit occurrences entre 1995 et 2007 survenues en France ou à l'étranger à des avions exploités, immatriculés ou construits en France. Dix-neuf de ces occurrences pour lesquelles le dossier est particulièrement complet, ont été utilisées pour identifier les facteurs contributifs dans ce type d'événements.

Pour réaliser cette étude, le BEA a également utilisé des informations fournies par Météo France, la DGAC (DSNA et DCS), Eurocontrol, Airbus ainsi que plusieurs exploitants français.

Dans cette étude, les circonstances des accidents ou incidents et le rôle joué par les différents acteurs sont analysés afin d'en tirer des enseignements de sécurité. Les aspects relatifs au contrôle aérien et aux prévisions météorologiques sont abordés dans le contexte français actuel.

# 1 - PRÉSENTATION

Les quarante-huit occurrences recensées se répartissent comme suit :



Elles ont fait un mort et vingt-huit blessés graves parmi les passagers, vingt et un blessés graves parmi le personnel de cabine. Les occurrences provoquant le plus grand nombre de blessés graves sont survenues en air nuageux.

## 1.1 Les différents types de turbulences rencontrées et les occurrences associées

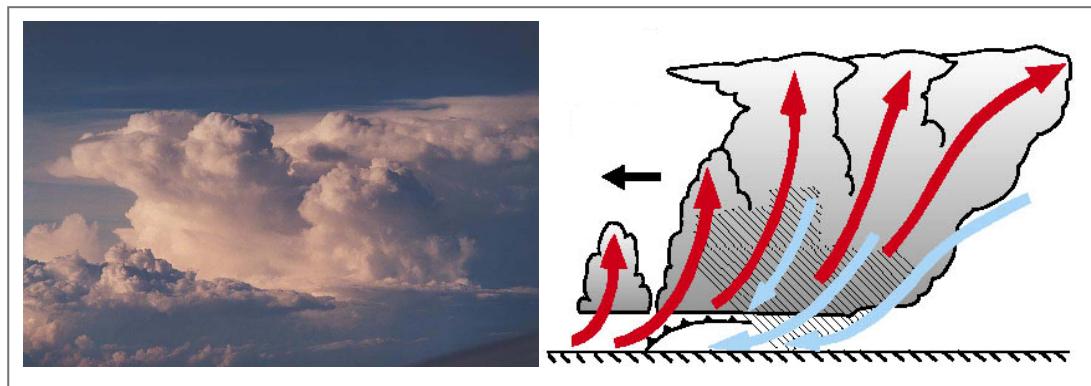
La turbulence en aéronautique désigne toute variation de la direction et/ou de la vitesse du vent engendrant des accélérations verticales et/ou horizontales.

### 1.1.1 Cellules convectives

#### 1.1.1.1 Description des phénomènes

De nombreuses turbulences sont associées au passage de l'avion dans ou à proximité d'un cumulonimbus<sup>(1)</sup>. Ces nuages génèrent de puissants courants, ascendants ou descendants, pouvant atteindre des vitesses de l'ordre de 20 à plus de 50 m/s. Leur durée de vie est de une à quelques heures. Les zones situées en ciel clair au-dessus du sommet et à proximité du cumulonimbus peuvent également être le siège de fortes turbulences, ce qui nécessite de prévoir des marges d'évitement. La valeur de ces marges est délicate à établir car l'intensité et l'étendue des phénomènes, qui peuvent évoluer rapidement, sont variables.

<sup>(1)</sup>Il existe d'autres cellules convectives. Seuls les cumulonimbus sont considérés ici car ce sont eux qui génèrent les turbulences les plus fortes.



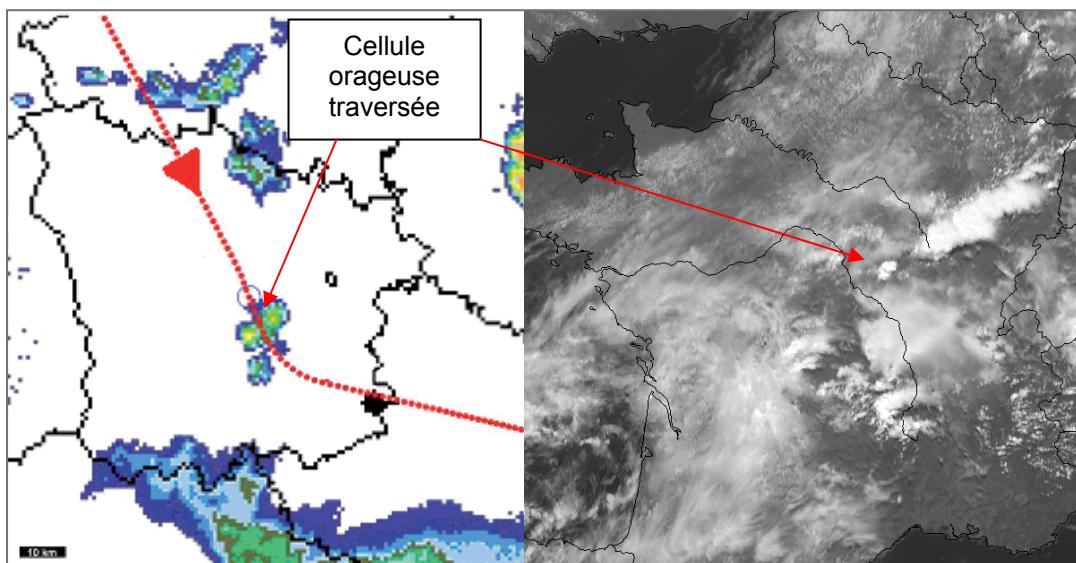
Ces cellules, bien visibles lorsque l'avion évolue à l'extérieur des nuages, sont souvent difficiles à distinguer de nuit ou lorsque l'avion vole dans les cirrus, au sommet de la couche nuageuse ou encore lorsqu'elles sont noyées dans la couche. Elles sont en général détectables par une recherche active à l'aide du radar météorologique de bord (voir paragraphe 2.2).

#### 1.1.1.2 Les occurrences associées

Parmi les dix-neuf occurrences étudiées en détail, quatorze sont associées à des phénomènes orageux. Le cas le plus fréquent (dix occurrences) est le passage de l'avion dans ou en marge d'un cumulonimbus non détecté ou détecté tardivement par l'équipage.

#### **Exemple : accident survenu à un Airbus A320 en juillet 2004 au FL270 à proximité de Nevers.**

Lors d'un vol entre Paris Charles de Gaulle et Genève (Suisse), l'avion évolue de jour au FL270 en limite de couche nuageuse à une vitesse de croisière accélérée en raison d'un retard pris lors de la première rotation. Le commandant de bord (non aux commandes) aperçoit tardivement un cumulonimbus droit devant, dont le sommet est situé plusieurs milliers de pieds au-dessus. Il déconnecte le pilote automatique, vire à gauche pour l'éviter et fait l'annonce en cabine « ici le poste de pilotage, turbulences, PNC assis, attachés ». Voyant qu'il n'évitera pas le nuage, il sélectionne un Mach de 0.77 et remet les ailes horizontales. L'avion entre dans une zone de fortes précipitations (grêle) et de turbulences. Pendant une vingtaine de secondes, il est soumis à des accélérations verticales comprises entre - 0,7 g et + 3 g. L'avion passe 750 ft au-dessus de son niveau. La documentation non attachée et les plateaux repas sont projetés. Un passager est grièvement blessé, deux personnels de cabine ainsi qu'un autre passager sont légèrement blessés. Une perte momentanée de la génératrice n° 1 entraîne l'extinction des écrans du côté gauche.



Précipitations détectées par les radars au sol ; image satellite infrarouge

## **Enseignements issus de l'enquête**

- La situation météorologique évoluait très rapidement et la cellule n'était pas détectée quinze minutes auparavant par les radars de météo-France.
- A son approche, et en l'absence de balayage vertical à l'aide du tilt, celle-ci était peu visible sur le radar météorologique embarqué. Celui-ci, réglé au tilt habituel en croisière, détectait la partie supérieure du nuage composée majoritairement de cristaux de glace.
- L'avion évoluait en limite supérieure de couche nuageuse, ce qui rendait la détection visuelle difficile.
- La prise du repas par l'équipage sur une étape courte n'a pas favorisé la surveillance active à l'aide du radar météorologique ni la surveillance visuelle des conditions extérieures.
- L'absence de conditions orageuses en croisière lors de la première rotation a diminué l'attention de l'équipage lors de la deuxième rotation, malgré la prévision d'orage mentionnée sur la carte TEMSI.
- La vitesse supérieure à celle recommandée en turbulence a augmenté l'intensité de la turbulence ressentie.

Trois occurrences sont associées à la poursuite du vol dans des conditions orageuses identifiées, comme l'illustre l'exemple suivant :

### ***Accident survenu à un Beech 100 « King Air » en juillet 2005 à la verticale du VOR de PTV lors d'un vol entre Genève et Deauville.***

Au FL180, l'équipage en contact radio avec Paris Contrôle demande plusieurs altérations de cap par la droite afin d'éviter une cellule orageuse qu'il visualise sur l'écran du radar météorologique embarqué. Ces demandes sont accordées par le contrôleur qui demande à l'équipage de descendre au FL120 afin de ne pas interagir avec les décollages d'Orly. L'équipage demande d'autres caps d'évitement par la droite. Le contrôleur l'informe qu'une altération supérieure de cap le ferait rentrer dans des « zones interdites », en réalité les départs de la région Parisienne. Le pilote indique qu'il essaie d'éviter des cumulonimbus. L'avion pénètre dans une cellule orageuse très active avec turbulence et grêle. L'approche et l'atterrissement se déroulent sans autre incident. Au sol, des dégâts importants sur le nez, les ailes et les empennages de l'avion sont constatés.

Les pilotes indiquent qu'ils avaient effectué le vol aller quelques heures auparavant, dans de très bonnes conditions météorologiques. Lors de la préparation du vol retour, le commandant de bord avait pris connaissance d'un SIGMET qui mentionnait un orage violent entre Bourges et Orléans avec un déplacement de l'activité vers le nord / nord-est à 30 kt. Le copilote avait visualisé l'image satellite avant le départ mais n'avait pas eu connaissance du SIGMET et n'avait pas prêté attention à la position et à l'étendue de la cellule orageuse.

## **Enseignements issus de l'enquête**

- Avant le départ, l'équipage de conduite n'a pas réalisé de synthèse des informations météorologiques recueillies, sans doute conforté par les bonnes conditions du vol aller.

- L'équipage n'avait pas conscience de la position précise et de l'étendue des cellules orageuses qui évoluaient rapidement.
- Il n'était pas possible pour le contrôleur aérien d'anticiper les demandes de l'équipage car il ne connaissait pas avec précision la position et l'étendue des cellules orageuses.
- En choisissant de poursuivre le vol sans pouvoir faire l'altération de cap demandée, l'équipage est entré dans la zone orageuse.

Une occurrence s'est produite en air clair au-dessus de cumulonimbus :

***Accident survenu à un Airbus A340 en mars 2004 au FL360 lors d'un vol entre Saint-Martin et Paris Charles de Gaulle.***

En croisière, le commandant de bord s'absente du poste de pilotage pendant quelques minutes. Peu de temps après, l'avion, hors des nuages, rencontre de fortes turbulences. L'alarme de survitesse se déclenche et le pilote automatique se désactive. L'OPL, occupé à reprendre le contrôle de l'avion, ne peut ouvrir la porte du poste de pilotage au commandant de bord qu'à la fin des turbulences.

Ces turbulences se sont produites à la fin du service du repas et plusieurs navigants de cabine situés à l'arrière de l'avion ont été projetés au plafond de la cabine.

L'équipage indique qu'une zone orageuse était présente à une altitude inférieure au niveau de croisière. Une carte TEMSI du dossier de vol prévoyait la présence de cumulonimbus isolés dont le sommet pouvait atteindre le FL390.

#### **Enseignements issus de l'enquête**

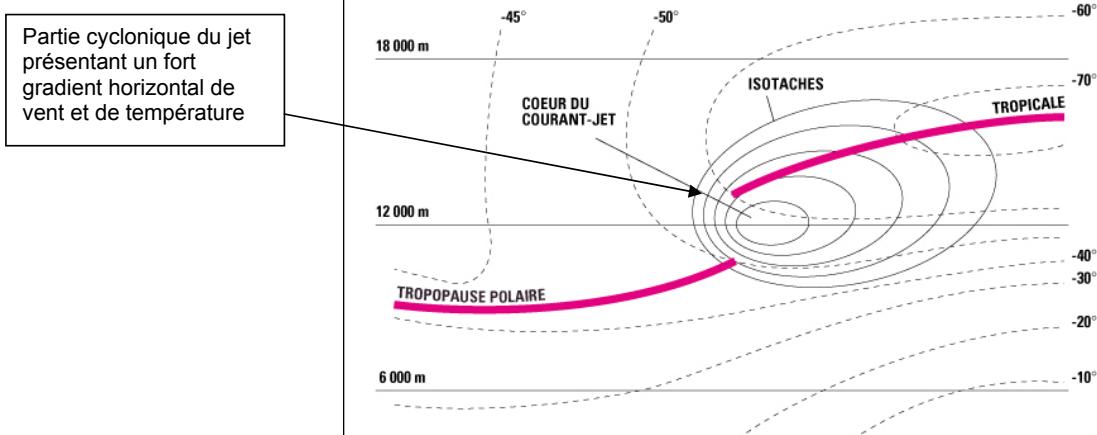
- L'évolution à proximité d'une zone orageuse prévue nécessite des précautions accrues de la part de l'ensemble de l'équipage.

#### **1.1.2 Les turbulences en air clair (CAT)**

Les turbulences décrites ici sont celles associées à des phénomènes de jet, de talweg et d'onde orographique. Elles excluent les turbulences en air clair à proximité des cellules orageuses, qui ont été décrites ci-avant.

##### **1.1.2.1 Description des phénomènes**

La turbulence en air clair est généralement associée à des jets qui délimitent deux masses d'air distinctes. Elle se situe généralement au voisinage de la tropopause tropicale où les gradients de températures et de vents verticaux sont les plus forts ainsi que dans la partie cyclonique du jet où les gradients horizontaux de températures et de vents sont les plus forts. Une variation rapide et importante de la température et du vent en croisière sera donc un indice de risque de turbulence.



**Coupe verticale d'un courant-jet**

(Source : service météorologique du Canada ; les isotaches sont les lignes joignant tous les points de même intensité de vitesse de vent)

Les turbulences en air clair peuvent également être provoquées par des ondes orographiques générées par l'écoulement d'une masse d'air au-dessus d'un relief. Elles peuvent être ressenties à des altitudes nettement supérieures à ce relief. Météo France considère qu'une onde est forte lorsqu'elle s'accompagne de courants verticaux de 3 m/s ou plus ou d'une forte turbulence et modérée pour des valeurs comprises entre 1,75 et 3 m/s.

### 1.1.2.2 Occurrences

Sur les quatre occurrences liées à ces phénomènes de turbulences en air clair, deux sont d'origine orographique, une est associée à la traversée d'un jet et une est la combinaison des deux.

**Exemple : accident survenu à un Airbus A320 en décembre 1998 au FL350 lors d'un vol entre Valence (Espagne) et Paris Orly.**

L'avion subit de fortes turbulences d'origine orographique au FL350 en survolant les Pyrénées et le Pic d'Aneto. Le personnel de cabine servait le petit déjeuner. L'un d'entre eux est gravement blessé. Le commandant de bord a indiqué que, peu avant l'accident, le vent effectif a varié rapidement de 100 kt à 65 kt. Un fort flux de nord était prévu sur les Pyrénées.

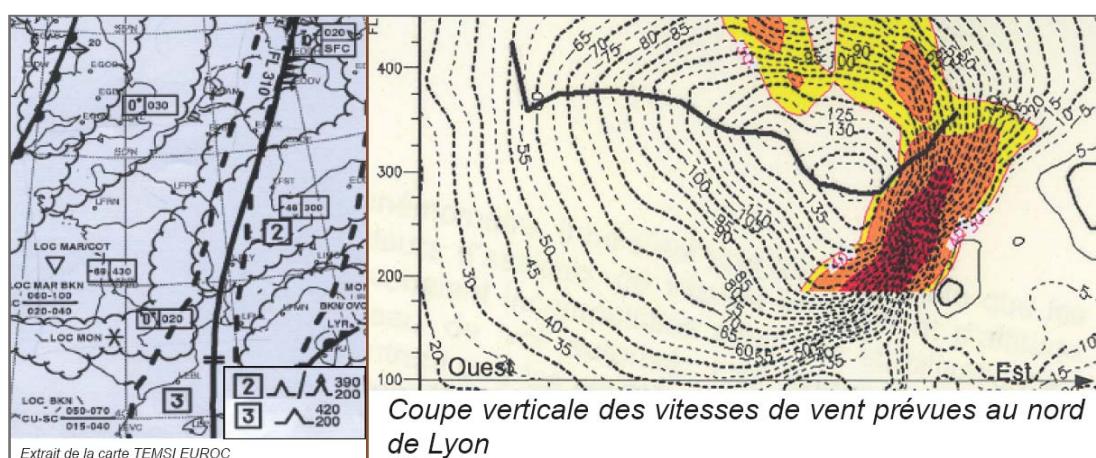
**Exemple : incident grave survenu à un Boeing 737-500 en décembre 2004 en montée vers le FL200 entre Lyon et Paris.**

Pendant la montée, l'avion pénètre de face dans un courant jet. Le commandant de bord remarque une augmentation de la vitesse indiquée, proche de la VMO. Pensant à un manque de réactivité du pilote automatique, il exerce une action à cabrer sur la commande de profondeur, sans effet. Il renforce son action. La vitesse verticale atteint 11 000 pieds/minute. Des turbulences sont ressenties. Entendant l'avertisseur d'altitude annonçant l'arrivée au niveau de vol sélectionné, le pilote exerce une action à piquer. L'avion atteint le FL207 puis redescend au FL200. Trois PNC debout à l'arrière de l'avion sont légèrement blessés pendant cette manœuvre à piquer. Le copilote signale le dépassement de niveau au contrôleur, « cause turbulences ». La carte TEMSI

indiquait un courant jet d'environ 160 noeuds au FL310 associé à des zones de turbulences en ciel clair. Le vent était faible en surface. Les valeurs de vent indiquées aux FL100, FL180 et FL300 mentionnaient une augmentation du vent mais n'ont pas permis à l'équipage de prendre conscience de l'existence d'un gradient de vent important sur une tranche d'altitude réduite.

### Enseignements issus de l'enquête

- Les cartes TEMSI au moment de l'incident ne faisaient apparaître que qualitativement l'étendue verticale d'un jet. Depuis les valeurs extrêmes d'altitude du jet y figurent.
- Les cartes présentant les vents à certains niveaux de vols ne permettent pas d'alerter les équipages sur l'existence d'un phénomène de gradient localisé.
- Dans de telles circonstances, la tenue des paramètres par les automatismes est moins précise qu'à l'habitude et des excursions de vitesse et d'altitude sont possibles.
- Dans cet incident, le diagnostic incorrect des symptômes observés a conduit l'équipage à privilégier le pilotage manuel et à engendrer des accélérations supplémentaires.



**Carte TEMSI et coupe verticale de vitesses de vent**

(Cette dernière n'était pas disponible pour l'équipage à la préparation du vol)

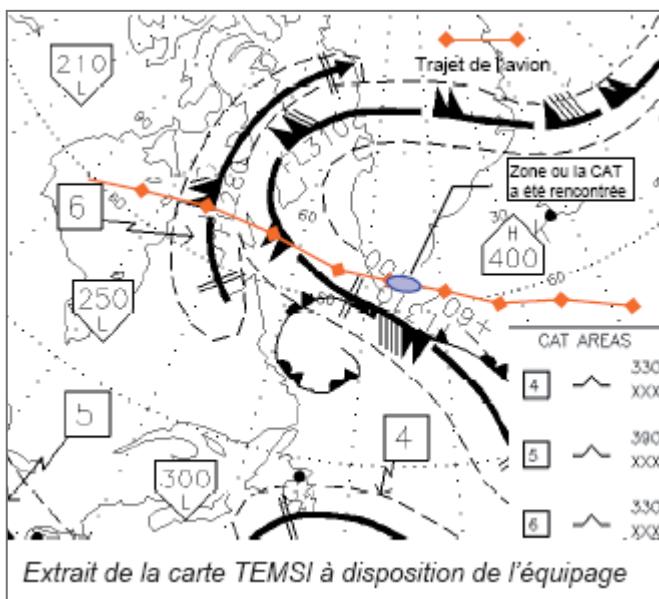
### Exemple : accident survenu à un Airbus A340 en février 2006 survolant le Groenland au FL320.

L'avion évolue dans une zone de turbulence en air clair prévue sur la carte TEMSI. En l'absence de manifestation de phénomène turbulent, l'équipage n'a pas allumé les consignes lumineuses. Il pénètre dans le courant jet et subit de fortes turbulences pendant cinq minutes environ. Un passager est blessé au bras. Ce jour-là, d'importants gradients de température génèrent des gradients de vent, en force et en direction, et une vaste zone de turbulence en ciel clair, renforcée par la présence du relief. Cette turbulence est qualifiée de modérée sur les documents utilisés à la préparation des vols. Quelques minutes avant l'événement, un avion militaire avait signalé aux services du contrôle aérien

la présence de fortes turbulences dans la région sans que cette information soit relayée à l'équipage de l'A340. Lui-même n'a pas signalé l'événement au contrôleur. Après l'atterrissement à destination, l'événement a été mentionné oralement à l'assistance technique mais n'a pas été mentionné par écrit sur l'ATL. Un examen visuel détaillé est entrepris mais la procédure prévue dans l'AMM n'est pas appliquée, faute de pouvoir accéder facilement à l'escale aux enregistrements des valeurs d'accélérations rencontrées.

### Enseignements issus de l'enquête

- Les informations disponibles mentionnaient une vaste zone de CAT. Sans manifestation réelle de turbulence, il peut être délicat pour l'équipage de laisser la consigne allumée pendant une longue période et de contraindre ainsi les passagers à rester assis.
- Le relais des informations sur la rencontre de turbulence contribue au maintien de la vigilance.



## 1.2 Prévisions des phénomènes turbulents par les services météorologiques

Parmi les cas étudiés, il n'a pas été mis en évidence de phénomène turbulent manifestement non prévu par les services météorologiques :

- dans la moitié des cas, la situation météorologique était prévue à l'endroit où se sont produites les turbulences,
- dans un tiers des cas, cette situation météorologique était prévue à proximité de la route de l'avion.

Dans les occurrences restantes, ce point n'a pas pu être déterminé lors de l'enquête.

### 1.3 Les conséquences en cabine et la poursuite du vol

Les conséquences principalement observées sont des blessures causées par :

- des heurts avec la structure de la cabine (plancher, plafond, accoudoirs),
- des chocs par du matériel non arrimé (chariots),
- des brûlures liées à la projection de boissons chaudes.

Sur les dix-neuf occurrences détaillées, les témoignages ont permis d'établir que la consigne lumineuse « attachez votre ceinture » était allumée dans la majorité des cas (douze occurrences) et ne l'était pas dans trois cas<sup>(2)</sup>.

Dans quelques cas où la consigne lumineuse était allumée, le délai entre l'allumage de la consigne et la survenue de la turbulence était réduit, laissant très peu de temps pour ranger la cabine et aux passagers pour boucler leur ceinture de sécurité. Dans un cas, la consigne lumineuse a été allumée environ dix secondes avant l'entrée dans la zone de turbulence. La plupart des passagers blessés (onze occurrences) n'étaient pas attachés. Certains n'ont pas eu le temps de s'asseoir et d'attacher leur ceinture, d'autres n'ont pas respecté la consigne. Dans trois cas, les passagers blessés étaient effectivement attachés, mais la ceinture était mal ajustée et trop lâche pour les maintenir sur leur siège.

<sup>(2)</sup>Dans trois cas, ceci n'a pas pu être déterminé par l'enquête. Dans le dernier cas, cet item est sans objet car l'avion n'est pas équipé de consigne lumineuse.

Les personnels de cabine sont les plus exposés en cas de turbulence : ils représentent plus de 40 % des blessés graves alors qu'ils ne constituent qu'une faible proportion des personnes transportées. Dans dix des dix-neuf cas étudiés, le service des repas était en cours et le personnel de cabine debout.

Dans onze cas<sup>(3)</sup>, il a été déterminé que des médecins présents à bord ont porté assistance à l'équipage pour l'examen des blessés. Leur avis est souvent pris en compte par l'équipage dans sa décision de poursuivre le vol ou de se dérouter afin de soigner les blessés. Dans dix cas, le vol a été poursuivi jusqu'à la destination prévue, dans un cas il a été décidé de se dérouter afin de raccourcir le vol.

<sup>(3)</sup>Dans deux cas, il n'y avait pas de médecin à bord, dans les six autres cas, leur présence éventuelle n'a pas pu être déterminée par l'enquête.

Dans de rares occurrences, les valeurs d'accélérations enregistrées ont dépassé les normes de certification. Dans l'accident survenu le 5 septembre 1996 au B747-400 immatriculé F-GITF, d'importants dommages à l'aménagement de la cabine ont été observés, dus aux accélérations et aux chocs avec les occupants. Il s'agit de la seule occurrence ayant entraîné un décès.

## 2 - RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

### 2.1 Prévisions des turbulences par les services météorologiques

Les services météorologiques sont les principaux organismes d'élaboration de la prévision des turbulences. Ces informations sont ensuite relayées par le réseau météorologique mondial, le contrôle aérien et parfois par les exploitants. Lors de la préparation du vol, les équipages disposent d'un dossier de vol qui contient, entre autre, des messages d'observations et des cartes de prévision météorologique : cartes TEMSI, cartes de vent en altitude, prévision de turbulence en air clair, messages SIGMET.

#### 2.1.1 Cartes TEMSI

Les cartes TEMSI sont des cartes schématiques du temps significatif prévu à heure fixe.

Par exemple, pour la France :

- les cartes du domaine EUROC (Europe Occidentale) sont élaborées par le centre de prévision national de Météo France situé à Toulouse. Elles sont actualisées toutes les trois heures, sont disponibles quatre heures avant leur validité et couvrent un volume qui s'étend du sol jusqu'au FL450,
- les cartes du domaine FRANCE sont préparées en collaboration avec les centres de veille météorologiques régionaux. Elles sont actualisées toutes les trois heures en journée et leur volume s'étend du sol jusqu'à 12 500 ft.

Les données utilisées pour l'élaboration des cartes sont des prévisions issues de modèles numériques, d'observations, et des comptes rendus de pilotes. Les objets graphiques (symboles, contours de zones, fronts, etc.) sont positionnés manuellement par un prévisionniste en fonction de ces données.

Concernant les turbulences en air clair, les zones de turbulence modérée ou forte, la position et le niveau des jets, les zones de CAT ainsi que les ondes orographiques y sont notés.

Les zones de CAT sont délimitées par une ligne épaisse discontinue associée à un chiffre qui renvoie à une légende précisant les caractéristiques de la turbulence en air clair.

Les zones d'orages sont matérialisées par le symbole et la présence de cumulonimbus (noté CB) à l'intérieur d'une zone festonnée. Les symboles suivants : ligne de grains forts et cyclone tropical impliquent des phénomènes orageux.

#### 2.1.2 Messages SIGMET

Les SIGMET sont des messages établis par les Centres de Veille Météorologique pour un volume compris dans les limites d'une FIR donnant des renseignements en langage abrégé sur l'apparition et l'évolution de phénomènes météorologiques dangereux dans une période maximale de quatre heures. Des SIGMET sont émis, entre autre, lorsque des orages ou des turbulences fortes en air clair sont observés.

Ces messages sont établis suivant les critères énoncés par l'OACI et utilisent les données d'observation, les modèles de prévision numériques, des calculs et les comptes-rendus en vol spéciaux (AIREP).

**Concernant les orages**, on ne mentionne pas dans le message SIGMET la turbulence ou le givrage associé au cumulonimbus, qui sont implicites et ne doivent pas faire l'objet d'autres SIGMET dans ce cas.

- Un SIGMET OBSC TS(GR) sera émis lorsque ce dernier est rendu difficilement visible à cause de l'obscurité ou obscurci par de la poussière ou de la fumée.
- Un SIGMET FRQ TS(GR) sera émis lorsqu'il n'y a peu ou pas de séparation entre orages adjacents : un avion traversant cette zone aura donc des difficultés à éviter les cumulonimbus et devra dévier significativement de sa route. Ce type de message est utilisé lorsque plus de 75 % de la zone décrite dans le SIGMET est couverte par des orages.
- L'émission d'un SIGMET EMBD TS(GR) n'est pas liée à la fréquence de l'orage, mais au fait que celui-ci est peu visible à distance pour le pilote. Il sera émis si des impacts persistent au moins quinze minutes, même pour un seul orage si ce dernier est dans une couche de nuage (BKN LYR ou OVC LYR) au-dessus du FL050. Lorsque la divergence des cirrus au niveau des enclumes de cumulonimbus forme une couche de cirrus assez dense, celle-ci sera supposée rendre les orages invisibles et déclencher l'émission d'un SIGMET EMBD TS.
- Un SIGMET SQL TS(GR) sera émis lorsque les orages sont organisés en ligne avec peu ou pas de séparation entre eux : un avion ne peut pas traverser cette ligne et éviter les orages. Ces SIGMET seront émis en cas d'orages actifs quasi continus sur une ligne d'au moins une centaine de kilomètres.

**Concernant les turbulences en air clair**, de façon générale, la force du vent au sol, le gradient de vent et un indice calculé par les modèles de prévisions numériques sont utilisés pour produire un SIGMET de turbulence en air clair.

- Les zones de turbulences liées au jet-stream sont visualisables sur les cartes des modèles numériques en utilisant cet indice ainsi que le gradient de vent à proximité des jets.
- Les turbulences de basse couche se décomposent en trois types de turbulence :
  - par frottement (en dessous du FL080) qui peuvent être générées par un jet de basses couches associé à un front ou par des vents forts de surface selon des seuils prédéfinis,
  - par cisaillement : des valeurs de gradient de vent de 30 kt/100 m dans le plan vertical et de 45 kt/100 km dans le plan horizontal seront susceptibles de générer ce type de turbulence.
  - par orographie : les ondes de relief sont considérées fortes (SEV MTW) si elles s'accompagnent de mouvements descendants de la masse d'air supérieurs à 3 m/s et/ou de turbulences fortes. Les conditions favorisant

ce type de turbulence sont des profils de température stable au-dessus du relief, un flux perpendiculaire à un relief de longueur supérieure à 50 km et une vitesse du flux supérieure à 30 kt.

### 2.1.3 Indice de prévision de turbulence en air clair

Outre les cartes mentionnant des zones de risque de CAT établies par les services météorologiques et pouvant être disponibles à la préparation du vol, certains exploitants fournissent aux équipages un indice de turbulence prévu sur la route. Cet indice découle d'un calcul théorique du gradient de vent existant entre le niveau de vol prévu et plus ou moins 1 000 ft. Il est donné à titre informatif et n'est pas pris en compte par le logiciel dans le choix de la route.

## 2.2 Outils à l'usage des équipages : le radar météorologique embarqué

Les pilotes ne peuvent pas observer visuellement les turbulences. Toutefois, des indices tels que des nuages aux formes caractéristiques sont parfois observables à condition d'évoluer hors des nuages et avec un éclairage suffisant. La présence d'éclairs renseigne l'équipage sur la présence d'orages. En complément de ces indices visuels, les pilotes disposent d'un radar météorologique embarqué.

Le texte réglementaire EU-OPS 1.670 précise les conditions dans lesquelles l'emport d'un radar météorologique est obligatoire<sup>(4)</sup>.

### 2.2.1 Principe

Le radar météorologique détecte principalement les précipitations sous forme liquide ou les particules humides. Le principe consiste à envoyer une impulsion électromagnétique en bande X (fréquence 8 à 12,5 GHz) qui sera réfléchie par des particules de taille du même ordre que la longueur d'onde. Pour le radar en bande X, la taille des éléments réfléchissants est de quelques millimètres, ce qui correspond principalement aux précipitations sous forme liquide mais peut également inclure la grêle et la neige humides. Leur réflectivité est d'autant plus forte que ces particules sont humides et de grande taille. Les zones de turbulences associées à la présence de gouttes de pluie sont également détectables grâce à l'effet Doppler dans un mode de fonctionnement du radar spécifique.

En revanche, la réflectivité de la grêle et de la neige sèches est de faible intensité lorsque leur diamètre est inférieur à 3 mm. Ainsi, les sommets de cumulonimbus, sièges de turbulences fortes et composés exclusivement de particules sèches et de petite dimension, sont difficiles à détecter au radar.

Plus généralement, les turbulences en ciel clair ne peuvent pas être détectées par le radar.

<sup>(4)</sup>OPS 1.670 : « Équipement radar météorologique embarqué

a) L'exploitant n'exploite:

- 1) un avion pressurisé; ou
- 2) un avion non pressurisé, dont la masse maximale certifiée au décollage, est supérieure à 5 700 kg ; ou
- 3) un avion non pressurisé dont la configuration maximale approuvée en sièges passagers est supérieure à 9 ;

que s'il est équipé d'un radar météorologique embarqué et lorsque cet avion est exploité de nuit ou dans des conditions météorologiques de vol aux instruments dans des régions où des orages ou autres conditions météorologiques potentiellement dangereuses et considérés comme détectables par un radar météorologique embarqué sont susceptibles d'être rencontrés en route.

b) Pour les avions pressurisés à hélices dont la masse maximale certifiée au décollage est inférieure ou égale à 5 700 kg et dont la configuration maximale approuvée en sièges passagers est inférieure ou égale à 9, l'équipement radar météorologique embarqué peut, sous réserve de l'approbation de l'autorité, être remplacé par un autre équipement pouvant détecter les orages et d'autres conditions météorologiques potentiellement dangereuses considérés comme détectables par un équipement radar météorologique. »

## 2.2.2 Description et utilisation



Radar météorologique Honeywell « Primus 708A »

Le niveau de réflectivité est représenté par différentes couleurs sur un écran, ce qui permet d'en déduire une intensité de précipitation probable.

Afin d'optimiser la détection des zones de précipitation humide, les équipages agissent sur :

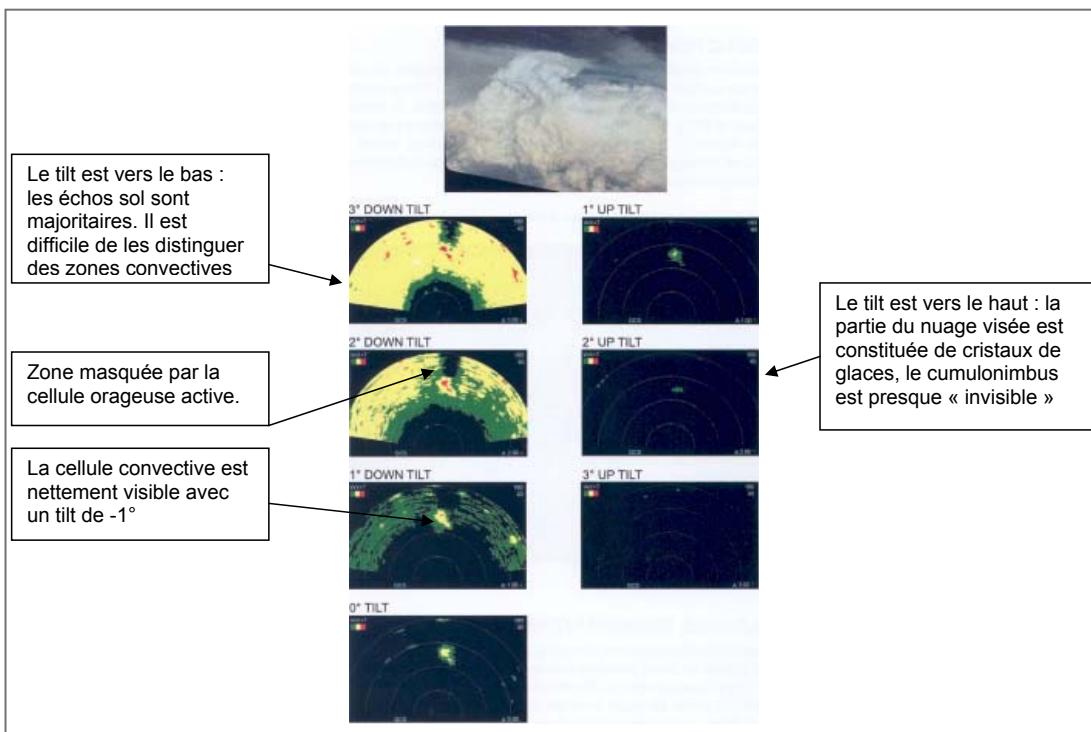
- l'**échelle** de l'image radar présentée (échelle de 40, 80, 160 NM par exemple),
- le **tilt** du faisceau radar, qui représente l'angle entre l'horizon et le centre du faisceau<sup>(5)</sup>,
- le **gain** qui représente la sensibilité du signal reçu. Une position, généralement appelée AUTO, recherche automatiquement un bon compromis pour la détection efficace des cellules,
- le **mode** qui permet d'afficher soit l'image radar seule (WX), soit de superposer les zones de turbulence (WX+T).

<sup>(5)</sup>Sur certains radars récents, un changement d'échelle engendre un ajustement automatique du tilt. L'équipage conserve la possibilité de le régler manuellement.

Remarque : ces paramètres ne sont pas enregistrés dans les FDR (à l'exception de l'échelle et du mode sur certains avions), ce qui constitue un frein à l'enquête technique. Celle-ci s'appuie alors principalement sur le témoignage des équipages.

## 2.2.3 Les limites d'utilisation

La faible réflectivité des précipitations présentes à haute altitude engendre des échos correspondant à de faibles intensités lorsque le tilt du faisceau est proche de l'horizontale. Une recherche active requérant un changement fréquent du réglage du tilt est donc nécessaire pour détecter les cellules orageuses en visant des parties plus humides du nuage, donc situées à des altitudes plus basses. Elle l'est d'autant plus que certaines situations orageuses peuvent évoluer rapidement (exemple de l'accident survenu à l'Airbus A320 entre Paris et Genève).



**Différents réglages du tilt d'un radar météorologique**

(Source MAC, Air France)

La figure ci-dessus montre la représentation d'une cellule orageuse pour différents réglages du tilt du faisceau radar. Les tilts orientés vers le bas donnent un grand nombre d'échos sol. Ceux visant la partie haute du nuage donnent un retour beaucoup plus faible.

D'autres limites, moins fréquentes ont été également mises en évidence :

- la réflectivité n'est pas forcément proportionnelle au danger : un cumulonimbus en région sèche produira moins d'échos qu'un cumulonimbus en région humide,
- effet de masque : une zone de fortes précipitations peut masquer sur le radar une zone de précipitation située à l'arrière de cette zone. Cet effet est quelque peu corrigé dans les radars de nouvelle génération,
- l'utilisation d'une petite échelle (40 NM par exemple) peut faire apparaître une route bloquée par une cellule de grande étendue. L'usage de deux échelles différentes sur les deux ND peut améliorer la vision d'ensemble de la situation,
- la performance des radars se dégrade au-delà de 80 NM.

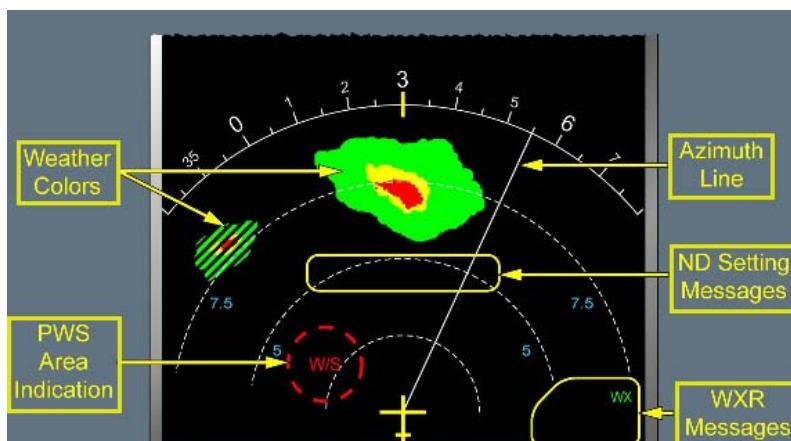
Les exploitants recommandent généralement de surveiller les informations du radar météorologique et de les afficher sur le ND, sauf de jour par bonne visibilité et sans nuage apparent.

## 2.2.4 Formation

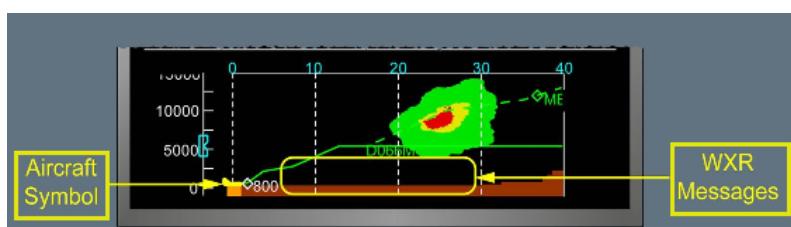
La réglementation actuelle prévoit une formation théorique des équipages sur l'utilisation du radar météorologique de bord. Les procédures des exploitants, ainsi que la documentation informative lorsqu'elle existe, décrivent le principe de fonctionnement du radar météorologique et en précisent son utilisation. Dans la pratique, la familiarisation avec la manipulation du radar s'effectue lors des vols d'adaptation en ligne et des vols en exploitation.

## 2.2.5 Nouvelle génération de radar

Un nouveau type de radar, installé sur certains avions récents, présente une information en trois dimensions. En mode normal de fonctionnement, le radar balaye latéralement et verticalement un volume situé devant l'avion. Sur A380 par exemple, l'intensité des précipitations est présentée à la fois sur le ND et sur le VD (Vertical Display), qui présentent des informations dans un plan vertical. Ce mode de radar est également pourvu d'une fonction « predictive windshear ».



Visualisation des précipitations sur le ND (plan horizontal)



Visualisation des précipitations sur le VD (plan vertical)

(Source FCOM Airbus A380)

D'autres projets prévoient, par des avancées algorithmiques, la possibilité de détecter les sommets des cumulonimbus et de visualiser les précipitations au-delà d'une ligne de grain à forte réflectivité (et donc de s'affranchir de l'effet de masque).

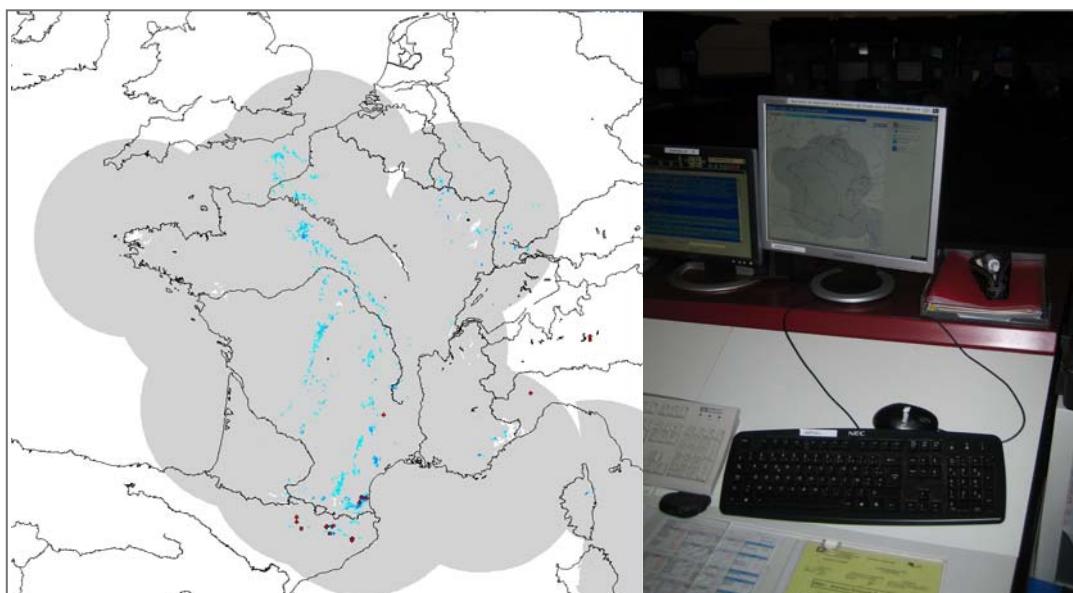
## 2.3 Outils à l'usage des services de la navigation aérienne

Les messages SIGMET sont disponibles sur le périphérique CIGALE (Chaine d'Information GénérALE) des positions de contrôle en route. Leur arrivée est signalée par une alarme visuelle. Les chefs de salle en sont également destinataires. Des accords<sup>(6)</sup> avec les Centres de Veille Météorologique prévoient que ces derniers informent par téléphone et de façon systématique les chefs de salle afin d'attirer leur attention sur l'émission d'un tel message. Cette coordination permet au chef de salle de prévenir les contrôleurs concernés de l'évolution de la situation. Elle lui permet également d'ajuster la capacité des secteurs afin d'éviter des situations de surcharge de travail pour les contrôleurs, liées aux évitements des orages par les avions.

Les positions du chef de salle et du chef de tour sont équipées d'un système de visualisation, nommé ASPOC (Application de Signalisation et de Prévision des Orages pour la Circulation aérienne). Cet outil, développé par Météo France, est installé dans les cinq CRNA Français ainsi que dans les huit plus grandes approches. Une généralisation de cette installation à d'autres approches françaises est envisagée.

Ce système utilise les données des radars météorologiques de précipitation du réseau de Météo France (par pas de cinq minutes) ainsi que les données de foudre du réseau Météorage. Les images obtenues sont dépouillées des précipitations d'origine stable pour ne conserver que celles d'origine convective sur lesquelles les données de foudre peuvent être superposées. Une prévision à trente minutes d'échéance du déplacement des cellules est disponible. Cet outil ne présente pas d'image en trois dimensions des cellules convectives.

<sup>(6)</sup>Ces accords font partie d'un protocole entre Météo France, Air France et la DSNA qui prévoit également de prévenir les organismes militaires que des avions civils peuvent être amenés à pénétrer dans leurs zones en raison d'évitement de cellules orageuses. Les organismes militaires adaptent alors leur activité aérienne en l'interrompant, la déplaçant ou en réduisant le volume qu'elle occupe.



Visualisation ASPOC ; emplacement de l'outil sur la position du Chef de Salle d'un CRNA

Selon les témoignages recueillis dans les différents CRNA, le chef de salle informe les contrôleurs de la position des échos soit verbalement, soit en leur imprimant une copie de la visualisation ASPOC.

Dans quatre des cinq CRNA, des images radar de précipitations sont accessibles sur les positions de contrôle au moyen de CIGALE. Ces images sont fournies par un dispositif différent d'ASPOC. Les positions de contrôle en France ne sont pas dotées de système de visualisation des orages intégré à la visualisation de la circulation aérienne, contrairement à d'autres pays voisins. Le besoin de superposer les échos de précipitation et les impacts de foudre à l'image radar de la circulation aérienne a été exprimé il y a plusieurs années.

## 2.4 Informations obtenues en vol

L'évolution de la situation météorologique peut être différente de celle prévue à la préparation du vol. L'obtention en vol d'informations récentes est donc nécessaire. Les organismes de la circulation aérienne, l'exploitant et les autres équipages en vol sont les principales sources de ces informations.

### 2.4.1 Communications avec les organismes de contrôle et les équipages en vol

La réglementation prévoit que les contrôleurs transmettent aux équipages les informations météorologiques, de type SIGMET notamment. Cette fourniture, qui s'effectue au titre de l'information de vol, n'est cependant pas prioritaire lorsque ce même organisme est chargé de rendre le service du contrôle. Dans la pratique, les contrôleurs transmettent rarement les SIGMET aux équipages en croisière pour des raisons de charge de travail et d'encombrement des fréquences. Les organismes spécialisés dans la fourniture de l'information de vol sont en mesure de fournir cette information sur demande de l'équipage mais sont peu sollicités en France.

Les émissions météorologiques VOLMET diffusent régulièrement en VHF des METAR et certains SIGMET. Les informations provenant des exploitants interrogés indiquent que les VOLMET sont rarement utilisés, notamment pour les vols courts et moyens courriers. Le temps d'écoute nécessaire explique cette faible utilisation.

Les documents PANS-ATM de l'OACI (Doc 4444) et le SCA (paragraphe 4.2.3) précisent qu'un compte-rendu spécial (AIREP) doit être effectué par les équipages chaque fois qu'est rencontré un phénomène de forte turbulence, d'onde orographique forte ou d'orage. Ces comptes-rendus sont ensuite relayés aux autres équipages, aux autres organismes ATS concernés, ainsi qu'au service météorologique associé.

Dans la pratique, les pilotes s'affranchissent du formalisme du message AIREP, par souci de concision, en n'indiquant que les informations essentielles par radio, fréquemment complétées par une demande de changement de trajectoire.

Les témoignages recueillis montrent que le recours à ces transmissions n'est pas systématique. Il est plus fréquent aux Etats-Unis qu'en Europe, par exemple. Lorsqu'ils sont reçus par les contrôleurs, ces messages sont rarement relayés au service météorologique associé.

#### **2.4.2 Communications avec l'exploitant**

Certains exploitants, opérant sur des lignes long courrier notamment, se sont dotés d'une cellule au sein de leur service des opérations, dont le rôle est de transmettre aux équipages en vol des informations en temps réel sur les phénomènes potentiellement dangereux (zones convectives, zone de turbulence en ciel clair), leur évolution, une actualisation des SIGMET, etc. Lorsque l'équipement des avions le permet, ces communications s'effectuent par le système de liaison de données ACARS. L'exploitant peut alors avertir spontanément un équipage de l'existence d'un phénomène météorologique dangereux prévu sur sa route. En plus du message radio destiné au contrôle aérien, l'équipage, a lui aussi la possibilité d'informer l'exploitant de l'existence de turbulences, cette information pouvant être utile aux équipages de la même compagnie suivant une route proche. Il peut également accéder à une base de données de messages météorologiques, dont les SIGMET.

Les exploitants opérant sur des lignes court et moyen courriers n'ont souvent pas de cellule dédiée à la fourniture d'information météorologique en vol ou n'ont pas d'avion équipé d'ACARS. Dans ce cas, la mise à jour des informations météorologiques s'obtient alors principalement auprès des services de la navigation aérienne.

#### **2.4.3 Communication par liaison de données**

L'usage d'un système ACARS est propre à chaque exploitant. Rappelons, de plus, que les images de précipitations disponibles à bord et au sol, sont indépendantes et couvrent des zones géographiques différentes. Ainsi les différents acteurs ne disposent pas forcément du même niveau d'information.

Eurocontrol, en liaison avec l'Eurocae (European Organisation for Civil Aviation Equipment), travaille sur le développement et la généralisation de ces systèmes d'information et sur l'harmonisation des données transmises. Le groupe de travail européen Flysafe, incluant des autorités, des industriels, des organismes météorologiques et des laboratoires de recherche, travaille sur l'amélioration de la fourniture en temps réel aux équipages d'information météorologique provenant de capteurs embarqués et de stations sol.

Il n'y a pas d'exigence réglementaire à l'heure actuelle sur l'installation de système de communication par liaison de données à bord des avions de transport.

#### **2.4.4 Report automatique de turbulence**

Un système de report automatique de turbulence (TAPS, Turbulence Auto-PIREP System) est en évaluation depuis plusieurs années aux Etats-Unis. Le principe consiste à envoyer automatiquement par liaison de données à d'autres avions en vol ou à une station sol une information de turbulence lorsque l'accélération verticale subie par l'avion dépasse un seuil prédéfini. Cette information peut donc varier en fonction des caractéristiques de l'avion. L'information transmise est représentée sur les écrans de navigation des autres avions en vol par un symbole précisant l'intensité de la turbulence. L'installation de ce dispositif n'est pas généralisée.

Un système de report automatique de turbulence, en cours d'étude par Airbus, consiste à envoyer à d'autres avions en vol ou à des opérateurs au sol une information sur les caractéristiques des turbulences rencontrées : localisation, altitude, vitesse des courants verticaux ou horizontaux. L'information donnée ici est indépendante des caractéristiques de l'avion qui subit la turbulence. Ce système n'est également pas utilisé à l'heure actuelle.

Dans le cadre du programme AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), des avions de lignes effectuent des mesures de vent, de température et de turbulence. Ces mesures sont transmises en temps réel au sol et sont utilisées par les centres météorologiques. Ce système comporte en particulier trois limites :

- toute la flotte n'est pas équipée,
- les informations recueillies dépendent du type d'avion,
- certains avions ne transmettent ces informations qu'en phase de montée et de descente.

## 2.5 Procédures

Les procédures opérationnelles de plusieurs exploitants ont été recueillies pour cette étude. Certaines établissent une différence entre les turbulences légères ou modérées et les turbulences fortes. D'autres ne prévoient des procédures que pour des turbulences fortes. Il est à noter que le critère à retenir pour qualifier une turbulence de faible, modérée ou forte n'est pas toujours explicité.

Pour les équipages techniques, les principales actions sont d'allumer les consignes lumineuses, de prévenir les équipages commerciaux, de s'assurer que ces derniers prennent les mesures adéquates.

L'usage des automatismes est en général recommandé, parfois avec un mode adapté, tant que leurs performances sont acceptables. La vitesse ou le mach recommandés par le constructeur dépendent de la masse de l'avion et/ou du niveau de vol<sup>(7)</sup>. Lorsque des variations de poussée importantes surviennent, il est souvent préconisé de désactiver l'auto-manette et d'utiliser des pré-affichages des paramètres moteurs.

Remarque : dans les deux-tiers des occurrences étudiées, la vitesse était supérieure à la vitesse préconisée lors de l'entrée dans les turbulences, entraînant de plus fortes variations du facteur de charge et des risques accrus de dépassements de VMO ou de MMO. Dans la plupart des cas, les équipages ont été surpris par les turbulences.

En cas de recours au pilotage manuel, il est demandé d'éviter des actions brusques visant à conserver rigoureusement l'altitude ou la vitesse, celles-ci pouvant générer des accélérations supplémentaires.

Certains constructeurs requièrent l'utilisation des allumeurs et, en fonction des circonstances, de l'antigivrage des moteurs.

En fin de vol, l'équipage technique doit mentionner toute rencontre avec de la turbulence forte sur le compte-rendu matériel afin de déclencher des actions de vérification par la maintenance<sup>(8)</sup>.

<sup>(7)</sup>Lorsque l'avion est au-dessus du niveau de vol optimal, l'équipage peut-être amené à choisir un niveau de vol inférieur afin d'augmenter la marge par rapport au décrochage.

<sup>(8)</sup>Sans un accès facile aux valeurs d'accélérations enregistrées, cette estimation est subjective (voir événement de février 2006 survenu à un A340 survolant le Groenland).

La coordination entre l'équipage de conduite et l'équipage de cabine participe activement à la sécurité des passagers. Elle est assurée par :

- le briefing avant vol, en mentionnant les prévisions de turbulences,
- l'utilisation en vol des consignes lumineuses et d'un dialogue adapté à la situation rencontrée.

Les actions à mener par l'équipage de cabine consistent :

- à annoncer ou rappeler la nécessité de s'asseoir et de s'attacher, en complément de l'allumage de la consigne lumineuse,
- à vérifier que les passagers sont effectivement correctement attachés,
- si la situation l'exige, à interrompre le service, ranger rapidement le matériel, rejoindre ses sièges et s'y attacher.

En cas de turbulences fortes non prévues, l'équipage de cabine freine les chariots, pose sur le sol le matériel pouvant être projeté (verseuses, bouteilles, etc.) et s'attache immédiatement sur le siège disponible le plus proche.

L'incident suivant illustre l'importance d'une coordination formalisée entre l'équipage de conduite et l'équipage de cabine :

***Exemple : incident survenu à un Airbus A320 en octobre 1997 survolant le Péloponnèse lors d'un vol entre Paris et Athènes.***

Pendant la descente, l'équipage de conduite observe, visuellement et à l'aide du radar météorologique, une barrière de cumulonimbus devant lui. L'étendue de cette zone orageuse ne lui permet pas de la contourner ou de passer au-dessus. A l'aide de l'image radar, l'équipage oriente la trajectoire entre deux cellules séparées d'environ vingt milles marins. Une quinzaine de minutes avant de franchir ce point, l'équipage de conduite invite le chef de cabine à venir dans le poste de pilotage pour l'informer de la situation et lui demander de préparer la cabine. Plus tard, le chef de cabine vient rendre compte des actions prises. Peu avant de rentrer dans les nuages, le commandant de bord annonce aux passagers que l'avion va rentrer dans la zone de turbulences. Il ne prononce pas la phrase clé enjoignant aux personnels de cabine de s'asseoir et de s'attacher. L'équipage est surpris par la violence des turbulences. Trois navigants de cabine, debout à l'arrière de l'avion sont blessés. Aucun passager n'est blessé. Tous étaient attachés.

### **3 - ANALYSE : LES PRINCIPALES CAUSES MISES EN ÉVIDENCE PAR LES ENQUÊTES**

La préparation du vol s'appuie sur les éléments de prévisions météorologiques notamment, et permet d'appréhender la localisation des zones de turbulences, d'adapter la route prévue et de choisir les niveaux de vol appropriés. En vol, l'équipage recueille des renseignements complémentaires afin d'optimiser les évitements de cellules orageuses, d'en déterminer les marges de franchissement ou de se dérouter. Lorsque la rencontre avec la turbulence s'avère inéluctable, l'équipage technique et le personnel de cabine agissent de façon à en minimiser les conséquences.

#### **3.1 Préparation du vol**

Les cas étudiés montrent que les équipages ont accès aux prévisions de turbulence au cours de la préparation du vol. L'étendue géographique des zones turbulentes est en général correctement prévue.

Lorsque la route passe à proximité d'une zone de turbulence prévue, sur une carte TEMSI par exemple, les équipages peuvent être tentés de ne pas considérer le risque de turbulence et de réduire ainsi leur vigilance. En raison de l'imprécision inhérente aux prévisions et du caractère évolutif des phénomènes météorologiques, la délimitation de ces zones, valable à une heure donnée, n'est pas à prendre comme « position absolue ».

Les zones de turbulence prévues sont souvent de grande étendue. A l'exception des phénomènes tels que cyclones ou tempêtes tropicales, leur contournement, trop contraignant, n'est pas prévu. Il s'avère également peu réaliste d'adopter sur une grande distance une vitesse préconisée, inférieure à la vitesse de croisière (retards, consommation de carburant). Le choix du niveau de vol peut toutefois permettre d'éviter la zone de plus forte turbulence prévue.

Ainsi, la préparation des vols se conclut rarement par un contournement de la zone à risque mais renforce la vigilance de l'équipage en vol. Un briefing entre les PNC et PNT avant le vol peut permettre d'adapter le déroulement du service du repas pour les passagers ou les PNT pendant le vol.

#### **3.2 En vol**

Les délais d'action sont plus courts et les informations disponibles et reçues en vol doivent être suffisamment précises pour permettre aux équipages d'avoir une représentation mentale correcte de la situation.

##### **3.2.1 Actualisation des informations**

L'actualisation en vol des informations existantes est un point clé dans la prévention des dommages et blessures dus aux turbulences. Les principales sources d'information sont le radar météorologique de bord, la surveillance visuelle extérieure et l'acquisition de données météorologiques récentes.

Les enquêtes sur les occurrences ayant donné lieu à la pénétration dans un cumulonimbus montrent que les équipages étaient informés du risque d'orage sur, où à proximité, de leur route au moment de la préparation du vol. Malgré

la présence à bord d'un radar météo, ces événements n'ont pas été évités. Quelques enquêtes ont établi que malgré la détection des foyers orageux, les équipages ont été surpris par l'intensité des turbulences alors qu'ils évitaient ces foyers. Ainsi, l'interprétation des signaux reçus par le radar météorologique est parfois délicate pour prévenir efficacement le risque de turbulence. Dans les zones denses et étendues d'orages les marges d'évitement préconisées par les exploitants ne peuvent, dans la pratique, pas toujours être respectées. La surveillance visuelle extérieure, qui peut être impossible de nuit ou dans une couche de nuages, est complémentaire des informations fournies par le radar.

Les enquêtes ont montré que, dans de nombreux cas, des messages SIGMET ont été émis après le décollage sans que l'équipage n'en ait eu connaissance. Une communication accrue entre exploitants et équipages en vol peut permettre d'alerter ces derniers et de renforcer leur vigilance. Une structure de suivi des vols en temps réel et la possibilité de communiquer par ACARS, s'avèrent souvent efficace, notamment pour les vols longs courriers. Pour les vols courts courriers, la charge de travail de l'équipage lui laisse rarement le temps d'obtenir ces informations complémentaires, quel que soit le moyen utilisé. Cependant, la prévision à court terme disponible, dans ce cas, avant le départ est généralement de bonne qualité.

Les équipages contribuent eux-mêmes au retour d'information en signalant la turbulence par un message radio. Une enquête mentionne l'émission d'un tel message non relayé par le contrôleur à un équipage qui est entré par la suite dans la zone turbulente (accident survenu à un Airbus A340 au-dessus du Groenland). Une des faiblesses de ces comptes-rendus est qu'ils ne sont pas systématiques et qu'ils dépendent d'une évaluation subjective de l'intensité du phénomène par l'équipage. Les accélérations subies sont en effet fonction du type, de la masse, de la vitesse et de l'altitude de l'avion. Les projets de report automatique de turbulence offrent ainsi une perspective intéressante pour recenser de manière objective et plus complète les occurrences de turbulence. Il convient de rappeler que ces informations sont utiles non seulement aux équipages évoluant dans la zone, mais aussi aux contrôleurs aériens qui, prévenus, peuvent anticiper les changements de trajectoire demandés par les pilotes et prendre les mesures nécessaires à la maîtrise des flux.

Toutefois, lorsque la situation météorologique évolue rapidement, l'absence de visualisation des cellules orageuses sur les écrans radar ne permet pas aux contrôleurs de partager une représentation précise et commune avec les équipages. Les stratégies envisagées par les uns et les autres peuvent s'avérer incompatibles et conduire à des situations où il n'est plus possible d'éviter la pénétration dans une cellule orageuse sans maintenir les séparations réglementaires avec les autres avions (exemple de l'accident du Beech 100 « King Air » du 28 juillet 2005 lors d'un vol entre Genève et Deauville).

Le format des messages SIGMET, faisant souvent référence à des coordonnées géographiques difficilement exploitables directement par un contrôleur ou un pilote, rend ce type de message difficile à transmettre sur une fréquence de contrôle où le service du contrôle est prioritaire. L'accès à ces messages est en revanche possible auprès des centres d'information de vol. Cette possibilité semble peu utilisée par les équipages.

L'usage de communications verbales pour ce type de transmissions, longues et sujettes à erreurs et répétitions, serait avantageusement remplacé par des communications numériques facilitant l'accès aux informations météorologiques. Le système ACARS couvre en partie ce besoin, mais son exploitation reste interne à chaque exploitant. Ce concept, étendu à l'ensemble des avions et aux organismes de contrôle, ouvrirait également la possibilité de centraliser les informations météorologiques provenant du bord comme les valeurs de vent, de température, d'accélérations par exemple, et du sol comme les images de précipitation des radars sol. Les informations ainsi regroupées pourraient être utilisées par les contrôleurs et les pilotes qui partageraient une représentation commune de la situation. L'usage d'informations provenant du sol pourrait également compléter utilement les informations du radar météorologique de bord en fournissant une représentation plus globale de la situation.

### 3.2.2 Vigilance

Plusieurs enquêtes montrent que les équipages ont été surpris par les turbulences alors que des indices de leur existence étaient connus ou décelables. Ils n'ont ainsi pas pu prendre les mesures permettant d'en réduire les conséquences, comme l'adoption de la vitesse préconisée et l'allumage de la consigne lumineuse.

Dans ces cas, les équipages avaient les moyens d'anticiper leur présence, notamment par une recherche active à l'aide du radar météorologique<sup>(9)</sup>. Leur attention n'était pas portée sur la recherche de ces phénomènes. Lors de rotations multiples entre deux destinations, la vigilance peut également être altérée par des conditions météorologiques favorables régnant lors des rotations précédentes. L'équipage n'anticipera pas toujours une dégradation de ces conditions.

Des enquêtes (exemples de l'incident du B737-500 entre Lyon et Paris le 29 décembre 2004 et de l'Airbus A320 entre Valence (Espagne) et Paris le 21 décembre 1998) ont montré que la surveillance du vent et de la température aurait pu alerter l'équipage de turbulences en ciel clair imminentes.

<sup>(9)</sup>En l'absence d'enregistrement des réglages du radar, il n'est pas possible de savoir précisément de quelle manière la recherche active a été conduite par l'équipage. Dans quelques occurrences, les équipages ont indiqué qu'ils n'avaient pas procédé à une telle recherche.

### 3.3 Conséquences en cabine

Dans plusieurs événements étudiés, des passagers étaient debout malgré la consigne lumineuse allumée. Ces passagers sont les plus exposés aux blessures. De même, une ceinture mal ajustée ne constitue pas une protection efficace.

Dans les cas où la zone de turbulence prévue est de grande dimension, il est difficile d'exiger de la part des passagers de rester assis et attachés pendant une longue période ; les équipages techniques peuvent donc être incités à éteindre les consignes lumineuses après un certain temps. Ils appliquent alors les procédures dès l'apparition des premières turbulences, ce qui peut s'avérer tardif dans certains cas.

## 4 - CONCLUSIONS

Dans cette étude, les occurrences qui ont occasionné des blessures graves ou mortelles sont majoritairement liées à la pénétration dans des sommets de cumulonimbus non détectés par l'équipage. Les turbulences en air clair sont quant à elles moins fréquemment associées à des blessures graves.

En cabine, malgré l'allumage fréquent de la consigne lumineuse « attachez votre ceinture », les blessés sont des passagers non attachés ou attachés de manière trop lâche, ainsi que des personnels de cabine effectuant le service des repas.

Les phénomènes rencontrés étaient en général prévus par les services météorologiques sur, ou à proximité de la route suivie, au moment de la préparation du vol. En vol, des équipages n'ont souvent pas décelé les indices de turbulence qui existaient et qui pouvaient l'être par une recherche vigilante et active.

Le principal levier pour l'amélioration de la sécurité est donc une meilleure actualisation et une meilleure présentation des informations aux équipages pendant le vol. Il convient de retenir que tous les exploitants ne bénéficient pas d'une cellule de suivi des vols à même de relayer des informations météorologiques en temps réel et certains avions ne sont pas dotés de système de communication par liaison de données. Les équipages sont alors tributaires des informations obtenues auprès des services de la navigation aérienne et des autres équipages. Les comptes rendus en vol effectués par les équipages contribuent à l'information des autres pilotes et des contrôleurs. Cependant, une faible culture de report, particulièrement en Europe, diminue parfois leur efficacité.

Enfin, les contrôleurs d'approche et les contrôleurs en route ne disposent pas systématiquement d'une visualisation des zones orageuses superposée à l'image de la circulation aérienne, ce qui peut dégrader la synergie pilote/contrôleur. De façon plus générale, la mise en commun des informations en possession des différents acteurs offrirait un niveau de connaissance homogène de la situation favorable à l'anticipation des stratégies par les équipages et les contrôleurs.

## 5 - RECOMMANDATIONS

### 5.1 Mise en commun des informations météorologiques entre pilotes et contrôleurs

L'absence d'actualisation des informations météorologiques en vol, alors qu'elles sont disponibles au sol, est un facteur récurrent dans la survenue des accidents ou incidents de turbulence. L'étude a montré que les acteurs concernés par la présence de turbulences ne disposaient pas tous du même niveau d'information car :

- la transmission d'informations météorologiques par liaison de données est un service interne aux exploitants qui en disposent,
- lorsqu'elle est transmise, cette information n'est pas toujours présentée d'une manière facilement interprétable par les équipages,
- en l'absence de tels moyens, l'accès aux messages météorologiques se fait de manière verbale, consommatrice de temps et d'attention, et donc peu employée,
- les informations des radars météorologiques au sol ne sont pas disponibles pour les équipages en vol et ne sont pas directement accessibles aux contrôleurs sur leurs écrans radar.

Les technologies actuelles de transmission et de partage d'informations numériques permettraient la centralisation et la redistribution de ces informations vers les écrans radars et les postes de pilotage. De telles études sont actuellement en cours. Sous réserve d'une ergonomie adaptée, ceci fournirait :

- aux pilotes, une source d'information complémentaire au radar embarqué,
- aux contrôleurs, des informations plus précises sur la position et l'étendue des phénomènes turbulents. Ces outils devraient permettre de situer en trois dimensions les précipitations susceptibles d'être associées à des turbulences, les informations sur l'activité électrique de ces phénomènes, ainsi que les informations disponibles sur la turbulence en ciel clair.

En conséquence, le BEA recommande que :

- l'AESA et Eurocontrol veillent à la mise en œuvre de systèmes de communication d'informations météorologiques par liaison de données permettant leur centralisation et leur redistribution vers les postes de pilotage et les positions de contrôle ;**
- dans le cadre de l'application de la recommandation ci-dessus, que la DGAC introduise des outils, et définisse des méthodes de travail associées, permettant aux contrôleurs en route et d'approche de visualiser sur les écrans de contrôle les zones orageuses et les zones de turbulence.**

## **5.2 Enregistrement des paramètres de réglage du radar météorologique embarqué et des images présentées**

En l'absence d'enregistrement des réglages du radar météorologique et des images radar présentées, il n'est pas possible de préciser la manière dont cet équipement a été utilisé par l'équipage ni de connaître les informations dont il disposait. Son témoignage apporte des indications qui seraient utilement complétées par l'enregistrement de ces paramètres et de ces images afin d'améliorer la qualité du retour d'expérience.

Plusieurs organismes d'enquêtes ont émis des recommandations visant à installer des enregistreurs d'image dans les postes de pilotage. Les spécifications de l'Eurocae relatives aux enregistreurs de vol (document ED-112) prévoient en particulier la possibilité d'enregistrer des informations présentées à l'équipage sur les écrans du tableau de bord. Un tel équipement est ainsi susceptible de couvrir le besoin exprimé ci-dessus, en fonction des obligations d'emport qui ne sont pas encore définies. Les premières réalisations permettront de vérifier si la qualité des images est suffisante et de préciser éventuellement les améliorations à apporter sur les procédés d'enregistrements d'image.

# ***Liste des annexes***

## **annexe 1**

Dossiers exploités

## **annexe 2**

Références

## Dossiers exploités

Remarque : lorsque qu'un événement survient à l'étranger à un avion de conception, de construction ou d'exploitation française, le BEA participe à l'enquête. Ceci explique la forte proportion d'avions construits en France dans la liste ci-dessous.

Date	Avion	Lieu	Description succincte de l'occurrence	Conséquences
Janvier 1996	Airbus A300	Bahamas	Alors que l'équipage cherche à rejoindre un niveau de vol moins turbulent, l'avion entre dans des sommets de cumulonimbus.	3 passagers gravement blessés
Mai 1996	Airbus A310	France	L'avion pénètre dans un cumulonimbus, non détecté au radar.	2 passagers gravement blessés
Septembre 1996	Boeing 747-400	Afrique centrale	L'avion, dont le radar météorologique est en panne, pénètre dans un cumulonimbus à la traversée de la ZCIT.	1 passager mortellement blessé, 8 passagers et 1 PNC gravement blessés
Août 1997	McDonnell-Douglas DC10-30	Océan Pacifique	L'avion entre dans un cumulonimbus que l'équipage n'avait pas identifié.	1 PNC gravement blessé
Octobre 1997	Airbus A320	Grèce	En traversant une vaste zone d'orages, l'avion rencontre de fortes turbulences entre deux cellules identifiées au radar. (voir page 23)	
Décembre 1997	Airbus A310	Liban	L'avion subit des turbulences en ciel clair.	1 passager gravement blessé
Mai 1998	McDonnell-Douglas DC10-30	Polynésie Française	Pendant une manœuvre d'évitement d'un cumulonimbus, l'avion pénètre dans une masse nuageuse en développement vertical rapide.	4 PNC gravement blessés
Décembre 1998	Airbus A320	Espagne	Au dessus des Pyrénées, l'avion subit de fortes turbulences. (Voir page 9)	1 PNC gravement blessé
Octobre 1999	McDonnell-Douglas DC10-30	France	A l'aide du radar météo, l'équipage dirige l'avion entre deux cellules orageuses. L'avion subit de fortes turbulences.	
Avril 2001	Airbus A320	Etats-Unis	Alors que l'équipage tente d'identifier le niveau de vol le moins turbulent, l'avion subit des turbulences en ciel clair associées à des ondes orographiques.	1 PNC gravement blessé
Mai 2001	Airbus A340	Portugal	L'avion pénètre dans le sommet d'un cumulonimbus noyé dans une couche de cirrus.	
Octobre 2001	Boeing 747	Océan Atlantique nord	Après avoir évité à vue et à l'aide du radar plusieurs cellules orageuses, l'avion pénètre dans le sommet d'un cumulonimbus.	3 PNC et 1 passager gravement blessés
Juillet 2003	Airbus A330	Hong-Kong	L'avion évolue dans les nuages à proximité d'un cumulonimbus et subit de la turbulence.	
Août 2003	Airbus A340	Etats-Unis	L'avion pénètre dans un cumulonimbus.	2 passagers gravement blessés
Mars 2004	Airbus A340	France	L'avion subit des turbulences en ciel clair au dessus d'une zone orageuse. (Voir page 8)	2 PNC gravement blessés
Juillet 2004	Airbus A320	France	L'avion pénètre dans un cumulonimbus non détecté au radar. L'équipage ne s'attendait pas à la présence de cumulonimbus. (Voir page 6)	1 passager gravement blessé
Décembre 2004	Boeing 737-500	France	L'avion subit un gradient de vent et des turbulences en entrant de face dans un courant-jet. (Voir page 9)	
Juillet 2005	Beech 100 King Air	France	En évitant une zone orageuse, l'équipage sollicite une altération supplémentaire de cap jugée incompatible avec le trafic aérien par le contrôleur. L'avion pénètre dans un cumulonimbus. (Voir page 7)	
Février 2006	Airbus A340	Groenland (Danemark)	L'avion pénètre dans un courant-jet au dessus des reliefs du Groenland. (Voir page 10)	1 passager gravement blessé

## Références

- Airbus, Flight Operations Briefing Notes : Adverse Weather Operations
- Air France, MAC (Manuel d'Activité Complémentaire)
- Air France, Sécurité des vols n°38, vol en turbulences sévères, adaptation d'un article de Michel Trémaud
- BEA, rapport sur l'accident survenu le 5 septembre 1996 à un B747-400 au Burkina Faso
- BEA, rapport sur l'accident survenu le 8 août 1997 à un DC10 en France en croisière au FL350
- BEA, Incidents Transports aérien n°5 de décembre 2006 : Gradients de vent et turbulences
- CAST, Turbulence Joint Safety Analysis Team (JSAT), 2001
- DSNA, Météo France, Air France : plan d'action « orages »
- ENAC, mémoire de fin d'étude IENAC : visualisation des cellules orageuses sur les écrans des contrôleurs
- Eurocae document ED-112
- Eurocae document ED-151
- FAA, Advisory Circular : Preventing Injuries Caused by Turbulence
- FAA, NASDAC, review of Aviation Accidents involving weather turbulence in the United States, August 2004
- FLYSAFE, <http://www.eu-flysafe.org/Project.html>
- IATA, STEADES (Safety Trend Evaluation, Analysis and Data Exchange System): Cabin Crew Turbulence-Related Injuries 2004 Threat Analysis
- Météo France, Guide technique : les renseignements SIGMET
- NTSB, LAX01LA136, rapport sur l'accident survenu le 19 avril 2001 à un Airbus A320 à Las Vegas (EU)
- NTSB, FTW03LA195, rapport sur l'accident survenu le 06 août 2003 à un Airbus A340-300 à Walnut Ridge (EU)
- NTSB, DEN05LA090, rapport sur l'accident survenu le 10 juin 2005 à un Airbus A319 à Scottsbluff (EU)
- OACI, Annexe 3 : Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale, juillet 2004
- OACI, Journal de l'OACI numéro 7-2001 : Turbulence en Air Clair
- OACI, OMM, Commission de Météorologie Aéronautique : ASPOC : une aide à la gestion de l'espace aérien, compte rendu de réunion
- OACI PANS ATM doc 4444
- RCA, RCA3-75 et SCA-35 : Service d'information de vol



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

Zone Sud - Bâtiment 153  
200 rue de Paris  
Aéroport du Bourget  
93352 Le Bourget Cedex - France  
T : +33 1 49 92 72 00 - F : +33 1 49 92 72 03  
[www.bea.aero](http://www.bea.aero)

