



⁽¹⁾Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en temps universel coordonné (UTC).

⁽²⁾Officier pilote de ligne.

⁽³⁾Inertial Reference System (Centrale à inertie), cf. § 2.1.1.

⁽⁴⁾Cockpit Voice Recorder (Enregistreur de conversations de poste de pilotage).

⁽⁵⁾Officier Place Gauche.

⁽⁶⁾Cette information a été uniquement transmise oralement par un technicien au sol.

⁽⁷⁾Pilot Monitoring (Pilote non en fonction).

⁽⁸⁾Pilot flying (Pilote en fonction).

⁽⁹⁾Ce message est généré lors d'une dérive significative de l'IRS 2 par rapport à la position Flight Management (FM).

⁽¹⁰⁾Multipurpose Control and Display Unit (Interface permettant à l'équipage d'entrer et de consulter des données utiles au vol).

⁽¹¹⁾Les heures de relèves indiquées dans ce rapport sont estimées d'après les témoignages de l'équipage et les pratiques de relève chez l'exploitant.

Incident grave de l'Airbus A330 immatriculé F-GRSQ survenu le 26 décembre 2014 en croisière, au-dessus de la mer Méditerranée

Heure	Vers 13 h 45 ⁽¹⁾
Exploitant	XL Airways France
Nature du vol	Transport commercial
Personnes à bord	Commandant de bord (CdB), 2 OPL ⁽²⁾ , 10 PNC, 304 passagers
Conséquences et dommages	Aucun

Indisponibilité des trois IRS⁽³⁾, perte des informations d'attitude et de navigation en croisière

1 - DÉROULEMENT DU VOL

Le déroulement du vol est basé sur les paramètres de vol enregistrés et les témoignages des membres de l'équipage technique et les transcriptions ATC. Le CVR⁽⁴⁾ n'a pas été préservé après l'atterrissement.

L'équipage doit effectuer le vol Saint-Denis de la Réunion (974) – Marseille (13). Il s'agit d'un équipage renforcé, composé d'un CdB et de deux OPL dont l'un assurera la suppléance du CdB pendant son repos, conformément aux procédures de l'exploitant. Cet OPL est désigné dans ce rapport par le sigle OPG⁽⁵⁾.

Lors de la préparation de l'avion, l'équipage prend connaissance qu'une dérive de l'IRS 2 a été signalée par l'équipage précédent⁽⁶⁾. Le CdB est PM⁽⁷⁾. L'OPG est PF⁽⁸⁾ et effectue un alignement complet des trois centrales, conformément aux procédures prévues. Pour le départ, les trois membres d'équipage sont présents dans le poste de pilotage. L'avion décolle à 5 h 38.

Dès le début du vol, l'équipage voit le message « *Check IR 2 / FM position* »⁽⁹⁾ au MCDU⁽¹⁰⁾ et constate une dérive de l'IRS 2. Pendant toute la suite du vol, l'équipage surveille régulièrement la dérive de l'IRS 2. Il indique lire des valeurs comprises entre 6 et 15 NM environ. Le mode GPS primary est actif pendant tout le début du vol.

Le CdB prend le premier repos, environ une heure après le décollage. Il est remplacé par l'OPG. Au retour du CdB, vers 09 h 40 environ⁽¹¹⁾, l'OPL quitte le poste de pilotage pour se reposer à son tour.

⁽¹²⁾Les hypothèses pouvant expliquer ce passage de NAV à ATT sont discutées dans le paragraphe § 3.1.1.

⁽¹³⁾Flight Management Guidance and Envelope Computer (Calculateur de gestion du vol, de guidage et d'enveloppe de vol) cf. § 2.1.2.

⁽¹⁴⁾L'impact opérationnel de cette panne est présenté dans la page STATUS de l'ECAM qui doit être consultée lors de la préparation de l'arrivée.

⁽¹⁵⁾Air Data Inertial Reference Unit (Calculateur de paramètres aérodynamiques et inertIELS).

⁽¹⁶⁾Electronic Centralized Aircraft Monitoring (Écrans affichant des informations relatives aux systèmes de l'avion).

⁽¹⁷⁾Directeur de vol.

⁽¹⁸⁾Automatic Pilot (Pilote automatique).

⁽¹⁹⁾AutoThrust (Autopoussée).

⁽²⁰⁾Navigation Display (Écran de navigation)

⁽²¹⁾Le mode BACK-UP NAV est une fonction de secours du MCDU qui fournit des informations de navigation IRS en cas de double panne de la fonction (FM). Elle permet de présenter le plan de vol (sauvegardé dans le MCDU) et la position de l'avion (provenant d'une IRS) sur les ND.

⁽²²⁾L'origine de ce triple alignement est discutée dans le § 3.1.3.

À 10 h 34, l'IRS 3 passe du mode NAV au mode ATT⁽¹²⁾. Dans ce mode, l'IRS fournit des données d'attitude mais plus d'autres données comme la position et la vitesse sol. Les automatismes de vol (partie FG du FMGEC⁽¹³⁾, cf. § 2.1.3) rejettent l'IRS 3 et utilisent uniquement les données des IRS 1 et IRS 2 pendant la suite du vol. Cette perte de redondance n'a pas d'impact sur les données de navigation affichées et ne nécessite aucune action équipage à court ou moyen terme. Conformément à la philosophie du constructeur, l'équipage n'est donc pas averti immédiatement⁽¹⁴⁾.

À 13 h 00 environ, l'OPL relève l'OPG qui quitte le poste de pilotage. Il s'installe en place droite et assure les fonctions de PF.

Peu de temps après, en voulant surveiller la dérive de l'IRS 2 au MCDU, il remarque que l'IRS 3 est en mode ATT. Il n'y a pas d'alarme affichée sur le panneau des ADIRU⁽¹⁵⁾. Les trois sélecteurs de mode sont sur NAV. Il explique avoir vu des cases invitant à rentrer un cap pour l'IRS 3 sur la page IRS MONITOR du MCDU.

L'équipage consulte la procédure papier IR FAULT, qui l'amène à effectuer la procédure IR ALIGNMENT IN ATT MODE pour l'IRS 3. Cette procédure demande la mise du sélecteur de mode sur ATT ainsi que l'insertion du cap au MCDU. Le CdB se souvient d'avoir vu un message ECAM⁽¹⁶⁾ demandant le passage de cette IRS en mode ATT. L'équipage commande le passage en mode ATT de l'IRS 3. Les trois membres d'équipage ont indiqué qu'aucune action sur les sélecteurs de mode des IRS n'avait été faite pendant le vol avant ce moment.

À 13 h 36, le DV⁽¹⁷⁾, l'AP⁽¹⁸⁾ et l'A/THR⁽¹⁹⁾ se désengagent automatiquement. Les informations de position et du plan de vol sur les ND⁽²⁰⁾ disparaissent. Les messages ECAM présentés par priorité d'affichage décroissante (via le code couleur suivant : rouge pour warning, orange pour caution) sont : **AUTO FLT AP OFF, AUTO FLT A/THR OFF** et **AUTO FLT REAC W/S DET FAULT**. Le mode GPS primary est perdu. L'OPL reprend les commandes. Puis, l'OPL et le CdB activent le mode BACK-UP NAV⁽²¹⁾ sur leurs MCDU respectifs et récupèrent des données de position et de plan de vol.

Le CdB indique qu'il essaye sans succès de vérifier les informations des IRS dans le mode BACK-UP NAV. Il indique qu'il sort du mode pour accéder aux pages POSITION MONITOR et IRS MONITOR. Il ne parvient pas à accéder à une information de position valide ni à revenir au mode BACK-UP NAV. Ces actions ne peuvent pas être datées précisément.

À 13 h 44, les données internes de chaque IRS enregistrent le message « *IN FLIGHT ALIGNMENT* »⁽²²⁾. La loi de commande de vol passe en loi directe. Les informations d'attitude disparaissent des PFD jusqu'à la fin du vol. Les informations de position et de plan de vol ne sont plus disponibles sur les ND. L'équipage doit utiliser les instruments de secours électromécaniques pour le reste du vol, sans AP ni A/THR. Les messages ECAM, toujours présentés par priorité d'affichage décroissante, comprennent : **F/CTL DIRECT LAW, NAV IR 1 FAULT, NAV IR 1+2 FAULT, NAV IR 2+3 FAULT, NAV IR 1+3 FAULT, NAV IR NOT ALIGNED**.



Figure 1 : photo prise par l'équipage pendant la descente vers Athènes

Quelques minutes plus tard, le CdB choisit de devenir PF car la lecture des instruments de secours est plus facile depuis la place gauche. Il demande le retour en poste de l'OPG. Dans son témoignage, celui-ci indique qu'à son retour, les trois sélecteurs de mode des IRS sont sur NAV et que les témoins lumineux « *IR Fault* » clignotent.

(23)Reduced Vertical Separation Minimum (minimum de séparation vertical réduit).

L'avion approche de l'espace aérien grec. L'OPL indique au contrôle aérien grec qu'ils ont perdu leur capacité RVSM⁽²³⁾ puis déclare une situation d'urgence. L'équipage examine les possibilités de déroutement vers Héraklion et Athènes. Il retient Athènes en raison des conditions météorologiques favorables et du support qu'il peut espérer du contrôle aérien. L'équipage bénéficie d'un guidage radar pour rejoindre la finale de la piste 21L. Pendant la descente l'équipage déclare une situation de détresse. L'OPL et l'OPG vérifient les performances à l'atterrissage.

L'OPG se souvient avoir effectué la séquence NAV-OFF-NAV sur l'IRS 1 à la demande du CdB qui voulait tenter de récupérer au moins des informations d'attitude. Les témoignages ne permettent pas de savoir si d'autres actions ont été faites sur les autres sélecteurs.

Au premier contact avec l'approche d'Athènes et compte-tenu d'un vent faible du 140°, l'équipage accepte la proposition d'atterrir à vue en piste 03R à l'issue du guidage radar qui doit les amener en finale à 10 NM du seuil.

Une courte séquence vidéo prise par l'OPG pendant la finale montre que les trois sélecteurs de mode sont sur NAV et que les témoins lumineux « *IR fault* » clignotent. L'avion atterrit à 14 h 37. Après l'arrivée de l'avion, un mécanicien prend connaissance des anomalies indiquées par l'équipage. L'avion est mis hors tension puis à nouveau sous tension. Les trois IRS sont alignées avec succès. Des vérifications sont faites sur les calculateurs de l'AP et des commandes de vol. L'équipage redécolle à 17 h 47 vers Marseille puis Paris-Charles de Gaulle où il atterrit à 22 h 29. Aucune anomalie n'a été signalée sur ces vols. Les ADIRU ont été déposés peu après.

2 - RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

2.1 Renseignements sur l'aéronef

2.1.1 Généralités sur les systèmes IRS

Une IRS élabore des paramètres d'accélération, de vitesses linéaires et angulaires, de position et d'orientation de manière autonome selon des mesures inertielles (accéléromètres et gyromètres). Le calcul continu en temps réel de ces paramètres, en particulier de ceux calculés par intégration, nécessite au préalable la détermination de références initiales.

Ainsi, « *l'alignement* » d'une IRS désigne l'ensemble des opérations effectuées par cet équipement permettant de déterminer automatiquement les références initiales d'horizon, d'orientation et de latitude. Des valeurs de latitude et de longitude sont initialisées par une source extérieure (entrée manuelle ou GPS par exemple). Ces opérations prennent plusieurs secondes à plusieurs minutes selon les technologies utilisées, la latitude et le niveau de précision exigé.

En vol, si le calcul est interrompu (par exemple par un changement de mode), il est nécessaire de déterminer de nouvelles conditions initiales pour le reprendre. Sur le modèle d'IRS équipant le F-GRSQ, ceci est possible pour les références d'attitude et de cap mais nécessite l'application d'une procédure par l'équipage (IR ALIGNMENT IN ATT MODE). En revanche, ce n'est pas possible pour les références nécessaires à l'élaboration des paramètres de navigation qui ne peuvent être déterminées que lorsque l'avion est immobile, au sol.

2.1.2 Système ADIRS de l'Airbus A330

Le système ADIRS (Air Data Inertial Reference System) de l'Airbus A330 fournit en particulier l'attitude (assiette et inclinaison), le cap, la position, la vitesse sol, les accélérations et les paramètres air. Sur Airbus, un système ADIRS complet est composé de :

- trois ADIRU identiques ;
- un MSU⁽²⁴⁾ ou un CDU.

Les données GPS proviennent de deux GNSSU (Global Navigation Sensor System Units) ou deux MMR (Multi-Mode Receivers).

Chaque ADIRU inclut une ADR (Air Data Reference) et une IRS. L'Airbus F-GRSQ est équipé d'un MSU situé sur le panneau supérieur du poste de pilotage. Le MSU permet de choisir le mode pour sélectionner l'état opérationnel de chaque IRS : OFF, NAV ou ATT. Seules des actions équipage sur le MSU permettent de changer le mode d'un ADIRU. Le sélecteur doit d'abord être tiré avant d'être tourné pour éviter une action involontaire aux conséquences irréversibles.

⁽²⁴⁾Mode Selector Unit (Panneau de commande des ADIRU).

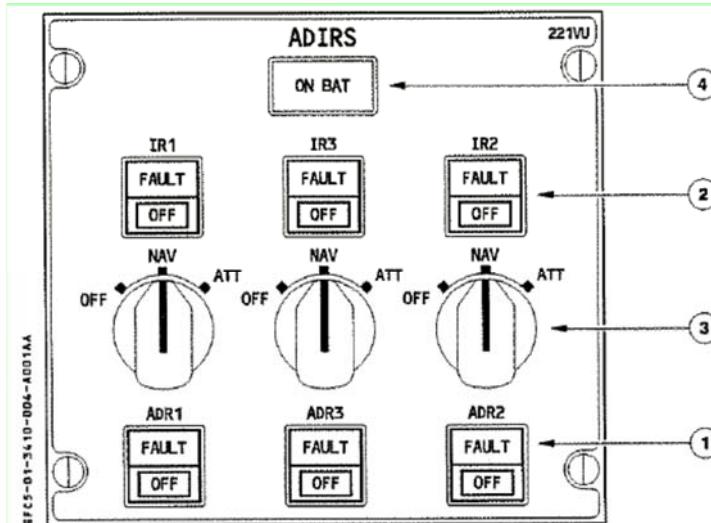


Figure 2 : MSU

⁽²⁵⁾La procédure d'alignement complet est effectuée au sol, avion immobile. Elle demande de placer le sélecteur de la position NAV à OFF pendant plus de 5 secondes, puis à NAV (PRO-SUP-34 P 15/16). Plus tard, lors de la préparation du MCDU, la position de départ de l'avion est vérifiée par l'équipage et transmise aux IRS.

Passer le sélecteur de OFF à NAV permet de lancer l'alignement de l'IRS⁽²⁵⁾. Le mode NAV est le mode standard utilisé pendant tout le vol. Si on sort du mode NAV en vol, il est impossible de réaligner complètement une IRS et donc de récupérer les informations de position et de vitesse sol. Dans ce cas, l'IRS conserve en mémoire non volatile le temps total de navigation ainsi que la dernière position et la dernière vitesse sol calculées.

Dans le mode ATT, l'IRS ne calcule plus la position et la vitesse sol. L'IRS peut toujours fournir les accélérations, les taux angulaires et l'attitude. Le mode ATT est normalement utilisé par un équipage quand l'IRS auto-déetecte une défaillance critique qui pourrait causer des erreurs excessives dans la navigation.

Lorsqu'une de ces défaillances survient, les indications fournies à l'équipage sont :

- un témoin clignotant IR Fault sur la partie ADIRS du panneau supérieur ;
- un message « IR FAULT » affiché à l'ECAM ;
- des messages spécifiques à la panne peuvent être présentés sur la page IRS MONITOR du MCDU.

De plus, les inscriptions « ATT » et « HDG » sont respectivement affichées sur le PFD et le ND correspondant à l'IRS défaillante (cf. figure 1). Si le rotatateur « ATT HDG » (cf. figure 3) est positionné sur « NORM », comme dans le cas du vol de l'événement :

- il s'agit du PFD et du ND gauches pour l'IRS 1 et du PFD et ND droits pour l'IRS 2 ;
- une défaillance de l'IRS 3 ne conduit à aucun changement aux PFD et ND.

En cas de panne de l'IRS 1 ou 2, l'équipage peut utiliser le rotatateur « ATT HDG » pour utiliser les données de l'IRS 3 sur le côté gauche (« CAPT ON 3 ») ou sur le côté droit (« F/O ON 3 »). Dans ce cas, une défaillance de l'IRS 3 est signalée du côté sélectionné.

La même logique existe pour la partie ADR (cf. rotatateur « AIR DATA » de la figure 3).

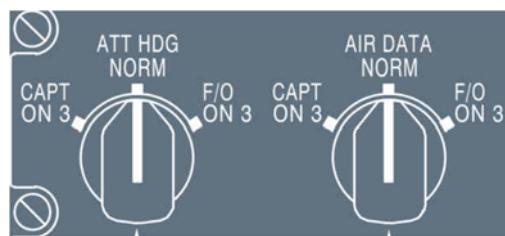


Figure 3 : rotateurs « ATT HDG » et « AIR DATA »

Lors du passage commandé en mode ATT :

- l'équipage doit maintenir l'avion en palier stabilisé, ailes horizontales, pour que l'IRS puisse déterminer de nouvelles références. De plus, une saisie du cap magnétique est requise au MCDU pour récupérer l'information de cap (procédure IR ALIGNMENT IN ATT MODE) ;
- si le témoin lumineux IR FAULT était allumé clignotant avant le passage en ATT, celui-ci s'éteint.

Lorsque l'IRS est en mode ATT, si le sélecteur est positionné de ATT vers NAV, le mode opérationnel reste ATT.

Le FCOM (DSC-34-10-20 P 1/6) indique que l'observation du voyant IR FAULT permet de savoir si l'IRS est récupérable en mode ATT (le voyant clignote) ou si elle est totalement indisponible (le voyant est allumé en continu).

Le mode de chaque IRS est indiqué en pages IRS Monitor et Position Monitor du MCDU, comme l'indiquent les illustrations suivantes.



Figure 4 : exemple de la page POSITION MONITOR. Photo prise en simulateur.
Notez le mode des IRS.

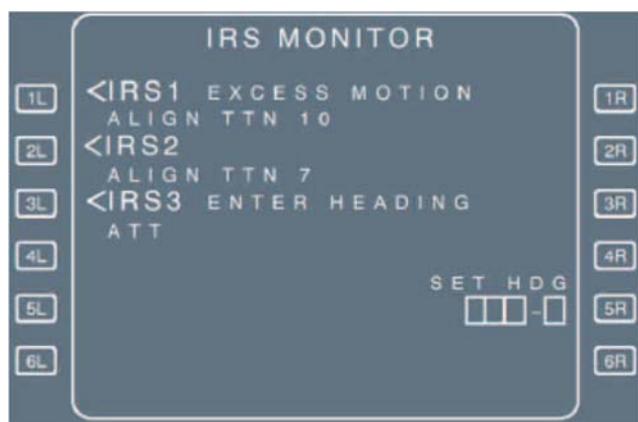


Figure 5 : page IRS MONITOR du MCDU extraite du FCOM. Notez les modes des IRS ainsi que la possibilité d'entrer un CAP (SET HDG) pour l'IRS 3.

2.1.3 Surveillance des IRS par la partie FG du FMGEC

La partie FG (Flight Guidance) comprend les fonctions AP/FD et A/THR. Elle rejette une IRS si :

- une donnée reçue n'est pas valide ;
- la valeur d'une donnée reçue n'est pas cohérente avec les valeurs des deux autres sources. Dans ce cas-là, le rejet de cette valeur est verrouillé jusqu'à la déconnexion de l'AP.

Lorsque la partie FG rejette une IRS, elle continue d'utiliser les données des deux autres IRS et de surveiller la validité et la cohérence des données reçues. En cas d'écart trop important entre les valeurs d'une même donnée reçues des deux IRS restantes, les deux IRS sont rejetées et les automatismes de vol ne sont plus disponibles.

2.1.4 Perte des positions FM en cas de rejet des trois IRS par la partie FG du FMGEC

Lorsque les deux IRS restantes sont rejetées par les automatismes de vol (partie FG du FMGEC), le comportement de la partie FM (Flight Management) du FMGEC est différent suivant les standards FMS⁽²⁶⁾. Les positions FM, présentées sur les ND, peuvent être perdues si l'aéronef n'est pas équipé des standards FMS les plus récents.

⁽²⁶⁾ Flight Management System (Système de gestion du vol).

Rejet des 3 IRS par la partie FG du FMGEC		
Standards FMS	Perte des positions FM	Date d'introduction
Honeywell P3 ou antérieurs	oui	-
Honeywell P4	non	2012
Thales	non	2005

Le F-GRSQ était équipé du standard FMS Honeywell P3, ce qui explique la perte des positions FM à 13 h 36. Airbus a indiqué que 40 à 45 % de la flotte long-courrier est équipée de ce standard.

Le nouveau standard Honeywell P4, inclut une modification qui permet une meilleure disponibilité de la position FM dans ce type de situation. Cette amélioration est mentionnée dans le document d'information sur les standards FMS communiqué aux opérateurs⁽²⁷⁾.

⁽²⁷⁾ Référence Airbus ISI 22-83-34 « Flight management guidance and envelope computer (FMGEC) evolution

⁽²⁸⁾ Electronic Flight Control System (Système des commandes de vol).

2.1.5 Surveillance des IRS par l'EFCS⁽²⁸⁾

L'EFCS reçoit des données fournies par les trois IRS et peut rejeter une IRS si :

- une donnée reçue n'est pas valide ;
- la valeur d'une donnée reçue n'est pas cohérente avec les valeurs des deux autres IRS. Dans ce cas-là, le rejet de cette valeur est verrouillé tant que le calculateur n'est pas réinitialisé.

Les commandes de vol utilisent et surveillent les paramètres inertIELS dits primaires (attitudes, angles de roulis, tangage, lacet, etc.) mais pas la position et la vitesse.

Le message NAV IR DISAGREE n'est pas apparu à l'ECAM pendant le vol. Ce message, généré par la surveillance effectuée par les commandes de vols, est émis si :

- une IRS est défaillante ou rejetée par les commandes de vol ;
- et
- les commandes de vol détectent un écart dans les paramètres inertIELS primaires des deux IRS restantes.

2.1.6 Indisponibilité des informations GPS

L'avion dispose de deux récepteurs GPS indépendants. Les données GPS sont transférées aux IRS qui calculent une position hybride GPS / IRS appelée GPIRS. Les données GPS pures et la position hybride sont transmises par l'IRS au FMGEC par le même bus. Le FMGEC utilise les positions IRS ou hybrides GPIRS mais jamais les positions GPS pures seules. Celles-ci sont toutefois disponibles pour l'équipage dans la page GPS MONITOR du MCDU.

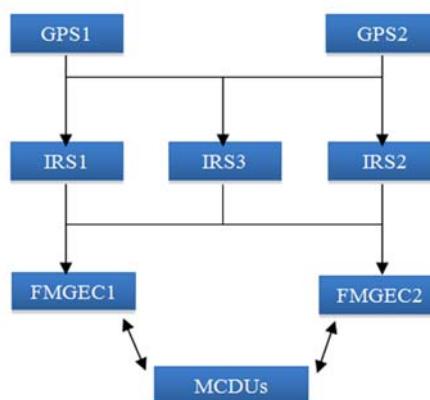


Figure 6 : schéma de principe de transmission des informations GPS. La fonction GPS est assurée par les MMR et la fonction IRS par les ADIRU.

Le FMGEC utilise le paramètre « *hybrid GPIRS latitude* » comme une donnée de référence pour déterminer la validité des données GPS (c'est-à-dire les données pures GPS et hybrides GPIRS).

Si cette donnée de référence n'est plus valide (Statut « *Failure Warning* » par exemple), les positions GPIRS et GPS sont considérées comme invalides par la partie FMS. Un paramètre doit être valide pour être utilisé par le FMGEC ou affiché sur le MCDU.

Lorsqu'une IRS est en mode ATT, le statut de la donnée de référence est positionné à « *Non Computed Data (NCD)* ». Dans ce cas, les données GPS pures ne sont pas déclarées invalides et sont affichées dans la page GPS MONITOR du MCDU.

Lors de l'événement, à 13 h 45, les trois IRS en mode IN FLIGHT ALIGNMENT positionnent le statut de la donnée de référence à « *Failure warning* », ce qui explique que l'équipage n'ait plus eu accès aux positions GPS pures dans les pages GPS MONITOR du MCDU. Un passage d'une des IRS en mode ATT aurait modifié le statut de la donnée de référence et permis à l'équipage de visualiser les positions GPS pures au MCDU. Cette logique a été confirmée par le constructeur sur des essais sur avion.

⁽²⁹⁾Les données d'une IRS sont par exemple indisponibles dans les cas suivants :

- arrêt (commandé ou non) d'un ADIRU
- réalignement en vol d'un ADIRU
- défaillance de la partie IRS
- défaillance sur le bus de transmission IRS / FMGEC

⁽³⁰⁾Les messages ECAM et les procédures associées sont en effet prévus pour la défaillance d'une ou de deux IRS seulement.

Le message ECAM « NAVIR 1+2+3 FAULT » n'existe pas. Les messages ECAM possibles sont donc « NAVIR 1 FAULT », « NAVIR 2 FAULT », « NAVIR 3 FAULT », « NAVIR 1+2 FAULT », « NAVIR 2+3 FAULT », « NAVIR 1+3 FAULT ».

⁽³¹⁾L'AMM demande le remplacement d'un ADIRU si deux vols consécutifs donnent lieu à des dérives dépassant les seuils définis. La direction technique préfère anticiper le changement d'un ADIRU lorsque des dérives non consécutives sont signalées, pour éviter d'être contrainte à un changement obligatoire lorsque l'avion est en escale lointaine.

Dans le cadre de la certification de l'aéronef, Airbus avait jugé la panne de trois IRS⁽²⁹⁾ hautement improbable et n'avait étudié les conséquences d'une panne que pour une ou deux IRS seulement. Cela correspond aux messages ECAM de type « NAV IR [X+Y] FAULT⁽³⁰⁾ ». Par conséquent l'indisponibilité des positions GPS due à la panne des trois IRS sans disponibilité du mode ATT n'est pas un mode dégradé prévu par le constructeur dans le cadre de la certification.

Le BEA a informé l'EASA de l'événement et en particulier du fait que l'équipage n'a pas réussi à récupérer les informations de positions GPS.

L'EASA a indiqué que :

- l'A330 est conforme aux exigences de certification relatives à l'installation des équipements de navigation disponibles dans le JAR-25 / CS-25 ainsi qu'aux guides spécifiques (JAA TGL-10, EASA AMCs 20-4, 20-5, 20-26, 20-27, FAA ACs) ;
- l'A330 dépasse largement les exigences du CS25.1309 AMC 25-11 qui chiffre la probabilité par heure de vol ($<10^{-5}$) pour la perte d'affichage de toute information de navigation

C'est pourquoi, l'EASA ne prévoit aucune exigence qui remettrait en cause l'architecture actuelle.

2.1.7 Suivi technique de l'aéronef

La direction technique d'XL Airways France avait décidé, par précaution⁽³¹⁾, de faire remplacer l'ADIRU 2 le 24 décembre lors d'une escale à Marseille, en raison de dérives notées par les équipages sur le Compte rendu mécanique (CRM), lors de vols précédents. En raison d'une permutation des étiquettes FIN (Functional Identification Number), 1FP1 (censée désigner l'emplacement de l'ADIRU 1) et 1FP2 (censée désigner l'emplacement de l'ADIRU 2) dans la soute avionique, c'est l'ADIRU 1 qui a été changé au lieu de l'ADIRU 2. La raison de cette permutation des étiquettes n'a pas été établie. La direction technique a indiqué que l'historique de maintenance depuis 2007 ne mentionnait aucune dépose des châssis supportant les ADIRU et sur lesquels sont collées les étiquettes. Il n'a pas été identifié d'action de maintenance nécessitant de remplacer les étiquettes depuis cette date. XL Airways France exploite cet aéronef depuis sa livraison par Airbus en novembre 2002. L'historique de ces équipements entre 2002 et 2007 n'a pas été retracé. Les étiquettes des deux autres Airbus A330 exploités par la compagnie ont été vérifiées après l'incident. Elles n'étaient pas permutees.

L'historique de l'avion ne fait pas ressortir d'autre événement associé aux ADIRU avant l'incident. XL Airways France a indiqué qu'aucun dysfonctionnement similaire (changement de mode) n'a été observé sur le F-GRSQ depuis l'événement (soit plus de 7 000 heures de vol et 930 cycles en mai 2016). Le panneau de commande des ADIRU et la connectique associée n'ont pas fait l'objet d'intervention. Cette constatation tend à exclure une panne intermittente liée à ces équipements.

2.2 Exploitation des données enregistrées

La position des sélecteurs de mode des IRS n'est pas enregistrée dans le FDR. Toutefois, certains changements de mode peuvent être déduits des messages enregistrés dans les mémoires internes des IRS et dans le PFR.

Aucune défaillance de l'IRS 3 n'a été enregistrée dans le PFR ni dans la mémoire interne de l'IRS. Celle-ci contenait les informations de fin de navigation suivantes :

- la dernière position (N12°25,0', E36°45,8') située près de la frontière entre l'Éthiopie et le Soudan ;
- la dernière vitesse sol : 477,9 kts ;
- le temps total de navigation : 5 heures 2 minutes.

⁽³²⁾Lors de la transition du mode NAV vers le mode ATT, les informations d'attitude et d'accélérations, utilisées par les calculateurs des commandes de vol sont temporairement indisponibles. Selon les principes de conception, ces informations ont pu être à nouveau utilisées par les commandes de vol lorsqu'elles sont redevenues disponibles.

⁽³³⁾Il n'est pas possible de comparer directement les données inertielles de l'ADIRU 1 et l'ADIRU 2 car le FDR enregistre une seule source. Toutefois, il existe un écart significatif entre la vitesse calculée par l'ADIRU 1 (434 kt) enregistrée au FDR et la vitesse enregistrée dans la mémoire de l'ADIRU 2 (411 kt) environ huit minutes plus tard, à 13 h 44.

Le temps de navigation permet de dater la sortie du mode NAV de l'IRS 3 à 10 h 34. La position et la vitesse sol de fin de navigation sont cohérentes avec les valeurs enregistrées dans le FDR à cet instant.

Des essais réalisés chez Honeywell ont permis de confirmer que le seul scénario technique possible était un passage du mode NAV au mode ATT. Lors du passage du mode NAV au mode OFF, les données inertielles ne sont en effet plus transmises par l'IRS, ce qui aurait conduit à un message IR FAULT à l'ECAM et enregistré au PFR.

L'IRS 3 est donc passée du mode NAV au mode ATT à 10 h 34, pendant la croisière. Elle a alors été rejetée temporairement⁽³²⁾ par les calculateurs des commandes de vol et jusqu'à la fin du vol par l'AP. La perte de la fonction navigation d'une seule IRS n'affecte pas la conduite du vol. Selon la logique retenue par le constructeur Airbus, cette information ne se traduit donc pas par l'apparition d'un message ECAM. De plus, les PFD et ND utilisant les données des IRS 1 et IRS 2, la perte de la fonction de navigation de l'IRS 3 n'a pas eu de conséquence sur ces écrans. Le fait que l'IRS était en mode ATT était indiqué sur le MCDU (pages POSITION MONITOR ou IRS MONITOR) et la saisie de cap était demandée à l'équipage (cf. figures 4 et 5).

À 13 h 36, soit environ trois heures plus tard, la déconnexion automatique de l'AP, de l'A/THR et la perte des informations de position FM sur les ND est la conséquence du rejet par la partie FG du FMGEC des deux IRS restantes (cf. § 2.1.3 et 2.1.4). Il est très probable qu'à cet instant, des données inertielles de navigation de l'IRS 1 et de l'IRS 2 n'étaient plus cohérentes⁽³³⁾ entre elles en raison de la dérive de l'IRS 2. Les messages ECAM associés à cette situation étaient : **AUTO FLT AP OFF, AUTO FLT A/THR OFF, AUTO FLT REA W/S DET FAULT**. L'absence du message NAV IR DISAGREE s'explique par le fait que les commandes de vol (EFCS) disposaient encore d'au moins deux sources cohérentes pour les paramètres inertIELS primaires (cf. § 2.1.5).

Les témoignages indiquent que l'équipage retrouve des positions valides en activant le BACK-UP NAV mode. L'entrée et la sortie de ce mode ne sont pas enregistrées mais peuvent être datées à partir des paramètres de position enregistrés côté CdB et OPL qui redeviennent valides puis à nouveau invalides :

	CdB	OPL
13 h 36 Perte des positions FM côté CdB et OPL simultanément à la déconnexion PA		Positions indisponibles
13 h 38 min 36 La position côté CdB redevient valide.	Mode BACK-UP NAV Positions disponibles	Positions indisponibles
13 h 38 min 53 La position côté OPL redevient valide.		Mode BACK-UP NAV Positions disponibles
13 h 43 min 58 La position côté CdB devient invalide.		
13 h 44 min 55 La position côté OPL devient invalide. Dans la même minute est enregistré un alignement en vol des trois ADIRU.	Positions indisponibles	Positions indisponibles

Le CdB récupère des positions valides pendant environ cinq minutes. Les positions côté CdB deviennent à nouveau invalides à 13 h 43 min 58 ce qui permet de dater la sortie du mode BACK-UP NAV du côté CdB. La sortie de ce mode permettait normalement l'accès aux informations IRS dans les pages « POSITION MONITOR » et « IRS MONITOR » du MCDU. L'alignement en vol des ADIRU intervient environ une minute plus tard. L'OPL perd l'information de position à 13 h 44 min 55 ce qui est très probablement la conséquence de l'alignement en vol des ADIRU.

À 13 h 44, les informations d'attitude, qui étaient toujours prises en compte par les calculateurs des commandes de vol, deviennent indisponibles en raison d'un alignement en vol dans la même minute pour chacune des trois IRS. En l'absence de ces informations, la loi de commande de vol active devient la loi directe. Les messages ECAM présentés par priorité d'affichage comprennent : **F/CTL DIRECT LAW, NAV IR 1 FAULT, NAV IR 1+2 FAULT, NAV IR 2+3 FAULT, NAV IR 1+3 FAULT, NAV IR NOT ALIGNED**, complétés par des messages considérés comme des conséquences sur les autres systèmes de l'avion. Les informations de position et de plan de vol ne sont plus disponibles sur les ND.

À 13 h 46, la position enregistrée du rotacteur « AIR DATA » passe de « NORM » à « CAPT ON 3 » jusqu'à la fin du vol. La source ADR utilisée du côté gauche (CdB) est passée de ADR 1 à ADR 3.

Le rotateur « ATT HDG » est resté sur la position « NORM » pendant tout le vol. Cela signifie que la source de données IRS côté gauche (CdB) était l'IRS 1 et que la source côté droit (OPL) était l'IRS 2.

2.3 Examens des ADIRU et étude des modes de pannes envisagées par le constructeur

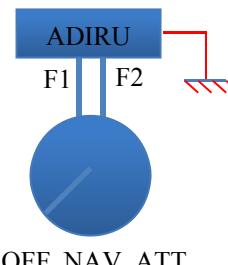
Des examens des trois ADIRU ont été effectués chez le constructeur Honeywell. En premier lieu, des tests classiques de validation (ATP : Acceptance Test Protocol) ont été conduits et n'ont pas fait ressortir d'anomalie. Des tests de navigation ont donné des résultats satisfaisants.

Les ADIRU 1 et 2 ont été remis en service opérationnel par Honeywell et renvoyés à Air France Industries, leur propriétaire. Leur alignement en vol simultané à celui de l'ADIRU 3, conduit en effet à penser qu'il a été commandé par une source extérieure aux trois calculateurs, compte-tenu de la probabilité extrêmement faible d'avoir trois défaillances internes simultanées.

Une inspection visuelle des composants électroniques a été effectuée sur l'ADIRU 3 pour tenter d'expliquer l'éventuel changement de mode intempestif daté de 10 h 34. Cet examen complémentaire n'a mis en évidence aucun élément confortant cette hypothèse. L'ADIRU 3 a été remis en service en octobre 2015 sur un autre avion et fait l'objet d'un suivi par Air France Industries, propriétaire de l'unité, qui a indiqué que cet équipement a ensuite cumulé plus de 8 000 heures de fonctionnement jusqu'en octobre 2017, date à laquelle il a été déposé pour une panne franche sans rapport avec un changement de mode intempestif.

Des recherches ont été effectuées pour savoir si une défaillance dans la commande de changement de mode avait pu avoir lieu. Les changements de mode de chaque IRS sont commandés exclusivement par le MSU. L'IRS reçoit du MSU les signaux d'entrée discrets « Mode Select #1 » et « Mode Select #2 ». Honeywell a transmis la correspondance suivante entre les signaux d'entrée et le mode commandé :

ADIRU pin	Signal	Off	Nav	Att
F1	Mode Select #1	Open	Ground	Open
F2	Mode Select #2	Open	Open	Ground



⁽³⁴⁾ Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (Failure Mode and Effects Analysis).

À partir d'une démarche inductive aussi exhaustive que possible, les FMEA⁽³⁴⁾ identifient pour chaque composant d'un équipement :

- les fonctions de ce composant ;
- les différents modes de défaillance de chacun des composants ;
- les causes de ces pannes (type de défaillance de chaque composant ou de fonction de l'équipement) ;
- les effets de chaque panne sur l'équipement ou le système ;
- les probabilités d'occurrence de chaque panne.

L'élaboration des FMEA, largement utilisées dans l'industrie pour déterminer les modes de panne des équipements, repose en partie sur les connaissances et l'expérience des modes et des mécanismes de défaillance que peut avoir le personnel de l'équipementier.

Le document FMEA de l'ADIRU indique qu'une inversion du signal « *Mode Select #1* » ou « *Mode Select #2* » avait été évalué par Honeywell à 0,034 par million d'heures de vol.

Passage en mode ATT (10 h 34)

Seule une inversion des signaux « *Mode Select #1* » et « *Mode Select #2* » permet d'expliquer un passage non commandé en mode ATT. De plus, les deux défaillances doivent avoir lieu simultanément sinon le mode OFF est commandé. Ce changement non commandé est donc extrêmement improbable.

Alignement en vol (13 h 44)

Une inversion temporaire du signal « *Mode Select #1* » peut expliquer un réalignement en vol d'un IRS (NAV->OFF->NAV). Les signaux de masse des ADIRU étant indépendants, la défaillance commune sur la commande est quasi-impossible. L'inversion temporaire du signal « *Mode Select #1* » dans la même minute pour les trois ADIRU est donc extrêmement improbable.

Comme indiqué au § 2.1.8 aucun dysfonctionnement de connectique ni du panneau de commande n'a été signalé avant ni depuis l'incident sur le F-GRSQ.

2.4 Revue documentaire et formation des pilotes

2.4.1 Estimation des connaissances générales sur les modes de fonctionnement des IRS

⁽³⁵⁾ Citons notamment, les cours théoriques ATPL, des documents Airbus (FCOMs, FCTM, PDP, supports informatiques de formation à la qualification de type) et Boeing (FCOM 737, 777 et 747).

Afin de documenter les connaissances qui sont généralement apportées aux pilotes pendant leur formation sur le fonctionnement des systèmes de navigation à inertie, le BEA a effectué une revue de plusieurs documents⁽³⁵⁾ et interviewé des pilotes en activité.

Il en ressort que les connaissances semblent homogènes sur les aspects suivants :

- l'alignement n'est possible que lorsque l'avion est immobile au sol ;
- en vol sur avion Airbus, les actions sur les sélecteurs de mode des IRS par un membre d'équipage (le PM selon la répartition des tâches classique) doivent faire l'objet d'une confirmation par l'autre (PF), au même titre que les interrupteurs gardés, les sélecteurs des moteurs (Engine master switches), et les réinitialisations de calculateurs, en raison de leur caractère irréversible. Ceci est enseigné lors de la qualification de type et révisé en fonction des pannes étudiées lors des maintiens de compétences ;

⁽³⁶⁾ Le FCOM du Boeing 737 consulté pour cette revue mentionnait explicitement le caractère irréversible du passage de NAV en ATT

- il n'est en général pas écrit explicitement que le passage de NAV vers ATT est irréversible pour les données de navigation⁽³⁶⁾. Cela se déduit des différents documents et les pilotes interviewés ont estimé que ce point était connu de la population des pilotes.

2.4.2 Formation continue récente chez XL Airways France

Conformément à la réglementation, XL Airways France organise des Entraînements et contrôles périodiques (ECP) pour tous ses PNT. Le programme de chaque campagne annuelle doit répondre au contenu obligatoire fixé par la réglementation et contient également des thèmes propres à l'exploitant, définis en fonction de son activité et de ses incidents. Les ECP comprennent :

- des révisions théoriques par un système de E-learning qui doit être fait avant les deux jours de cours au sol. L'ensemble des systèmes avion est revu sur un cycle de trois ans ;
- deux jours de cours au sol incluant divers cours et des QCM validant les révisions ;
- quatre séances de simulateurs (deux contrôles et deux entraînements) ;
- un contrôle en ligne.

Pour la saison 2014/2015, le programme contenait en particulier une révision théorique des systèmes ATA 34 (Navigation) à l'aide de supports de formation Airbus, incluant les ADIRU et le mode BACK-UP NAV. L'ordre 1-3-2 des équipements y est rappelé⁽³⁷⁾. La nécessité pour le PM d'obtenir une confirmation du PF avant toute action irréversible sur les sélecteurs ou interrupteurs des IRS n'est pas rappelée. Cette révision étudiait quelques pannes dont NAV ATT discrepancy, ADR1 fault et la double panne de FMGEC. Les pannes NAV IR 1(2)(3) Fault ou NAV IR ALIGNMENT IN ATT MODE n'étaient pas incluses. Les QCM comportaient des questions sur le mode BACK-UP NAV et ne comportaient pas de questions sur les ADIRU et leurs commandes.

Les séances de simulateurs comprenaient des situations d' « Unreliable Airspeed » et des doubles pannes de FMGEC.

⁽³⁷⁾ XL Airways France a indiqué que la pratique consistant à aligner systématiquement les ADIRU au sol dans l'ordre 1 (gauche) puis 2 (droite) puis 3 (centre) permet de consolider l'assimilation de l'architecture. Cette pratique, non écrite, est enseignée.

2.5 Renseignements sur le personnel

Le CdB, âgé de 53 ans, détenait une licence ATPL délivrée le 27 avril 2004. Entré dans la compagnie en novembre 2000 en tant qu'OPL sur A320 puis sur A330 (qualification de type obtenue en 2003), il avait pris la fonction de CdB sur Boeing 737 (qualification de type obtenue en 2011) puis sur A330 en 2013. Il totalisait 11 321 heures de vol dont 6 200 sur A330 (154 dans les trois mois précédents).

L'OPG, âgé de 49 ans, détenait une licence ATPL délivrée le 19 novembre 2003. Entré dans la compagnie en avril 2003 comme copilote sur A320 (qualification de type obtenue en janvier 2003) puis sur A330 en 2005, il avait suivi le stage lui permettant de tenir la fonction d'OPG en avril 2010. Il totalisait 11 366 heures de vol dont 5 646 sur A330 (184 dans les trois mois précédents).

L'OPL, âgé de 40 ans, détenait une licence ATPL délivrée le 4 décembre 2008. Il est entré dans la compagnie en juin 2007 en tant qu'OPL sur A320 (qualification de type obtenue en 2006) puis sur A330 environ 18 mois plus tard (mars 2009). Il totalisait 5 300 heures de vol dont plus de 3 000 sur A330 (136 dans les trois mois précédents).

Les trois membres d'équipage avaient suivi le programme ECP 2014-2015 de manière satisfaisante.

2.6 Renseignements sur les conditions météorologiques

Les prévisions valables pour 12 h 00 indiquaient que le sud de la Grèce était sous une couche de cumulus et stratocumulus morcelée à couverte avec une base comprise entre le FL15 et FL40 et un sommet compris entre les FL70 et 110, associée localement à des averses et avec des possibles cumulonimbus isolés.

Le METAR d'Athènes de 13 h 50 était le suivant :

LGAV 261350Z 18005KT 140V210 9999 SCT030 BKN070 15/08 Q1013 NOSIG QNH1013.6=

Ces conditions ont été indiquées à l'équipage à 13 h 59 par le contrôleur aérien ainsi que les conditions météorologiques à Héraklion : vent 360° 3 kt, visibilité 10 km, nuages rares à 2000 ft, morcelés à 8000 ft, température 17 °C, QNH 1014.

2.7 Recherche d'événements similaires

Airbus a indiqué avoir trouvé dans sa base de données d'incidents (de 1999 à 2015) un évènement de triple perte IRS.

En mars 2002, après le décollage, l'équipage d'un A320 constate un saut de la position FM suivi d'une réinitialisation automatique du FMS côté OPL. Peu après les trois IRS deviennent indisponibles avec les mêmes conséquences que celles de l'incident du F-GRSQ (perte des informations de positions FMS, perte du plan de vol, passage en loi directe). Le PFR et la mémoire interne des IRS indiquent un alignement en vol pour les 3 IRS. L'équipage a indiqué avoir tenté un ré-alignement en vol. Les informations obtenues par Airbus à l'époque ne permettaient pas de détailler davantage les actions de l'équipage.

2.8 Articles illustrant des actions restituées de manière automatique

⁽³⁸⁾Aviation Safety Reporting System.

⁽³⁹⁾https://asrs.arc.nasa.gov/publications/callback_cb_434.html

Le document de l'ASRS⁽³⁸⁾ « CALLBACK Issue 434 » de mars 2016 intitulé « *Managing Muscle Memory* » illustre que la restitution de séquences habituelles d'actions hors de leur contexte peut parfois survenir lorsqu'une particularité de la situation amène un lien (approprié ou non) vers le début de la séquence⁽³⁹⁾, telles que des extinctions moteurs inopportunnes au sol. Il résume également comment des actions répétées deviennent automatiques : « *The more often we perform a given physical action, the more likely we are to do it as needed, when needed without having to think about the specific combination of movements involved. These habits become an unconscious process that occurs when triggered by a given circumstance or set of cues* ».

(40) Régulation des activités cognitives et gestion du risque par l'opérateur humain, Hoc et Rogalski, Contribution P.Dubois & G. De Terssac (Eds.) Les nouvelles rationalisations de la production. CEPADUES Janvier 1992.

De plus, « *Dans la majorité des cas, les opérateurs de conduite de processus industriels, de véhicules ou d'avion, sont formés à adopter des automatismes dans des situations d'urgence temporelle, où toute activité basée sur des règles et a fortiori sur des connaissances déclaratives seraient condamnées à l'échec. Mais un tel apprentissage est aussi réalisé de façon incidente : les réponses aux situations les plus fréquemment rencontrées s'automatisent et, par-là, se rigidifient. Ce mécanisme est particulièrement économique, puisqu'il conduit à adopter des procédures peu coûteuses (en particulier en ressources attentionnelles) le plus fréquemment. Mais le prix à payer peut être important lorsqu'une situation nouvelle et dangereuse présente des similarités perceptives avec une situation. C'est l'automatisme (inadapté) qui risquera fort de l'emporter. [...] L'économie cognitive conduit d'abord à assimiler une situation nouvelle à une situation connue, dans la mesure du possible, et à appliquer dans un premier temps, des routines (automatismes) ou des règles, avant de se lancer dans de fastidieux mécanismes interprétatifs du niveau basé sur les connaissances déclaratives* ». (40)

3 - ENSEIGNEMENTS ET CONCLUSION

3.1 Scénario

3.1.1 L'IRS 3 passe du mode NAV au mode ATT à 10 h 34

Deux hypothèses peuvent expliquer ce changement de mode :

- 1 - Un changement de mode non commandé.

Les examens techniques fonctionnels et visuels sur l'ADIRU n'ont pas permis de consolider cette hypothèse. XL Airways France n'a pas signalé de nouvel incident similaire sur le F-GRSQ ce qui tend à exclure une défaillance de la connectique entre les commandes et le boîtier de l'ADIRU comme étant à l'origine de ce changement de mode. Air France Industries n'a pas signalé d'anomalie similaire sur le boîtier ADIRU depuis sa remise en service. On serait alors dans le cas d'une anomalie ponctuelle et non reproductible.

- 2 - Une action d'un membre d'équipage sur le sélecteur de mode de NAV à ATT.

Cela serait compatible avec les données enregistrées rassemblées. Ainsi, l'équipage, préoccupé par le suivi de la dérive de l'IRS 2, aurait souhaité passer l'IRS 2 sur le mode ATT mais aurait actionné le sélecteur de l'IRS 3 par erreur (cf. § 3.2.2.2). Il faut ici noter que l'interface ne rappelle pas visuellement le caractère irréversible de cette action (cf. § 2.1.2). Ne constatant pas de résultat satisfaisant à cette action, l'équipage aurait replacé le sélecteur sur NAV, position observée par l'OPL à son retour dans le poste vers 13 h 00. Toutefois, cette séquence n'est pas cohérente avec les témoignages recueillis qui indiquent qu'aucune action sur les rotacteurs n'a été réalisée pendant cette phase. De plus, elle ne s'inscrit pas dans une procédure prévue.

Ainsi, l'enquête n'a pas permis d'établir l'origine de ce changement de mode. Toutefois, l'absence de signalement d'une nouvelle anomalie sur les équipements concernés, toujours en service depuis l'évènement, confère à la seconde hypothèse une probabilité plus élevée.

3.1.2 Déconnexion de l'AP et de l'A/THR et perte des informations de position à 13 h 36

La déconnexion des automatismes est la conséquence de la dérive de l'IRS 2 par rapport à l'IRS 1 détectée par la partie FG du FMGEC, l'IRS 3 étant déjà rejetée définitivement. Une logique propre au standard FMS installé dans cet aéronef, modifiée dans les nouveaux standards, entraîne également la perte des positions FM (cf. § 2.1.3 et § 2.1.4). La dégradation de la situation à 13 h 36 n'est donc pas liée à des actions de l'équipage effectuées à cette période. À partir de cet instant, le copilote, PF, assure le pilotage de l'avion tandis que le CdB, PM, est préoccupé par le besoin de retrouver des informations de positions et de navigation.

Les messages ECAM présentés à l'équipage ne lui demandaient aucune action à effectuer sur les systèmes de l'avion. Ils ne lui ont pas permis de prendre conscience ni de l'origine de cette déconnexion automatique ni de celle de la perte des positions (cf. § 2.2). L'équipage n'a eu accès qu'aux conséquences du problème mais pas à sa cause, qui était pourtant connue des systèmes. Il a ainsi pu se sentir en dehors d'une situation de panne répertoriée et être amené à effectuer des actions sans le support d'une procédure. Il a par exemple pris l'initiative de recourir au mode BACK-UP NAV.

Ce mode, bien que non prévu pour cette situation, a permis à l'équipage de récupérer des informations de position et de navigation. Il faut ici noter que ce mode avait été révisé pendant les ECP de la saison 2014-2015. Il est probable que ce rafraîchissement ait facilité le recours à cette solution. La sortie du BACK-UP NAV mode réalisée par le CdB dans l'objectif de consulter des informations sur les IRS s'apparente à une recherche de panne pour trouver une explication technique à la situation. Elle a conduit à nouveau à la perte des informations de position de son côté. L'OPL, lui, a gardé ces informations jusqu'à l'alignement en vol des trois IRS quelques minutes plus tard. La perte de position est un évènement rare qui semble avoir été un facteur de déstabilisation important de l'équipage.

Le témoignage du CdB précise qu'il ne lui était plus possible de revenir dans le BACK-UP NAV mode. Cela peut s'expliquer si le CdB a tenté d'activer à nouveau ce mode après l'alignement en vol de l'IRS 1⁽⁴¹⁾.

⁽⁴¹⁾Le mode BACK-UP NAV côté CdB n'est pas disponible dans ce cas.

3.1.3 Alignement en vol des trois IRS à 13 h 44

L'enquête n'a pas mis en évidence de défaillance technique expliquant le triple alignement simultané en vol. L'absence d'enregistrement CVR et les témoignages des deux membres d'équipage en poste ne permettent pas d'identifier d'éventuelles actions faites à ce moment sur les trois sélecteurs de mode des IRS. Néanmoins, ce triple alignement simultané est probablement la conséquence d'actions de l'équipage alors que le CdB était dans la démarche précédemment évoquée de recherche d'information sur la position de l'avion. Cette hypothèse est compatible avec le témoignage de l'OPG qui, de retour en poste un peu plus tard, a constaté que les trois sélecteurs, dont celui de l'IRS 3, étaient sur NAV. Selon le CdB et l'OPL, ce sélecteur avait été précédemment basculé sur ATT avant la déconnexion des automatismes, pour appliquer la procédure IR ALIGNMENT IN ATT MODE. Le sélecteur aurait donc été manipulé, en passant par la position OFF, puis remis sur NAV au final, avant le retour en poste de l'OPG. D'autres actions similaires auraient pu être faites sur les trois sélecteurs à ce moment, provoquant le triple alignement.

Dans cette hypothèse, ces actions auraient un caractère improvisé et ne correspondraient pas à l'application d'une procédure attendue ni au traitement structuré d'une anomalie. Elles pourraient s'expliquer par une connaissance fragile des systèmes et/ou par le stress engendré par une dégradation majeure et d'origine inconnue. Il faut ici remarquer que ces trois alignements improvisés ont probablement été réalisés en séquence rapide. Réalisés en séquence lente, ils auraient en effet conduit à une dégradation progressive avec des effets visibles pour l'équipage, en particulier le passage par une loi de commande de vol « alternate » avec un message ECAM et une alarme sonore, qui ne ressort pas dans les différentes données techniques. Observée par un équipage contrôlant le résultat de ses actions, cette dégradation aurait probablement conduit celui-ci à les interrompre. Cette séquence indiquerait plutôt une action rapide, symptomatique d'un état de stress important et peut-être une restitution des actions de la procédure d'alignement au sol, déclenchée par un comportement automatique inadapté (cf. § 2.8).

En effet :

- l'alignement des trois IRS est une tâche effectuée fréquemment au sol par les équipages et le séquencement des actions a par conséquent toutes les chances d'être automatisé ;
- la perte de positionnement sur le ND a pu provoquer un lien vers les systèmes élaborant la position, à savoir les IRS.

3.1.4 Déroutement

L'équipage pilote dorénavant en loi directe avec les instruments de secours. Les équipements de radio navigation restent disponibles.

L'abandon de l'analyse technique au profit de la gestion de la trajectoire et du déroutement, indiqué par l'équipage, a permis d'assurer un déroutement en sécurité en s'appuyant sur le contrôle aérien grec. On note toutefois une action réalisée deux minutes après l'alignement en vol qui s'apparente à une recherche de panne (rotateur « AIR DATA » positionné sur « CAPT ON 3 »). Pendant la descente, probablement une fois le déroutement décidé et mis en œuvre, l'équipage est revenu vers les questions techniques en tentant au moins une séquence NAV-OFF-NAV sur le sélecteur de l'IRS 1. Cette action a été entreprise sans faire référence ni à une procédure prévue ni à l'ECAM (cf. § 3.2.3).

L'OPL a indiqué que les informations de positions GPS étaient indisponibles. L'absence de position GPS a pu augmenter l'incompréhension de l'équipage dans son analyse technique. Celui-ci pouvait en effet légitimement s'attendre à ce que les informations GPS ne dépendent pas de la disponibilité des IRS. L'enquête a montré que les données GPS pures transitent sur les bus IRS vers les FMGEC. Par conception, chaque FMGEC se base sur la validité de la position hybride GPIRS reçue pour invalider toutes les données GPS transmises sur le bus (cf. § 2.1.6). Les données GPS sont donc devenues invalides lors du triple alignement en vol. Toutefois, les informations GPS pures auraient été retrouvées si le mode ATT d'une des IRS avait été sélectionné, comme le prévoyaient les procédures associées aux messages ECAM.

Il faut noter ici que le pilotage en loi directe avec les instruments de secours a fonctionné, bien que l'exposition des équipages à cette situation soit rare. Les conditions météorologiques étaient clémentes ce qui a évité à l'équipage la difficulté supplémentaire d'une approche aux instruments dans des conditions techniques dégradées.

3.2 Réflexions de sécurité

3.2.1 Préservation du CVR

L'absence de données CVR n'a pas permis de compléter les témoignages. Le CVR aurait pu permettre en particulier de préciser les actions entreprises à 13 h 44 lors du triple alignement des IRS. En revanche, il n'aurait pas permis d'éclaircir le premier changement de mode qui s'est produit environ quatre heures avant l'atterrissement de l'avion, durée supérieure à la durée réglementaire d'enregistrement du CVR. Le BEA a déjà recommandé que les durées d'enregistrement des CVR soient augmentées afin de permettre l'analyse des incidents survenant lors d'un vol long-courrier (recommandation FRAN-2012-025). Cette évolution a été prise en compte par l'OACI (Annexe 6) et l'Union Européenne qui impose une durée de 25 heures d'enregistrement pour les avions de plus de 27t et produits après le 1^{er} janvier 2021⁽⁴²⁾.

⁽⁴²⁾Règlement (UE) N°2015/2338 de la Commission du 11 décembre 2015 modifiant le règlement (UE) N° 965/2012 en ce qui concerne les exigences applicables aux enregistreurs de vol, aux dispositifs de repérage dans l'eau et aux systèmes de suivi des aéronefs.

3.2.2 Réflexion sur les actions manuelles sur les sélecteurs de mode

3.2.2.1 Actions irréversibles

Le caractère irréversible des actions sur les sélecteurs de mode des IRS n'est pas visuellement rappelé sur le boîtier de commande. Le rotateur doit cependant être tiré avant d'être tourné, ce qui évite une manipulation involontaire et peut constituer un ultime rappel sur la nature irréversible de l'action en passe d'être effectuée. De manière analogue, les sélecteurs des moteurs doivent être soulevés avant d'être basculés vers l'arrière. D'autres commandes du poste de pilotage sont « *gardées* » pour rappeler cette caractéristique avant même que la main de l'opérateur ne touche la commande. Les réinitialisations de calculateurs (via des disjoncteurs ou des boutons pousoirs non gardés) ne sont pas « *protégées* » contre une manipulation individuelle sans confirmation.

Airbus a indiqué que ces différences correspondaient à la nécessité de graduer le caractère irréversible d'une commande selon la gravité des conséquences de son action et ceci afin de ne pas généraliser des commandes « *gardées* » au risque d'affaiblir l'efficacité de cette barrière. Quelle que soit l'ergonomie de ces commandes, les procédures enseignées aux équipages prévoient que ces actions irréversibles exigent au préalable une confirmation des deux membres d'équipage (cf § 2.4.1).

Pour les commandes les moins « *protégées* », le fait de faire confirmer l'action par les deux pilotes repose exclusivement sur la mémoire de l'équipage. Le caractère sensible de ces commandes et interrupteurs est enseigné pendant la formation et rappelé pendant les sessions de simulateurs à travers le traitement de la panne nécessitant la confirmation PF/PM et semble connu des pilotes.

Cependant, le stress engendré par une panne réelle, l'exposition peu fréquente à certaines manipulations en entraînement ou d'autres facteurs réduisant les performances cognitives d'un individu peuvent vraisemblablement altérer l'efficacité d'un appel aux règles ou connaissances stockées en mémoire. L'entraînement aux pannes d'IRS en vol est rare et expose peu les équipages à la réalisation de cette confirmation croisée pour ces rotatateurs. Il est ainsi possible que cette exigence de confirmation n'ait pas apporté la protection attendue lors du triple alignement vers 13 h 44.

L'enquête n'a pas permis de confirmer si l'ergonomie des sélecteurs, leur usage et la formation associée ont effectivement joué un rôle dans l'évènement.

3.2.2.2 Agencement 1-3-2 des sélecteurs de mode IRS

L'agencement des sélecteurs reflète la répartition gauche, secours, droite des IRS. Les numéros des IRS sont clairement indiqués sur le boîtier et cet agencement est rappelé en formation. Il est cependant différent de l'ordre numérique 1,2,3.

La présentation du statut des IRS sur la page POSITION MONITOR du MCDU est faite selon l'ordre numérique 1,2,3, et donc différent de l'ordre retenu pour les sélecteurs.



Figure 7 : comparaison des ordres de numérotation des IRS

L'équipage a consulté régulièrement la page POSITION MONITOR pendant le vol pour surveiller la dérive de l'IRS 2. Il s'est donc concentré sur la lecture de la valeur de dérive située au centre et a pu associer l'IRS 2 à cette position centrale. Ainsi lors de la manipulation du sélecteur, il est possible qu'il ait actionné le sélecteur de mode central (IRS 3) au lieu de celui situé à droite (IRS 2), en court-circuitant l'étape de lecture du numéro de l'IR et de vérification croisée qui sont les contre-mesures à cette erreur.

Là encore, l'enquête n'a pas permis de savoir si cet ensemble de caractéristiques ergonomiques et de formation a effectivement joué un rôle dans l'évènement.

3.2.3 Actions improvisées

Il ressort des données enregistrées et du témoignage de l'équipage que ce dernier a eu du mal à rester dans les pratiques opérationnelles classiques de gestion de la dérive d'une IRS (selon l'hypothèse probable de l'IRS 3 commandée sur ATT en réponse à une dérive de l'IRS 2) puis de traitement des pannes basé sur les messages ECAM. À 13 h 36, la déconnexion des automatismes et la perte des positions sans explication technique donnée a vraisemblablement suscité une incompréhension et une recherche de ces explications. L'équipage devait également assurer les aspects urgents de pilotage. Selon les messages ECAM, aucune action technique n'était requise : l'équipage aurait dû revoir la page ECAM STATUS puis décider des suites opérationnelles. Cette absence d'explication technique et de guidage dans la recherche de panne, alors que les conséquences pour le vol sont importantes, est probablement difficile à accepter pour un équipage. Elle peut laisser l'impression qu'une panne non prévue est survenue, l'incitant à penser que le cadre de traitement habituel n'est plus totalement adapté et ouvrant ainsi la possibilité de chercher des solutions non classiques.

De ce point de vue, cette situation fait écho à une recommandation déjà émise par BEA portant sur l'information reçue par l'équipage lors du déclenchement d'une surveillance⁽⁴³⁾. Cependant, le triple alignement probablement commandé par l'équipage indique que celui-ci suspectait les IRS d'être à l'origine de la dégradation. Une information sur la raison de la dégradation technique aurait peut-être pu rassurer l'équipage en lui indiquant qu'il était dans un cas de panne prévu et l'encourager à se conformer au schéma de traitement des pannes attendu.

La sortie du schéma classique de traitement de pannes semble avoir perduré pendant le déroutement. Le CdB a en effet demandé à l'OPG, sans suivre de procédure, de manœuvrer un rotateur pour tenter de récupérer des informations. Le traitement des messages de type ECAM NAV IR [x+(y)] FAULT aurait conduit l'équipage à vérifier la disponibilité du mode ATT et ainsi les conduire à récupérer les informations d'attitude, une loi de commande « *alternate* », et des informations de navigation GPS au MCDU. Ce mode était bien disponible comme l'indiquaient les trois témoins IR Fault qui clignotaient (*cf. § 2.1.2*) et la procédure papier avait été consultée plus tôt. Les ressources allouées au pilotage, au calcul des performances et aux communications avec le contrôleur étaient importantes et laissaient probablement peu d'opportunité de revenir au traitement des aspects systèmes dans la première partie du déroutement. Au fur et à mesure que l'issue favorable du vol se dessinait, la reprise de ces aspects était probablement envisageable. Il est possible que l'équipage, probablement fatigué par la gestion de l'incident et ayant admis son incompréhension, ait renoncé à risquer une dégradation supplémentaire dans les dernières minutes du vol et se soit concentré sur la conduite de l'approche.

⁽⁴³⁾Le BEA avait recommandé (FRAN-2012-049) à l'AESA, « [qu'elle] étudie la pertinence qu'un avertissement spécifique soit fourni aux équipages lorsque des surveillances se déclenchent, afin de faciliter la compréhension de la situation ». Dans les échanges ultérieurs avec l'AESA sur la prise en compte de cette recommandation, le BEA avait insisté sur le fait qu'elle ne visait pas uniquement la surveillance des vitesses en jeu dans l'accident du vol AF447.

3.3 Causes

Note : En l'absence de CVR, et compte-tenu des écarts entre les données techniques recueillies et certains aspects des témoignages de l'équipage, l'enquête ne peut conclure qu'à des facteurs probables ou seulement possibles pour expliquer la séquence suivante.

L'incident est constitué par l'indisponibilité des trois IRS conduisant à une dégradation des lois de commandes de vol et à la dégradation des capacités de navigation autonome de l'avion. Cette indisponibilité est survenue en quatre étapes principales :

- à 10 h 34, le passage de l'IRS 3 du mode NAV au mode ATT, résultant probablement d'une action manuelle par un membre d'équipage ;
- à 13 h 36 :
 - la déconnexion de l'AP et de l'A/THR, probablement consécutive à un écart de navigation entre l'IRS 2, qui dérivait depuis le décollage, et l'IRS 1,
 - la perte des informations de position et de navigation sur les ND, conséquence de l'évènement précédent selon la logique propre aux standards FMS Honeywell P3 et inférieurs. Ces informations ont été retrouvées deux minutes plus tard lorsque l'équipage a activé le mode BACK-UP NAV.
- peu avant 13 h 44, la perte des informations de position côté gauche suite à la sortie du mode BACK-UP NAV côté gauche (CdB) ;
- à 13 h 44, les alignements en vol des trois IRS, probablement consécutifs à des actions improvisées et éventuellement non concertées de l'équipage lors de tentatives de récupération d'une information de position sur le ND du CdB.

La perte des positions a constitué une préoccupation importante pour l'équipage. Les nouveaux standards FMS auraient permis d'éviter cette perte d'information. Une meilleure robustesse dans le maintien des capacités de navigation autonome présente un intérêt pour le survol des océans ou des zones désertiques, ou à proximité de zones de conflits⁽⁴⁴⁾.

⁽⁴⁴⁾Citons par exemple le vol de Korean Airlines 007 abattu le 31 aout 1983 alors qu'il s'était écarté de la route prévue, vers le territoire de l'URSS.

Le problème de dérive d'une IRS, préalablement identifié, n'a pas été résolu en raison de l'étiquetage erroné des châssis. Toutefois la dérive d'une seule IRS en vol n'est pas une situation anormale majeure.

Les facteurs suivants ont été considérés pour tenter de comprendre les raisons des probables actions non standards de l'équipage sur les rotatateurs des IRS, sans qu'il soit possible de préciser leur degré de contribution :

- une ergonomie du panneau de commande des ADIRU ne rappelant pas visuellement le caractère irréversible des changements de modes IRS ;
- la présentation des informations des IRS sur la page POSITION MONITOR du MCDU dans l'ordre numérique (1,2,3) différent de l'agencement des rotatateurs (1,3,2), lequel est représentatif de l'architecture de l'avion ;
- une logique de présentation des informations de l'ECAM à l'équipage ne lui permettant pas de comprendre la raison de la déconnexion de l'AP et la perte des positions survenues à 13 h 36 ;
- une faible exposition des équipages aux situations de panne d'IRS.

Enfin, on ne peut pas exclure l'influence d'autres facteurs liés à l'équipage (fatigue ou connaissances individuelles par exemple) ou à l'environnement du vol que l'enquête n'aurait pas permis d'identifier.

À la suite de l'incident, Airbus a entrepris une revue de la documentation pour intégrer la généralisation de l'utilisation du mode BACK-UP NAV à tous les cas entraînant la perte des positions sur les ND, le cas le plus probable identifié restant la double perte des FMS.