



MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS

*Liberté
Égalité
Fraternité*



ANALYSE DES INCOHÉRENCES DE QNH EN APPROCHE

CONSÉQUENCE SUR L'INTÉGRITÉ DES SYSTEMES DE
NAVIGATION AVEC GUIDAGE VERTICAL BAROMÉTRIQUE

Données 2019 - 2024

Direction de la sécurité de l'Aviation civile
Mission Evaluation et Amélioration de la Sécurité

Table des matières

Introduction	4
1) Données contenues dans les notifications.....	4
2) Données et méthodologie de l'étude menée par la DSNA	5
3) Résultats de l'étude	6
4) Enseignements tirés de l'étude.....	8
5) Mesures d'atténuation supplémentaires mise en place par la DSNA	9
Conclusion	9
RÉFÉRENCES	10
Annexe	11

Introduction

Après les incidents graves survenus à Nantes (octobre 2021)¹ et à CDG (mai 2022)² au cours desquels des erreurs d'affichage de calages altimétriques ont amené les avions à des hauteurs très inférieures aux minima requis, la DSAC avait piloté un groupe de travail au sein du Réseau Sécurité Aérienne France (RSAF), dont les enseignements principaux sont décrits dans le [rapport sécurité 2022](#).

En outre un certain nombre d'actions a été lancé, tant côté DSAC³ que DSNA ou EASA, et des pistes restant à explorer ont été identifiées.

Peuvent être citées :

- Une analyse des comptes-rendus d'événements de sécurité (cf ci-après)
- La publication d'une info sécurité
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Info_securite_2023_02_Risques_lies_aux_erreurs_de_calage_altimetrique.pdf
- Une publication dans le rapport sécurité 2022
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/rapport_securite_aerienne_2022.pdf
développée p 44 et suivantes
- Une contribution au SIB EASA <https://ad.easa.europa.eu/ad/2023-03>
- Une incitation aux exploitants avion à mesurer ces écarts par utilisation de l'analyse des vols
- Côté DSNA, une consigne aux contrôleurs pour rappeler le QNH au premier contact avec le contrôle d'aérodrome (voir détail ci-après)
- Une publication pédagogique sur le TCAS et le MSAW
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Note_TAWS-MSAW.pdf
- La décision de consacrer le symposium DSAC 2025 en partie à ce sujet
- Des contributions à une réflexion lancée au sein de l'EASA sur le PBN-IR.

La présente étude cherche à quantifier la fréquence des erreurs de calage altimétrique en approche en utilisant l'information bord descendue par les trames mode S et les informations de QNH fournies aux contrôleurs.

1) Données contenues dans les notifications

L'analyse des comptes-rendus événements de sécurité décrite dans la section 1.18.1.2 du rapport BEA avait révélé que des erreurs de calage altimétrique des aéronefs en approche étaient régulièrement notifiées. Cette analyse a permis d'identifier quelques 150 cas en quelques années. Ces cas présentent plusieurs caractéristiques notables : la plupart des erreurs ont été détectées une fois au sol puis notifiées, essentiellement à l'issue

¹ https://bea.aero/fileadmin/user_upload/F-HMLD.pdf

² https://bea.aero/fileadmin/uploads/9HEMU-VF/9H-EMU_FR.pdf

³ DSAC : Direction de la Sécurité de l'aviation civile, autorité compétente en France

DSNA : Direction des Services de la navigation aérienne, fournisseur de services de navigation aérienne en France

d'approches ILS, donc sans conséquence sur la trajectoire⁴. Les deux facteurs les plus fréquemment rencontrés (mais pas exclusivement) sont un oubli de changer du 1013 vers le QNH local et une erreur de représentation avec des pics d'erreurs à +10 et -10 hPa notamment. Le décompte de ces erreurs ou omissions ne reposait jusqu'à là que sur la notification au titre du règlement (UE) 376/2014. Ce point avait été développé en Partie 5 du rapport sécurité 2022⁵.

2) Données et méthodologie de l'étude menée par la DSNA

Pour mesurer la fréquence objective de ces écarts, une analyse exhaustive de toutes les données disponibles a été entreprise par la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA), en utilisant les données transmises par les aéronefs (et enregistrées) par mode S, notamment le paramètre « QNH sélectionné », et en le comparant au QNH sol disponible sur les positions de contrôle.

Après validation de la faisabilité technique d'identification d'un écart entre QNH bord et QNH sol, notamment en comparant l'écart mesuré avec l'écart obtenu par d'autres moyens (comparaison avec un échantillon de comptes rendus d'événements de sécurité notifiés par la DSNA et les opérateurs à la DSAC), l'étude s'est attachée à quantifier la fréquence de survenue des cas d'approches faisant état d'incohérences entre le réglage barométrique bord et le QNH « sol ».

L'étude a permis de collecter des données adéquates au regard de ses objectifs pour six grands aéroports français (Paris CDG, Paris Orly, Paris Le Bourget, Nice, Marseille et Toulouse) sur une période couvrant 5 années de 2019 à 2023.

Le réglage barométrique avion est mesuré à partir des paramètres avion descendants transmis par les transpondeurs mode S des aéronefs, détectés et recueillis (lorsqu'enregistrés) par les radars secondaires des services de la navigation aérienne. Il s'agit a priori du réglage barométrique affiché par un équipage dans le cadre du pilotage de la trajectoire de son aéronef.

Le QNH « sol » est issu des données des systèmes ATC et correspond à l'information de QNH telle que présentée sur les afficheurs dédiés des positions de contrôle.

Au total, sur le périmètre des 6 aéroports et sur la période des 5 ans pour lesquels les données adéquates sont disponibles, les mesures s'avèrent exploitables pour 1 694 266 atterrissages. Il faut toutefois noter que l'étude ne permet pas de connaître de manière directe à quels types d'approches correspondent les cas recensés (ILS ou RNP 2D ou 3D) ni quels minima (LNAV, LNAV/VNAV ou LPV) ont été appliqués, mais cette incertitude ne nuit pas à la capacité à mesurer l'objet de l'étude.

Pour chaque trajectoire d'approche recensée, l'écart entre le réglage bord, et le QNH « sol » est mesuré, en particulier au moment où l'aéronef survole le seuil de la piste d'atterrissage.

⁴ Ces erreurs ont eu des conséquences sur l'altitude de décision et auraient pu avoir des conséquences en cas de remise de gaz, sans effet sur la sécurité en raison de conditions météorologiques favorables

⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/rapport_securite_aerienne_2022.pdf

3) Résultats de l'étude

L'étude menée par la DSNA sur une vaste base d'observations permet d'estimer que la probabilité moyenne d'incohérence notable (supérieure ou égal à 2 hPa) sur le QNH affiché à bord au moment de l'atterrissage est de l'ordre de 10^{-3} par approche, et que la probabilité de survenue d'incohérence très significative (supérieure ou égal à 10 hPa) est de l'ordre de 10^{-4} par approche.

L'étude met en évidence que sur 7328 incohérences détectées au voisinage de l'altitude de transition, env. 31% de ces incohérences restent observés jusqu'à des hauteurs de 1000 ft, voire jusqu'au posé, (resp. 2312 puis 2269 cas).

Plus précisément, ces 2269 incohérences détectées au seuil de piste supérieures ou égales à 2hPa contiennent 387 incohérences supérieures ou égales à 10 hPa. La valeur singulière de 10 hPa se retrouve dans 202 cas.

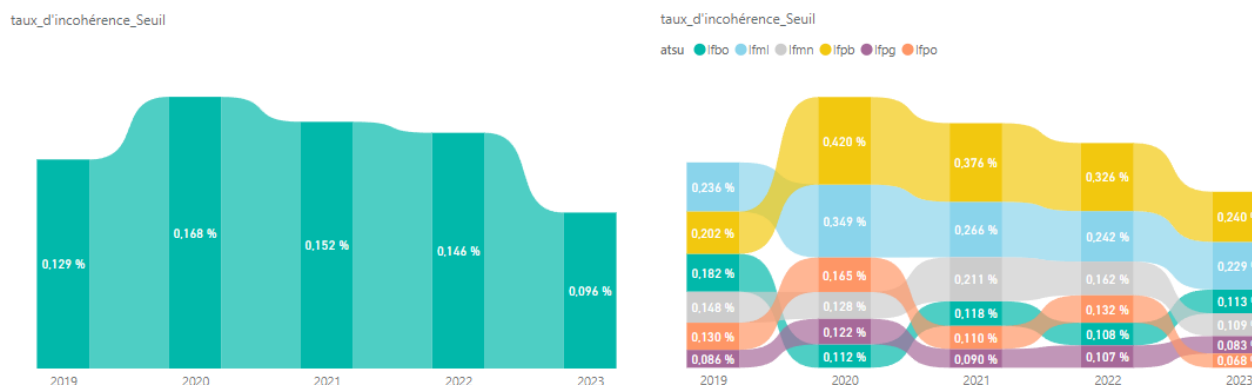


Figure 1. Taux d'incohérence sol-bord barométrique supérieur à 2 hPa.
A gauche, taux global par année, à droite taux global par année et par aéroport.

Au-delà de ce résultat général, des disparités entre les taux d'incohérence par plateformes apparaissent. On observe ainsi un facteur 3 entre Paris Le Bourget et Paris CDG, pourtant très proches géographiquement, mais fréquentés par des flottes très différentes⁶. Ces différences pourraient être analysées plus en détail pour en comprendre l'origine, mais le niveau d'incohérence restant statistiquement élevé, il est important de noter que l'incident le plus grave connu à ce jour est survenu à l'approche de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle quand bien même il s'agit de l'aéroport pour lequel la fréquence d'incohérence relevée est la plus faible parmi les 6 aéroports de l'étude.

L'étude a également analysé la distribution statistique des incohérences et permis de quantifier l'occurrence de deux types d'erreurs les plus fréquentes.

- L'absence du passage du calage standard 1013,25 hPa vers le QNH lors de l'approche :
La figure 2 montre que près de 27% des incohérences relevées correspondent à des cas où le réglage bord est à 1013,25. Parmi ces cas, dans 85% des cas, il n'y a eu aucun changement du BPS (Barometric Pressure Setting) lors de l'approche. Ces derniers cas (environ donc un quart des cas d'incohérences) résultent a priori d'un oubli de changement du calage altimétrique au passage du niveau de transition.

L'effet de ces erreurs « oubli 1013 » sur le décalage vertical de la trajectoire est aléatoire : il dépend de la valeur de pression atmosphérique locale vis-à-vis du calage standard.

- L'erreur de 10 hPa :

La figure 3 montre la distribution des valeurs d'incohérences. On y trouve de manière notable que : Un pic net apparaît pour les valeurs de +/- 10 hPa d'incohérence, ce pic représentant à lui seul environ 10% des valeurs d'incohérences.

Le cumul des incohérences d'au moins +/- 10 hPa représente quasiment le quart des cas recensés. Ces cas correspondant à des situations fortement accidentogènes où une incohérence d'au moins 10 hPa se traduit par une erreur dans le plan vertical de 280 ft ou plus – cas de l'incident grave ayant conduit à la présente étude.

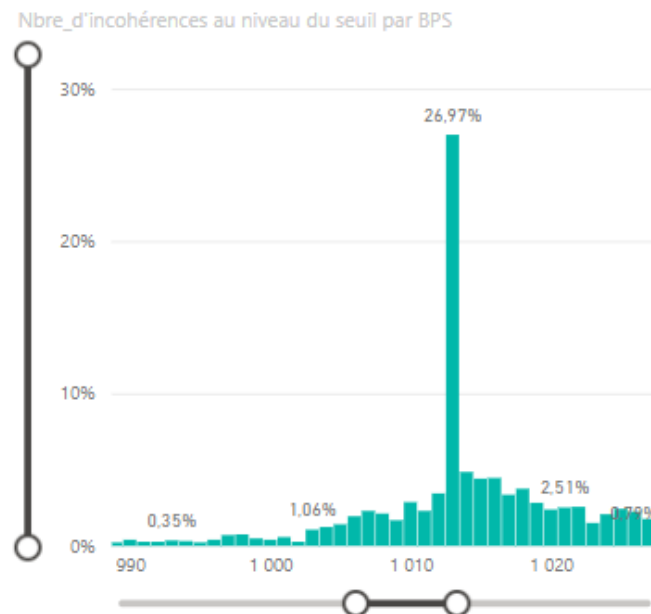


Figure 2. Part des incohérences en fonction de la valeur du BPS bord. Près de 27% des incohérences relevées dans l'étude résultent d'un oubli de changement du calage altimétrique du calage standard vers le QNH lors de l'approche

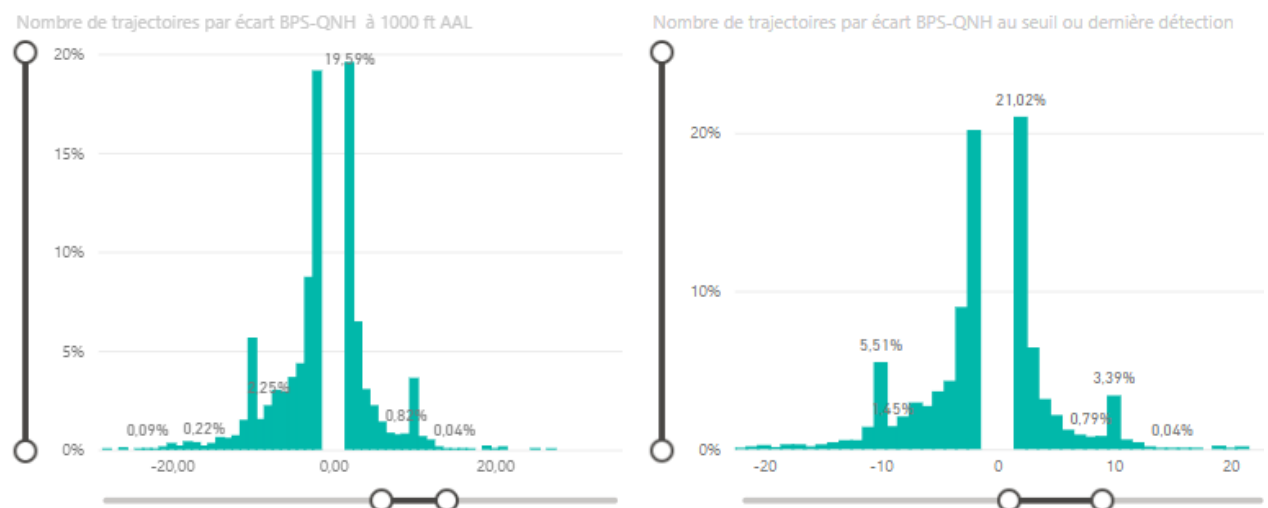


Figure 3. Répartition des incohérences BPS bord – QNH sol en fonction de la valeur de cette dernière, à 1000 ft AGL et au seuil de piste resp.

Environ 17 % des incohérences comportent une erreur de 10 hPa ou plus

⁶ Le taux d'incohérences entre le BPS bord et le QNH sol au moment du survol du seuil d'atterrissage est de 1×10^{-3} pour les approches à Paris CDG et 3×10^{-3} pour celles à Paris Le Bourget.

Enfin l'étude s'est intéressée à mettre en évidence l'effet mesuré sur les trajectoires des incohérences recensées. Ainsi, pour quelques cas répertoriés, le rejeu des trajectoires radar a permis de confirmer que les incohérences relevées se sont traduites par des décalages des trajectoires dans le plan vertical.

Dans certains cas, l'ensemble de la trajectoire d'approche finale est décalé au-dessus ou en dessous de la pente théorique, avec un retour au plan nominal uniquement en phase de « courte » finale. Dans ces cas, il est probable que les aéronefs suivaient des procédures d'approche reposant sur un guidage barométrique. Dans d'autres, c'est le palier d'approche intermédiaire (interception du plan avant la finale) qui est translaté au-dessus ou au-dessous de l'altitude prévue, avant que la trajectoire ne suive le plan de descente finale théorique. Dans ces cas, il est déduit que les aéronefs suivent des procédures avec guidage vertical géométrique (ILS ou LPV).

4) Enseignements tirés de l'étude.

Cette étude permet de confirmer que les incohérences de QNH se produisent aussi bien sur les approches ILS que sur les approches RNP, mais pour les approches ILS l'impact sécurité⁷ pour la conduite de l'approche est très atténué par le suivi d'un plan géométrique. Seuls les minima opérationnels gouvernés par le baroaltimètre sont réellement affectés, et en ILS il existe également des procédures opérationnelles comme la comparaison altitude distance à 1000 ft sol qui permettent de détecter des erreurs barométriques au moment du début de la descente finale.

A contrario, pour une approche RNP guidée par référence barométrique, toute erreur de référence altimétrique se traduit par une erreur géométrique systématique de plan de descente réellement suivi. Qui plus est, aucun point de confirmation du suivi du bon plan de descente n'est possible contrairement aux procédures ILS.

Ces ordres de grandeur permettent de confirmer expérimentalement des études en laboratoire qui avaient déjà estimé [Ref. 3] le taux d'erreur lié à la mémorisation puis restitution par les équipages de messages délivrés par les contrôleurs.

Ces données montrent un déficit d'intégrité d'un facteur 1,000 (10^3) à 10,000 (10^4) vis-à-vis de ce que l'OACI considère comme valeur d'intégrité nominale ($2 \cdot 10^{-7}$ /approche) pour respecter l'objectif de sécurité (TLS, pour « target level of safety ») des approches, ce qui représente un différentiel très important. Ceci veut dire concrètement que si la technologie BaroVNAV était utilisée systématiquement, les autres hypothèses pour le guidage géométrique restant identiques (ratio incident/accident, réduction de risque par les actions de l'équipage, etc...) l'objectif de sécurité des approches pourrait être réduit d'un facteur 1000 à 10 000, en raison de la relation directe entre l'intégrité du système de navigation et du TLS, explicité sur la Table 1 de l'annexe.

Enfin, il est à noter que le risque d'accident sera croissant avec l'augmentation de l'usage des approches RNP (essentiellement basées sur un guidage barométrique, du fait des équipements des flottes d'aéronefs) en lieu et place des approches ILS en conséquence de la stratégie PBN européenne actuelle.

⁷ Seul l'impact sécurité au regard à la marge verticale de franchissement d'obstacles est considéré, les déviations en cas de remise de gaz ou les pertes de séparation verticale avec les autres aéronefs ne sont pas prises en compte dans l'appréciation du risque.

5) Mesures d'atténuation supplémentaires mise en place par la DSNA

A la suite du quasi-CFIT d'AirHub à CDG, le 11 juillet 2022, la direction des opérations a pris une mesure conservatoire demandant, lors d'approches RNP entre autres, au premier contact avec le contrôleur LOC, que celui-ci rappelle la valeur du QNH en vigueur. Cette consigne visait à réduire l'occurrence d'incohérences barométriques en annonçant le QNH en complément de l'annonce qui en a déjà été faite au cours de l'approche.

Cette consigne temporaire a été pérennisée et étendue, de sorte que depuis le 15 septembre 2023, pour tout centre de contrôle d'approche et tour de contrôle d'aérodrome :

« Au premier contact avec le contrôleur LOC, celui-ci rappelle la valeur du QNH par lecture directe sur l'IHM dédiée pour toutes les procédures d'approche exceptées les ILS et les LPV.

En vue de l'harmonisation des méthodes de travail, les centres de contrôle ont la possibilité d'étendre ce principe à l'ensemble des procédures d'approche aux instruments. »

Conclusion

La quantification précise des cas d'incohérences de réglage barométrique entre le sol et le bord révélée par ces données collectées par la DSNA, portant sur une large base d'observations (quasiment 1 700 000 atterrissages) et qui doit sa robustesse notamment à la source bord originelle représente une avancée très importante dans la compréhension et l'objectivation du niveau de risque apporté par le guidage vertical barométrique.

L'étude confirme que le risque d'intégrité barométrique dans le contexte de mise en œuvre opérationnel de ces approches en France (et en Europe) antérieur au quasi-CFIT AirHub CDG est très élevé, conduisant à un niveau de sécurité des approches avec guidage vertical barométrique réduit de 3 à 4 ordres de grandeur par rapport à l'objectif de sécurité des approches recherché par l'OACI.

En Europe, la France est probablement à ce jour le pays le plus exposé au risque du fait du grand nombre d'aérodromes ayant publié des approches RNP avec guidage vertical barométrique.

L'effet de l'annonce du QNH au premier contact avec le contrôle d'aérodrome mis en place par la DSNA postérieurement à l'incident grave du AirHub à CDG ne peut pas être quantifié à ce stade.

Il est à noter que le risque barométrique discuté dans cette note affecte de la même manière, et en l'état de nos connaissances très probablement avec un niveau quantitatif du même ordre que celui discuté ici, les procédures spéciales de type RNP AR qui utilisent un guidage vertical barométrique.

Il est prévu de poursuivre la mesure des incohérences sur l'année 2024 et les années suivantes afin de continuer à élargir la base statistique de mesure des incohérences, et dans l'objectif de quantifier l'effet de mesures d'atténuation spécifiques.

En outre, la DSAC étudie l'intérêt de relever les minima des approches Baro-VNAV à titre de mesure en réduction de risque.

Enfin, ces ordres de grandeur sont confirmés par deux autres sources indépendantes : une compagnie aérienne française dans le cadre de son analyse de vols (FDM) d'une part, et une étude menée par Eurocontrol destinée à valider un algorithme de détection des erreurs d'autre part. Cette dernière étude est disponible sur Researchgate [Ref. 4].

RÉFÉRENCES

[Ref 1] *“The SBAS Integrity Concept Standardised by ICAO. Application to EGNOS”*, Benoit Roturier, Eric Chatre, Javier Ventura-Traveset, 2001.

[Ref 2] *“France DSN position over the use of BaroVNAV”*, WP 33 prepared and presented by Benoit Roturier, NAVIGATION SYSTEMS PANEL (NSP) JOINTWORKING GROUPS – 2nd MEETING Montréal, 13-23 June 2017.

[Ref 3] Flight Safety Foundation, Airport Operations, *“Studies investigate the Role of Memory in the interaction between pilots and air traffic controllers, January- February 1998.*

[Ref 4] Mourousias, Nikolaos & Robert, Emilien & Smedt, D.. (2025). *An Algorithm for Identifying Altimeter Setting Errors from ADS-B Data.* 1-12. 10.1109/ICNS65417.2025.10976916.

Annexe

Rappel sur le risque d'intégrité des systèmes de navigation

Les systèmes de navigation sont normalisés par l'OACI au sein de L'Annexe 10 à la convention de Chicago, Télécommunications aéronautiques, au travers d'un ensemble de spécifications portant sur la qualité des informations de navigation critiques pour la sécurité du vol.

Pour la phase d'atterrissage qui est l'objet de cette note, le tableau suivant donne les performances minimales, issues de l'Annexe 10, que doivent tenir les systèmes de navigation par satellite pour des opérations d'approche et atterrissage.

Table 3.7.2.4-1 Signal-in-space performance requirements

Typical operation	Accuracy horizontal 95% (Notes 1 and 3)	Accuracy vertical 95% (Notes 1 and 3)	Integrity (Note 2)	Time-to-alert (Note 3)	Continuity (Note 4)	Availability (Note 5)
En-route	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ to $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I) (Note 8)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-II) (Note 8)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach (Note 7)	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft) (Note 6)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ in any approach	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ per 15 s	0.99 to 0.99999

Table 1. Annexe 10 OACI Vil 1 Table 3.7.2.4-1, exigences portant sur la performance des informations de navigation générées à bord par les systèmes de navigation par satellite.

On notera en particulier dans ce tableau, encadré en rouge, l'exigence sur le risque d'intégrité des approches avec guidage vertical. L'intégrité est définie dans l'Annexe 10 comme : « Mesure du niveau de confiance dans l'exactitude des informations fournies par l'ensemble du système. La notion d'intégrité englobe l'aptitude d'un système à fournir, en temps voulu, des avertissements valides (alarmes) ».

Ceci veut dire concrètement que pour les approches avec guidage vertical, le système de navigation à bord de l'avion ne doit pas fournir d'erreur de guidage au-dessus d'un seuil prédéfini qui est fonction de la phase de vol, sans en alerter l'équipage en moins de 6 secondes, plus de deux fois tous les 10 millions d'atterrissages.

Ces exigences de performance doivent se comprendre (voir la figure 1) comme mesurées sur les informations de navigation transmises à l'équipage et/ou aux systèmes de bord en sortie d'une « boîte noire » sans défaut. Cette « boîte noire » représente le système de navigation à bord de l'aéronef et les informations lui étant adressé (signaux de navigation affectés par la propagation atmosphérique, les multi trajets, les défaillances des satellites, etc.)⁸.

⁸ Les exigences protégeant de défaillances éventuelles du système de navigation à bord de l'avion et aussi de la corruption de la base de données, sont-elles définies par ailleurs (voir figure 2).

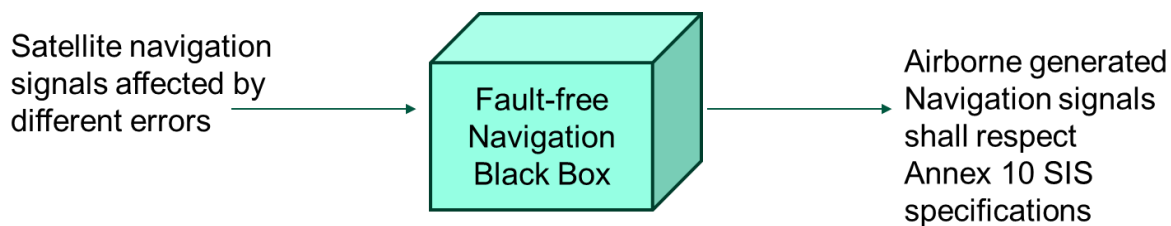


Figure 1. Pour spécifier les performances requises sur les informations de navigation générées à bord de l'aéronef (à partir d'informations externes), on fait l'hypothèse d'un système de navigation sans défaut à bord de l'avion.

L'exigence d'intégrité de l'Annexe 10 résulte de travaux menés par l'All Weather Operation Panel (AWOP) dans les années 1990. En partant de l'objectif global de sécurité pour les phases d'approche et atterrissage (Target Level of Safety – TLS, risque d'accident inférieur à 10^{-8} /approche) les travaux de l'AWOP ont permis d'obtenir des spécifications de performance précises sur les paramètres critiques pour la sécurité, comme l'intégrité, tel que montré dans la figure 2 ci-dessous [Ref 1].

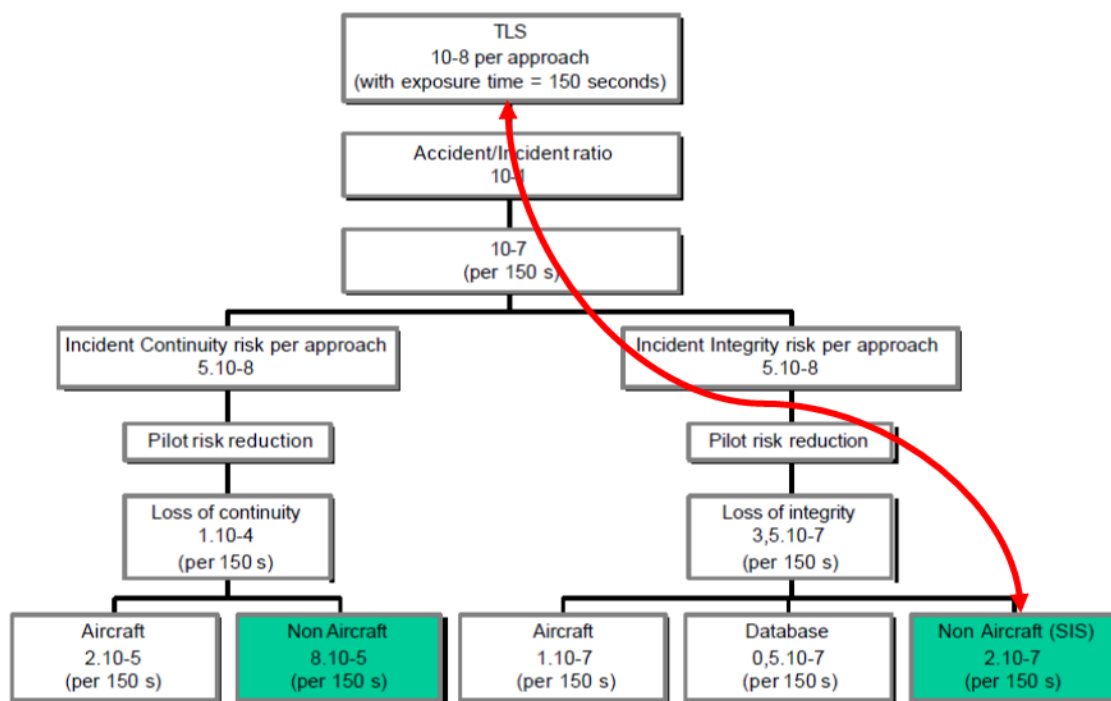


Figure 2. Arbre d'allocation dérivant les exigences de performance nécessaires à la tenue de l'objectif global de sécurité des approches. La flèche rouge décrit comment une défaillance de l'intégrité des informations de navigation générées à bord de l'avion impacte le niveau de sécurité des approches.

L'exigence d'intégrité sur les informations de navigation générées à bord de l'avion a pu être déduite de l'objectif de sécurité global (TLS), et réciproquement, une intégrité des signaux de navigation hors tolérance, quelle qu'en soit son origine, peut affecter sérieusement l'objectif de sécurité des approches. C'est sur ce raisonnement que repose l'impact de la fréquence de survenue de l'erreur sur la probabilité d'accident.

A cet égard, quatre facteurs pouvant moduler significativement le risque d'intégrité des opérations BaroVNAV peuvent être cités :

- La fréquence d'utilisation du guidage barométrique vs. guidage géométrique,
NB : en forte augmentation en Europe depuis 2018 avec le règlement PBN, conséquence de l'absence d'un mandat d'emport d'avioniques SBAS.

- *Les critères de conception des procédures influant sur les minima opérationnels BaroVNAV,*
NB : plus conservateurs aux Etats-Unis
- *Le niveau de transition*
NB : plus il est bas, comme en Europe, plus le risque que le changement 1013-QNH local se fasse lors d'une phase avec charge de travail élevée augmente, ce qui impacte négativement le risque d'erreur de QNH.
- *Le choix de l'unité pour la pression atmosphérique locale, deux unités différentes étant disponibles à bord des aéronefs commerciaux, les hectopascals (hPa) ou les pouces de mercure (in Hg)*
NB : il y a un rapport de 1 à 3 entre une erreur d'une unité de in Hg et une unité de hPa, et en conséquence l'erreur humaine la plus fréquente de 10 unités génère une erreur verticale de l'ordre de 300 ft avec l'unité hPa, alors qu'elle est limitée à 100 ft en in Hg, utilisé en Amérique du Nord.

Chacun de ces facteurs conduit à une augmentation du risque d'erreur sur le calage du QNH.