

Symbologie des collimateurs tête haute (HUD) : Etude pré réglementaire pour le SFACT.

Rapport final de la première tranche.

Auteurs : C. Roumes, M.-P. Fornette, C. Valot – IMASSA
P. Le Blaye – ONERA/DCSD

- Page sans texte -

FICHE D'IDENTIFICATION

Document émis : DCSD-T/R-237/01 - Date enregistrement : 9 octobre 2001

Contractant : DGAC/SFACT

Référence : Marché n°99.50.074.00.227.75.0 du 03 juillet 2000.

Fiche programme : 410 H

Date : 12/11/01 14:01

Résumé d'auteur :

Ce document constitue le rapport final de la première tranche de l'étude sur les symbologies des collimateurs tête haute (HUD), réalisée pour le compte du SFACT dans le cadre de son programme de recherche pré normative sur la sécurité de l'aviation civile.

Il aborde les différents travaux menés dans le cadre de cette étude:

1. Analyse comparative des réglementations JAA et FAA sur les HUD en général, et plus particulièrement sur les spécifications de leur symbologie ;
2. Bilan de l'interprétation des réglementations, au travers des entretiens avec les certificateurs ;
3. Analyse comparative des symbologies de HUD existants et confrontation avec la réglementation ;
4. Bilan de l'utilisation opérationnelle des HUD, au travers des sources de retour d'expérience et des entretiens avec les utilisateurs ;
5. Synthèse des lacunes de la réglementation en regard des besoins des certificateurs et des fragilités opérationnelles identifiées.

Notions d'indexage :

aviation civile – facteurs humains – réglementation - symbologie – collimateur tête haute – HUD

LISTE DE DIFFUSION

Destinataires du document :

Extérieurs :

DGAC/SFACT/R	MM. Angerand, Caudy, Deharvengt 50, rue Henry Farman 75720 Paris Cedex 15	5 ex.
IMASSA	Mmes Roumes, Fornette, Mr Valot BP 73 91223 Brétigny-sur-Orge Cedex	15 ex.
DGAC/SFACT/E	MM. Médal, Thibault 50, rue Henry Farman 75720 Paris Cedex 15	2 ex.
DGAC/SFACT/N	M. Baron 50, rue Henry Farman 75720 Paris Cedex 15	1 ex.
DGAC/OCV	M. Barral 50, rue Henry Farman 75720 Paris Cedex 15	1 ex.
DCE/CEV Istres	M. Leblond Base d'Essais d'Istres 13128 Istres Air	1 ex.
CEVAP	M. Fabre 18, rue de Roquemaurel BP 3023 31024 Toulouse Cedex 3	1 ex.

Intérieurs :

DCSD-Toulouse	C. Barrouil, L. Chaudron	2 ex.
DCSD-Salon	D. Tristrant, F. Morel, P. Le Blaye	10 ex.
DPRS-Toulouse	B. Lamiscarre	1 ex.
DSAC-Toulouse	Mr Labarrère	1 ex.
DSAC-Châtillon	C. Michaut	1 ex.
CP Toulouse		1 ex.

Destinataires de la fiche d'identification seule :

Extérieurs :

Intérieurs :

Diffusion systématique :

D – DSG – DTG – DAJ – DSB - DSAC

Table des matières

1. Introduction	7
1.1. Objet de ce document	7
1.2. Problématique de l'étude pré-réglementaire à visée normative	7
1.3. Champ de l'étude : le HUD d'aujourd'hui	7
1.4. Méthodologie de l'étude	8
2. Histoire et technique : des pratiques différentes, des symbologies différentes avec des conceptions d'emploi différentes	8
2.1. Les précurseurs	8
2.2. Le développement du HUD dans l'aviation civile	10
2.3. La différenciation des concepts d'emploi	11
2.4. L'uniformisation des symboles	13
3. Les textes sur les HUD : état, interprétation et évolutions	13
3.1. Etat des textes et réglementations	13
3.1.1. Inventaire JAA et FAA	13
3.1.2. Analyse comparative des textes existants	17
3.1.3. Textes américains en projet : SAE ARP 5288 et FAA working paper	22
3.1.4. Synthèse sur la réglementation existante	25
3.2. Interprétation des textes pour la certification	26
3.2.1. Le processus de certification	26
3.2.2. Entretiens auprès des certificateurs	27
3.3. Synthèse sur les textes existants et leur interprétation	28
4. Les HUD en pratique	29
4.1. Analyse des sources de retour d'expérience	30
4.1.1. ASRS	30
4.1.2. Baséac	31
4.1.3. Vortex	31
4.1.4. Analyse des vols d'Air France	31
4.2. Revue de HUD existants et avis des utilisateurs	32
4.2.1. Méthodologie	32
4.2.2. Symbologie de type surveillance (HUD A320)	32
4.2.3. Symbologie de type hybride (HFDS B737 et MD82)	36
4.2.4. Symbologie de type manuel (HGS sur B737 NG et CRJ, VGS sur B737 NG)	38
4.3. Analyse comparative des symbologies existantes	41
4.3.1. Méthodologie	41
4.3.2. L'approche en catégorie III	41
4.3.3. Le roulage	42
4.3.4. Les transitions : remise de gaz et rotation	42
4.3.5. Les fonctions particulières et élaborées	42
4.3.6. Synthèse des comparaisons	43
4.4. Confrontation des symbologies existantes avec la réglementation	43
4.4.1. Constitution des symbologies et exigences explicites de la réglementation	43
4.4.2. Usage effectif et fonctionnalités offertes	44
4.5. Synthèse sur l'utilisation opérationnelle des HUD	45
4.5.1. Des fragilités suspectées	45
4.5.2. Des avis largement positifs en pratique	46
5. Méthodes et critères d'évaluation dans la littérature sur les HUD	46

Décembre 2001

5.1. Objets d'expérimentation présents dans la littérature	47
5.1.1. Points faibles.....	47
5.1.2. Evolutions futures.....	47
5.2. Supports expérimentaux utilisés	48
5.3. Critères d'évaluation et paramètres retenus	48
5.4. Scénarios et variables utilisés	49
5.5. Sujets observés	49
5.6. Méthodes de traitement des résultats	50
6. Recommandations pour les méthodes d'évaluation	50
6.1. L'exploitation des appareils équipés de HUD indique-t-elle une évolution à apporter au processus de certification ?	51
6.2. Les éléments recueillis lors des recherches sur les HUD suggèrent-ils des points d'amélioration susceptibles d'être insérés dans les textes en vigueur ?	52
6.3. Le contenu des textes actuellement en vigueur peut-il être aménagé pour en rendre l'usage plus simple et clair ?	53
6.3.1. Rassembler des données disséminées.	53
6.3.2. Un document pour l'évaluation.	53
7. Conclusion	55
Annexe 1 : Références contractuelles	58
Annexe 2 : Abréviations	59
Annexe 3 : Glossaire	61
Annexe 4 : Principaux symboles HUD analogiques	65
Annexe 5 : Recensement des textes réglementaires concernant les HUD	68
Annexe 6 : Tableau de synthèse des textes réglementaires existants	76
Annexe 7 : Exigences réglementaires explicites sur les symboles HUD	77
Annexe 8 : Canevas d'entretien Ingénieur Navigant d'Essai	78
Annexe 9 : Canevas d'entretien Pilote d'Essai	80
Annexe 10 : Comparaison des avis de 2 pilotes d'essais sur la pertinence des symboles, par phase de vol	84
Annexe 11 : Synthèse des fiches ASRS	85
Annexe 12 : Documentation technique de HUD existants	87
Annexe 13 : Canevas d'entretien compagnie	88
Annexe 14 : Comparaison des symbologies pour la phase approche cat. III	90
Annexe 15 : Comparaison des symbologies pour la phase roulage	93
Annexe 16 : Comparaison des symbologies relatives aux transitions (remise de gaz et rotation)	94
Annexe 17 : Comparaison des symbologies relatives aux fonctions particulières et élaborées	96
Annexe 18 : Synthèse de la confrontation des symbologies HUD existantes avec les textes réglementaires (approche cat. III)	98
Annexe 19 : Bibliographie commentée	99

-0-0-0-

1. Introduction

1.1. *Objet de ce document*

Ce document constitue le rapport final de la première tranche de l'étude pré-réglementaire sur les symbologies des collimateurs tête haute (HUD pour Head-Up Display¹), réalisée pour le compte du SFACT en réponse à l'appel d'offre n°98/01, émis dans le cadre du programme fonctionnel pour la recherche pré normative sur la sécurité de l'aviation civile [réf. 1, Annexe 1]. Cette étude est prévue sur une durée maximale de 2 ans, la première année correspondant à une tranche ferme, notifiée le 03 juillet 2000 [réf. 2].

L'étude est effectuée sous la responsabilité du Département Commande des Systèmes et Dynamique du vol (DCSD) de l'ONERA en collaboration avec l'Institut de Médecine Aéronautique du Service de Santé des Armées (IMASSA) et le Centre d'Essais en Vol (CEV), et avec la participation de compagnies aériennes utilisatrices de collimateurs tête haute (Air France, Brit'Air, L'Aéropostale).

1.2. *Problématique de l'étude pré-réglementaire à visée normative*

Contrairement à la réglementation FAA, les documents JAA sur les collimateurs tête haute (références JAA HUDS 901, 902, 903) ne donnent pas de directives précises concernant les symboles qu'il est nécessaire de voir figurer dans un HUD et ces documents ont fait l'objet d'interprétations divergentes entre les équipes de certification JAA et FAA.

L'objectif de l'étude est de faire des recommandations pour une évolution de la réglementation JAA portant sur les symbologies tête haute et en particulier sur les symboles qui doivent nécessairement figurer ou ne pas figurer dans un HUD.

Ces recommandations doivent se faire sur des bases expérimentales solides, intégrant les paramètres Facteurs Humains.

1.3. *Champ de l'étude : le HUD d'aujourd'hui*

Afin d'en limiter le champ et en accord avec les experts du SFACT, l'étude rapportée ici concerne essentiellement les collimateurs tête haute tels qu'ils existent aujourd'hui dans l'aviation de transport civil.

On désignera donc sous le terme générique HUD, un instrument de pilotage présentant en tête haute et en superposition à la vision extérieure, des informations sous forme de symboles numériques (caractères alpha numériques) ou analogiques (forme géométrique dans un espace à deux dimensions). Il présente les caractéristiques fondamentales suivantes : collimaté à l'infini, conforme au monde extérieur, monochrome (voir ces termes dans le glossaire en Annexe 3). Il est destiné à l'aviation de transport civil, principalement dans le contexte d'utilisation actuel (vol en route et approche contrôlés).

L'étude ne porte pas directement sur de possibles utilisations futures du HUD, notamment pour la présentation d'informations issues de bases de données de terrain (SVS) ou de capteurs à imagerie (EVS), même si les questionnements spécifiques au HUD d'aujourd'hui seront sans aucun doute pertinents, voir exacerbés, avec l'adjonction de ces nouvelles sources d'information.

Egalement, les problèmes fortement liés aux évolutions envisagées dans le fonctionnement du système de transport aérien ne sont pas abordés précisément. Ainsi, la complémentarité du HUD

¹ Une liste des abréviations utilisées dans ce rapport figure en Annexe 2.

Décembre 2001

avec le TCAS ou la présentation des informations dans un contexte *free-flight* dépassent largement l'objet de l'étude.

1.4. Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée pour cette première tranche de l'étude comporte les étapes suivantes :

1. Analyse comparative des réglementations JAA et FAA
2. Bilan de l'interprétation des réglementations, au travers des entretiens avec les certificateurs
3. Analyse comparative des symbologies de HUD existants et confrontation avec la réglementation
4. Bilan de l'utilisation opérationnelle des HUD, au travers des sources de retour d'expérience et des entretiens avec les utilisateurs
5. Synthèse des lacunes de la réglementation en regard des besoins des certificateurs et des fragilités opérationnelles identifiées.

2. Histoire et technique : des pratiques différentes, des symbologies différentes avec des conceptions d'emploi différentes

2.1. Les précurseurs

Historiquement, les HUD sont apparus dès les années 1950 sur les avions militaires comme viseurs de tir au canon, et non pas comme instruments de pilotage. Pour cette application, le HUD présentait des avantages significatifs sur ces prédécesseurs mécaniques fixes : présentation d'une information actualisée en fonction des paramètres de tir, position conforme au monde extérieur et intérêt du pilotage en tête haute pour suivre la cible.

Les premiers développements de HUD en tant qu'instrument de pilotage ont eu lieu en Grande-Bretagne. L'approche anglaise consiste à présenter essentiellement une ligne d'horizon et un symbole de référence avion, ainsi que les valeurs de vitesse et d'altitude, avec des informations de guidage brutes élaborées par le directeur de vol de l'avion.

Les informations ne sont alors pas nécessairement conformes : en particulier, beaucoup de travaux et discussions ont porté sur la nécessité d'adopter des échelles de tangage conformes, dans la mesure où les échelles compressées peuvent contribuer à améliorer le contrôle en assiette, notamment lorsque celle-ci est élevée.

Les années 1960 voient le développement et la validation d'éléments de symbologies qui se retrouvent sur la plupart des HUD d'aujourd'hui.

Ainsi, Gilbert Klopstein, ingénieur d'essai au CEV puis à Thomson-CSF, propose une symbologie cohérente qui exploite au mieux les capacités spécifiques du collimateur tête haute (conformité et symboles analogiques intuitifs) et les relations angulaires entre les paramètres de pilotage (attitude, incidence, pente totale). Elle présente un vecteur vitesse air, qui facilite le pilotage en permettant la perception directe de l'incidence et de la pente potentielle, ainsi qu'un horizon gradué et une piste synthétique avec les informations de positionnement sur l'ILS (Figure 1). Cette symbologie permet un pilotage intuitif et précis d'approches avec ou sans visibilité. Le niveau de *clutter* est minimum ; noter l'absence des valeurs d'altitude, de cap et de vitesse. Cette symbologie a inspiré notamment la symbologie expérimentale PERSEPOLIS, puis les symbologies des avions Dassault (familles Mirage et Falcon).

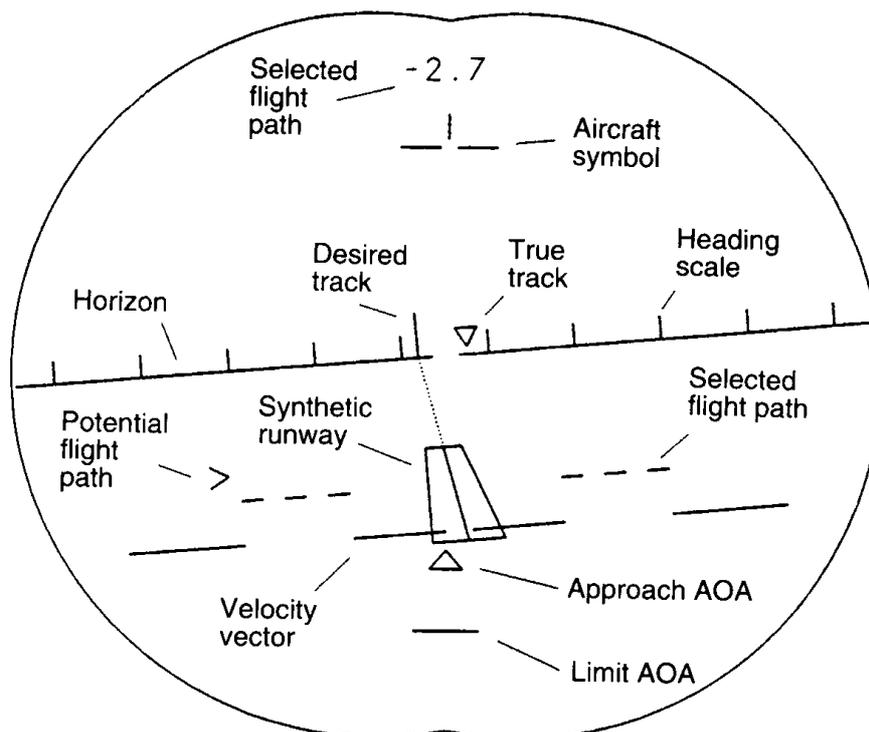


Figure 1 : La symbologie Klopstein (1966).

A la même époque, les américains comprennent l'intérêt potentiel de l'association d'un directeur de vol conforme avec le vecteur vitesse, pour le pilotage des approches. Ces éléments peuvent être associés avec une représentation synthétique du faisceau ILS pour renforcer le contrôle du suivi de la trajectoire. Ils sont implantés progressivement sur les HUD d'avions de combat américains. Ainsi la symbologie du A-7D présente ces informations, dont un vecteur vitesse inertiel, ainsi que les informations de pilotage sous forme d'échelles, avec une disposition en T basique (Figure 2). Les HUD militaires américains utilisent aujourd'hui une symbologie similaire, complétée d'informations alphanumériques.

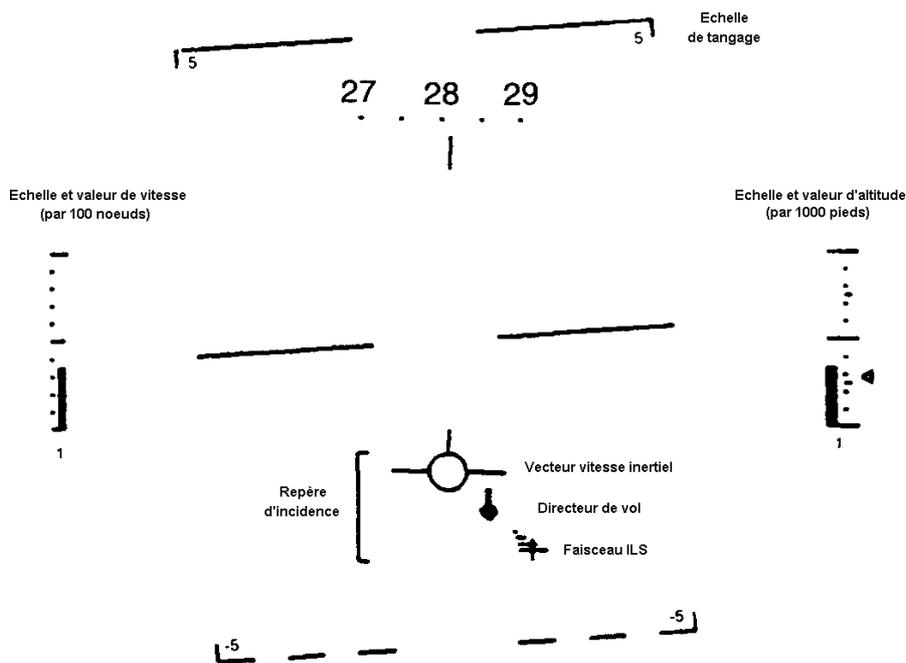


Figure 2 : Symbologie de l'A-7D en mode atterrissage.

2.2. Le développement du HUD dans l'aviation civile

L'introduction du HUD dans les cockpits civils est justifiée principalement en tant qu'aide à l'approche.

En effet, les méthodes d'approche traditionnelles posent différents types de problèmes spécifiques, selon les conditions de visibilité rencontrées.

Ainsi, **en approche à vue**, la perception de la hauteur et de la trajectoire notamment dans le plan vertical peut être dangereusement affectée par les conditions de vent et de luminosité ou par des paramètres tels que les dimensions ou la pente de la piste.

La présentation en tête haute des informations de trajectoire (vecteur vitesse inertiel, symbole de piste, cap et pente souhaités) conformes à la vision extérieure améliore alors considérablement la précision de l'approche, tandis que les informations de pilotage (incidence, vitesse et pente potentielle) facilitent le travail aux commandes en supprimant les itérations nécessaires en pilotage traditionnel². Les HUD récents proposent un mode de symbologie dédiée aux approches à vues, qui reprend pour l'essentiel les éléments analogiques de la symbologie Klopstein, mais avec un vecteur vitesse inertiel au lieu du vecteur vitesse aérodynamique d'origine.

En **approche aux instruments**, le passage du pilotage en tête basse avec les instruments traditionnels au pilotage tête haute au moment de l'acquisition du visuel est une phase délicate, en particulier lorsqu'elle est proche de la manœuvre d'arrondi.

² Une illustration flagrante de l'aide apportée par le HUD pour le pilotage de base est fournie par les avions militaires, dont les avions Mirage. Sans HUD, le pilotage des approches qui se font au second régime est tout à fait délicat, tandis qu'avec le vecteur vitesse et la pente potentielle présentés sur le HUD, le pilotage devient très aisé. En particulier le HUD du Mirage 2000 est souvent cité comme un exemple en même temps de simplicité et d'efficacité (associé au système de commandes de vol de cet appareil...).

La présentation des informations de pilotage en tête haute, avec l'adjonction d'une symbolologie de guidage ILS adaptée, constitue une première solution possible pour les approches par mauvaise visibilité en pilotage manuel. Ainsi, l'utilisation du HUD permet effectivement de supprimer la délicate transition à l'acquisition du visuel lors des approches aux instruments.

Une alternative au pilotage manuel, pour les avions capables d'atterrissage automatique, est d'utiliser le HUD comme moyen de surveillance du pilote automatique. Il suffit alors de présenter uniquement des informations de contrôle, telles que les écarts bruts au faisceau ILS et leurs valeurs maximales admises. Le HUD n'est alors utilisé éventuellement en pilotage manuel que dans le cas rare de défaillance de l'atterrissage automatique en dessous de la hauteur de décision. Ce concept dit hybride est proposé initialement par Sextant sur Mercure puis sur Airbus 320, et plus récemment, sur le Boeing 737 de l'Aéropostale et MD82 d'Alitalia (Figure 5).

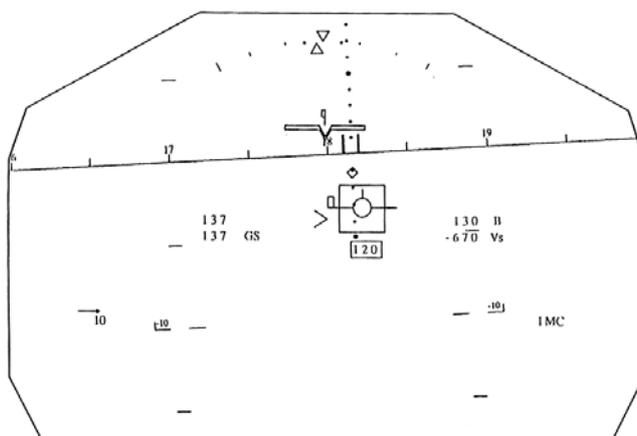


Figure 3 : Symbolologie HFDS Sextant pour le MD82.

2.3. La différenciation des concepts d'emploi

Pour les approches par mauvaise visibilité, on voit ainsi apparaître trois concepts d'emploi principaux, auxquels correspondent autant de tendances dans la constitution des symbolologies HUD :

- Le **concept 'manuel'**, d'origine plutôt anglo-saxonne, est basé sur une recopie des instruments de la tête basse sur le HUD avec la présentation d'informations de guidage ; le HUD est considéré comme un instrument primaire de pilotage. Ce concept est généralement appliqué dans un objectif d'augmentation des capacités opérationnelles et donc commerciales. En effet, l'adjonction d'un HUD peut permettre la certification pour des approches de catégorie IIIa en pilotage manuel d'un avion certifié uniquement en catégorie II sans HUD, pour un coût bien inférieur à celui que représenterait le développement de la chaîne supplémentaire nécessaire pour des approches automatiques. Notamment, les produits de Flight Dynamics sont à l'origine de la percée du HUD dans l'aviation civile, avec, dans un premier temps, l'installation de HUD pour le retrofit d'anciens avions (B 727, B 737, MD 83), puis actuellement sur de nouveaux avions (CRJ, et Falcon certifié jusqu'à la catégorie IIIc avec HUD).
- Le **concept 'surveillance'**, destiné aux avions capables d'approches sous pilote automatique, préconise plutôt la présentation sous une forme intuitive et dépouillée des informations de pilotage brutes. Le HUD étant considéré comme un instrument spécifique qui facilite le pilotage en VMC et la surveillance des automatismes en IMC, les informations de guidage ne sont pas jugées nécessaires. Dans ce concept, l'utilisation du HUD revêt un caractère optionnel, livré à la préférence de l'équipage (cas de l'Airbus 320).
- Le **concept 'hybride'**, d'origine française, peut être décrit comme une extension du concept de surveillance afin de permettre un gain de capacité opérationnelle. Ce concept est justifié économiquement par exemple sur un avion autorisé de base pour des approches en catégorie IIIa afin d'effectuer des approches en catégorie IIIb en automatique avec surveillance au HUD, notamment dans des conditions d'exploitation difficiles telles que les rencontrent les

compagnies Alitalia en Italie du Nord ou Alaska Airlines au Canada. Le HUD permet ainsi un "crédit opérationnel" (cas des B 737 de l'Aéropostale, des MD 82 d'Alitalia ou encore, historiquement, de l'Airbus 320 avant l'extension de sa certification pour les approches automatiques en catégorie IIIb sans l'aide du HUD). Dans ce concept, les informations de guidage ne sont pas non plus nécessaires : en effet, on estime que la poursuite de l'atterrissage en pilotage manuel sous la DH ne nécessite pas la présence d'informations de guidage. Cette phase durant environ 3 secondes en cas d'approche en catégorie IIIb, la présentation d'informations brutes et d'une référence de pente optimale suffit pour conduire l'avion jusqu'à l'atterrissage. Il faut noter que l'utilisation du HUD hybride dans les conditions extrêmes de sa certification revêt un caractère obligatoire.

Ces différents concepts trouvent naturellement leur correspondance dans la réglementation.

En effet, celle-ci distingue deux types de systèmes selon le niveau de sécurité offert en cas de panne (voir par exemple FAA AC 120-28D) :

- un système « fail passive » est un système qui en cas de panne ne cause pas de déviation significative de la trajectoire ou de l'attitude de l'avion ;
- un système « fail operational » est un système qui permet de mener à bien la phase de vol à la suite d'une panne de l'un de ses composants survenant après le passage d'un point spécifié lors de l'analyse de sécurité (par exemple, la hauteur d'alerte).

Il est ainsi possible de concevoir 3 types d'architectures de systèmes d'atterrissage tout temps, tels que les décrit la sous partie E du JAR-OPS 1 (voir le glossaire).

1) Les systèmes passifs après panne

Ce niveau de sécurité est requis pour les approches automatiques en catégorie IIIa.

En fonctionnement normal, 2 pilotes automatiques (PA) fonctionnent en parallèle. Si un écart est détecté entre les 2 PA, les 2 équipements sont déclarés en panne et le pilote reprend la main. Au moment de la panne, le maintien de la trajectoire est garanti (pas d'écart de trajectoire) mais une reprise du pilotage en manuel doit être effectuée. Les minima de la catégorie IIIa sont tels que le pilote peut terminer l'approche en manuel si une panne apparaît à la DH.

L'adjonction d'un HUD de concept manuel, auto-surveillé et présentant un directeur de vol autonome, peut également procurer le même niveau de sécurité.

2) Les systèmes opérationnels après panne

Ce niveau de sécurité est requis pour les approches automatiques en catégorie IIIb.

En fonctionnement normal, 3 PA fonctionnent en parallèle.

La redondance permet d'avoir toujours un PA opérationnel ce qui garantit une approche automatique jusqu'à l'atterrissage

Les minima de la catégorie IIIb sont tels que le pilote ne peut pas terminer l'approche en manuel si une panne apparaît à la DH ; c'est pourquoi l'approche automatique est garantie jusqu'à l'atterrissage.

Dans ce contexte, le HUD relève du concept surveillance, son utilisation est optionnelle.

3) Les systèmes hybrides opérationnels après panne

Cette architecture est une alternative à la précédente pour passer de la catégorie IIIa à la catégorie IIIb.

En fonctionnement normal : 2 PA fonctionnent en parallèle et un HUD est utilisé en surveillance de l'approche automatique. Si un écart est détecté entre les 2 PA, les 2 équipements sont déclarés en panne et le pilote termine l'approche en manuel avec le HUD. Au moment de la panne, le maintien de la trajectoire est garanti (pas d'écart de trajectoire) mais une reprise du pilotage en manuel doit être effectuée.

On considère que la surveillance effectuée au HUD par le pilote pendant toute l'approche lui permet de terminer éventuellement en manuel : c'est le concept hybride.

Afin d'éviter une schématisation excessive, il convient de noter que les HUD les plus récents offrent des modes multiples afin de pouvoir être utilisés dans toutes les phases de vol quelles que soient les conditions de visibilité. Ils peuvent être utilisés tant comme instrument de pilotage que comme instrument de surveillance, dans les limites de leur certification, ce qui contribue à brouiller la relation entre le concept d'emploi et la symbologie. La volonté commerciale d'étendre le domaine d'utilisation des HUD tend à augmenter la diversité des symboles présentés ; elle est heureusement en partie contre balancée par le savoir faire des équipementiers qui exploitent judicieusement les possibilités des générateurs de symboles modernes.

2.4. L'uniformisation des symboles

La revue des symbologies qui ont marqué l'histoire du HUD, ainsi que l'étude comparative des symbologies existantes menée dans le cadre de cette étude (voir le paragraphe 4.3), indique qu'il existe aujourd'hui un ensemble de symboles dont la connaissance et la signification sont partagés par la communauté aéronautique : une sorte de langage commun du HUD.

Il est ainsi aujourd'hui possible de décrire les principaux symboles constitutifs d'un HUD générique ; ces symboles se retrouvent dans la plupart des HUD actuels, avec des variantes mineures qui constituent la marque de l'équipementier.

Une description des principaux symboles analogiques constitutifs des HUD actuels est ainsi fournie en Annexe 4.

Il convient de noter qu'une telle description par symbole est forcément limitée par son caractère statique : au delà de son apparence statique, une symbologie réelle doit être évaluée dans le cadre de son emploi effectif et en tenant compte de nombreuses autres dimensions (dynamique, logique, compatibilité tête basse,...). Une description générique ne vaut que comme vocabulaire commun pour permettre la discussion, mais en aucun cas comme spécification d'une symbologie standard qu'il faudrait appliquer sans adaptation.

3. Les textes sur les HUD : état, interprétation et évolutions

3.1. Etat des textes et réglementations

3.1.1. Inventaire JAA et FAA

La recherche des textes et des réglementations existantes ou en projet en rapport avec les symbologies HUD aboutit à la liste des textes réglementaires reproduite en Annexe 5.

3.1.1.1. Organisation des textes

Telle quelle, la liste des textes relatifs au HUD apparaît tout à fait contrastée : elle est composée de textes nombreux et divers. Ainsi, pour comprendre précisément le champ d'application d'un texte et sa place dans l'inventaire réglementaire, il est indispensable de prendre en compte les différentes caractéristiques développées dans la suite de ce chapitre.

En particulier, la connaissance de ces caractéristiques est utilisée par les experts de la réglementation au moment d'établir la base de certification, qui est la liste exacte des textes applicables pour la certification d'un HUD donné.

L'autorité d'origine

Il est généralement aisé d'identifier l'autorité qui est à l'origine de l'émission d'un texte. Parmi les textes recueillis, certains sont ainsi clairement d'origine américaine (FAA) ou européenne (JAA).

Décembre 2001

Un nombre plus restreint de textes est émis par une autorité nationale ; c'est le cas généralement de textes qui formulent une dérogation nationale par rapport à l'autorité internationale ou une proposition d'évolution à venir pour la réglementation internationale.

D'autres organismes produisent également des documents à caractère réglementaire : ainsi, la SAE et la RTCA aux Etats-Unis fournissent essentiellement des spécifications techniques précises qui tiennent lieu de standards minima imposés par le ministère des transports américain.

Même si l'autorité géographique est bien identifiée, le domaine géographique dans lequel un texte est en vigueur est difficile à établir en raison de l'imbrication des systèmes de transport aérien, malgré les efforts d'harmonisation de la réglementation. Ainsi, un texte JAA peut être appliqué lors d'une certification FAA et inversement.

Même si les textes applicables dépendent en premier lieu de la certification visée, ce sont véritablement les experts qui établissent la base réglementaire applicable pour la certification d'un HUD donné, en négociation avec les industriels impliqués et les compagnies clientes.

Le statut

Parmi les textes référencés, des différences importantes de statut existent.

Le statut du texte correspond à son niveau d'applicabilité, et dans le cas où le texte est effectivement applicable, à sa date d'entrée en vigueur :

- Les principales **règles applicables** sont notamment FAR 25, JAR 25, JAR AWO, JAR OPS et JAR HUDS 901, 902 et 903.
- D'autres textes proposent des **moyens de démonstration de conformité** : il s'agit notamment des Advisory Circular : AC pour la FAA (notamment AC 25.11 pour les EFIS, AC 120-28D pour les opérations en catégorie III et AC 120-29A pour les catégories I et II) et ACJ pour les JAA. Les ACJ sont les équivalents aux AC ; cependant une différence importante existe entre ces 2 types de textes. En effet, les ACJ font partie intégrante de la réglementation puisqu'ils constituent des annexes aux JAR, alors que les AC sont des décrets d'application qui ne sont pas inclus directement dans les textes FAR et qui ne font donc pas partie de la réglementation à proprement parler. Ces textes sont complétés éventuellement par des indications (*guidance material*) concernant des questions particulières ; ainsi, les *memorandum policy* de la FAA.
- Quand il n'existe pas de réglementation sur un thème, les **comptes-rendus de certification**, Certification Review Item (CRI) pour les JAA et Issue Papers (IP) de la FAA, proposent eux aussi des moyens de démonstration de conformité, employés dans le cadre d'une certification antérieure, et qui peuvent faire jurisprudence.
- Quelques textes enfin sont des **projets de réglementation**, en particulier, le texte SAE ARP 5288 constitue un projet américain de réglementation spécifique au HUD.
- Enfin, une autre catégorie de texte est constituée des recommandations ou **guides** (Human Factors Design Guide, Flight Test Guide) ; ces textes proposent également des moyens de démonstration de conformité et sont des documents très utiles au constructeur. Le guide Facteurs Humains donne des notions et des recommandations généralement applicables à la conception des interfaces, mais il est peu applicable aux spécificités des HUD ; de même, il n'existe pas de Flight Test Guide spécifique au HUD.

Il faut noter que l'ensemble des textes réglementaires évolue en permanence, par des processus lents de propositions, itérations, publication avant mise en application. Ce sont les textes en vigueur au moment de la demande de certification par l'industriel qui constitueront la base réglementaire effectivement appliquée pour la certification. D'où l'importance pour l'industriel

Décembre 2001

d'anticiper la demande de certification par rapport au développement du produit et de négocier pour établir la base réglementaire.

La finalité

Une autre dimension qui permet de distinguer parmi les textes est la finalité pour laquelle ils sont rédigés.

En effet, les textes peuvent être destinés en priorité à réglementer notamment :

- La **conception** : c'est le cas des textes JAR et FAR, des pratiques recommandées (ARP) publiées par la SAE aux Etats-Unis ainsi que des documents de la RTCA ;
- La **certification** : il s'agit notamment des démonstrations de conformité (AC, AMJ, ACJ) ainsi que des textes JAR AWO et HUDS qui précisent les objectifs et les méthodes de la certification ;
- Les **opérations** : c'est le cas des JAR OPS 1 (sous partie E : opérations tous temps dont HUD hybride) et 4 (sous partie 3 : opérations tout temps avec guidage HUD) qui précisent également les exigences de formation et d'entraînement des équipages.

Cette distinction par finalité est relativement schématique, étant donné que les concepteurs tiennent naturellement compte des contraintes imposées par la certification et que la certification tient compte du contexte prévu pour les opérations.

A fortiori, certains textes abordent plusieurs finalités simultanément (par exemple les textes JAR incluent les ACJ).

Le type d'instrument

Le HUD est un instrument de bord qui présente des caractéristiques spécifiques.

A ce titre, plusieurs textes réglementaires lui sont applicables, selon la hiérarchie suivante :

- FAR 25 et JAR 25 (notamment § 1303, 1321, 1333, 1335 et 1381), en tant qu'instrument de pilotage ;
- FAA AC 25-11 et JAR AMJ 25-11, en tant qu'instrument électronique,
- FAA AC 120-28D, 120-29A et JAR HUDS 901, 902, 903, textes spécifiques au HUD.

Il faut noter que certaines exigences portant sur les instruments de bord en général ne sont pas directement applicables au HUD ; par exemple, les exigences portant sur les codes de couleurs pour les alarmes. Dans ce cas on considère effectivement que le HUD est un instrument particulier pour lequel des solutions de remplacement doivent être fournies pour satisfaire l'esprit du texte de base (par exemple, utiliser un clignotement pour compenser l'absence de couleur). C'est l'une des raisons d'être de textes spécifiques au HUD.

Le type d'opération visé

Les textes applicables varient bien entendu selon le type d'opération visé pour la certification.

Sont ainsi applicables :

- les textes généraux pour toutes les opérations (FAR et JAR 25, JAR HUDS 903) ;
- et des textes supplémentaires pour les opérations par faible visibilité :

Décembre 2001

- FAA AC 120-29A, JAR HUDS 902 ou JAR AWO sous partie 2 pour la catégorie II ;
- FAA AC 120-28D, JAR HUDS 901 ou JAR AWO sous partie 3 pour la catégorie III.

Le concept d'emploi

Enfin, cette dernière dimension correspond au concept d'emploi choisi par le concepteur.

Certains textes sont applicables quel que soit le concept d'emploi, d'autres ne concernent qu'un concept d'emploi particulier.

Ainsi, les textes applicables pour les JAA sont :

- pour les concepts HUD de surveillance ou hybride : JAR HUDS 903, JAR AWO, JAR OPS 1
- pour le concept HUD manuel, avec guidage : : JAR HUDS 901, 902, 903, JAR OPS section 4, part 3.

Les textes FAA (AC 120-28D et 120-29A) sont communs aux trois concepts d'emploi, avec des paragraphes particuliers pour l'application au concept hybride.

La phase de vol concernée

Les textes applicables peuvent porter sur tout ou partie des phases ou situations de vol.

En particulier, les phases suivantes sont généralement abordées en raison des exigences particulières qu'elles impliquent pour l'usage du HUD :

- roulage,
- décollage,
- croisière,
- situations inusuelles,
- atterrissage,
- remise de gaz.

3.1.1.2. Synthèse de l'inventaire

Le tableau présenté en Annexe 6 fait la synthèse des différents textes selon les différentes caractéristiques décrites ci-dessus.

En conclusion, étant donnée la complexité des textes réglementaires, il apparaît généralement difficile d'effectuer une lecture linéaire des règlements. Le concepteur, le certificateur comme l'opérateur doivent donc jongler avec la réglementation ; la connaissance et l'interprétation des textes sont fondamentales.

La synthèse de ces caractéristiques permet néanmoins de mettre en équivalence les textes européens et américains spécifiques au HUD, par catégorie d'opérations, afin de procéder à leur comparaison :

Opérations	Texte européen	Texte américain
Toutes	JAR HUDS 903	SAE ARP 4102/8 SAE ARP 5288 (en projet)
Cat. II	JAR HUDS 902	FAA AC 120-29A
Cat. III	JAR HUDS 901	FAA AC 120-28D

L'inventaire des textes réglementaires applicables au HUD est complexe : sa compréhension nécessite de prendre en compte les différentes caractéristiques des textes : autorité d'origine, statut, finalité, type d'instrument, concept d'emploi, catégorie d'opération et phase de vol visée.

3.1.2. Analyse comparative des textes existants

Cette analyse comparative a un double objectif:

- dégager les différences existantes au niveau des textes réglementaires, avant interprétation.
- identifier les implications directes ou implicites sur la constitution des symbologies.

L'analyse que nous avons menée porte sur les spécifications générales des textes fondamentaux puis sur les différences entre les textes spécifiques aux HUD, par catégorie d'opération, et en s'intéressant plus particulièrement aux éléments relatifs à la constitution des symbologies.

3.1.2.1. Des exigences avant tout fonctionnelles

Lorsque l'on cherche à identifier les conséquences directes de la réglementation (par exemple, sur la constitution d'une symbologie HUD), il importe de comprendre que les textes réglementaires reposent d'abord sur des exigences fonctionnelles que doit satisfaire l'équipement, telles que formulées par exemple dans les extraits reproduits ci-dessous :

"The design of the HUD symbols should provide for satisfactory manual control, or for monitoring of automatic flight, for the flight phases for which approval is sought. (...) The selected symbols should be consistent with the intended uses of the HUD." (JAA HUD 903).

"The HUD must provide sufficient guidance information to enable the pilot to maintain the approach path, to make the alignment with the runway, flare and land the airplane within the prescribed limits or to make a go-around without reference to other cockpit displays." (FAA AC 120-28D, cat. III ops)

En particulier, les exigences concernant les facteurs humains sont généralement abordées sous une perspective fonctionnelle et subjective, dans la réglementation américaine comme dans la réglementation européenne.

En particulier, plusieurs exigences essentielles qui relèvent directement des facteurs humains sont abordées de cette façon :

- la charge de travail :

"The use of the HUD must not unduly fatigue the pilot (e.g., due to eye strain, maintaining a rigid head position, or excessive mental concentration). The work load associated with the use of the HUD must be considered in showing compliance with JAR 25.1523, ACJ 25.1523 and JAR 25 Appendix D." (JAR HUDS 903).

"The workload associated with use of the HUD [guidance system] should be considered in showing compliance with section 25.1523." (FAA AC 120-28D, appx 2.)

- l'interprétation des symboles :

"Display elements and symbology (...) should be natural, intuitive, and not dependent on training or adaptation for correct interpretation." (AC/AMJ 25-11, 7.)

- la perception de la situation (spatiale) :

"EFIS displays must be able to convey to the pilot a quick-glance sense of the present speed, attitude and altitude." (AC/AMJ 25-11, 7d.2i.)

Les textes en vigueur des deux côtés de l'Atlantique indiquent d'ailleurs de façon encore plus générale une position commune sur la signification des termes facteurs humains et l'approche qu'il convient d'adopter pour leur évaluation lors de la certification :

"Human Factors. Humans are very adaptable, but unfortunately for the display evaluation process they adapt at varying rates with varying degrees of effectiveness and mental processing compensation.

Thus, what some pilots might find acceptable and approvable, others would reject as being unusable and unsafe. Airplane displays must be effective when used by pilots who cover the entire spectrum of variability. Relying on a requirement of "train to proficiency" may be unenforceable, economically impractical, or unachievable by some pilots without excessive mental workload as compensation." (AC/AMJ 25-11, 4b.1).

Au delà de ces éléments subjectifs mais essentiels, certaines exigences réglementaires portent explicitement sur les éléments constitutifs de la symbologie, ou plus exactement, sur la présence de certaines informations. Ces exigences sont analysées dans la suite de ce chapitre.

De façon générale, il faut noter que, même lorsque l'exigence d'un symbole est explicite, elle se limite généralement à nommer l'information qui doit être présentée, sans préciser davantage comment elle doit être présentée. Ainsi, présentation digitale ou analogique, forme, taille, ou emplacement du symbole sont rarement spécifiés, hormis pour les informations essentielles du T basique.

3.1.2.2. Des règles de base similaires : FAR et JAR 25, AC 25-11 et AMJ 25-11

La comparaison des principales sections applicables aux HUD dans les textes fondamentaux (FAR et JAR 25, AC et AMJ 25-11) ne fait apparaître que des différences tout à fait minimes, au mot près. Les deux réglementations requièrent notamment la présentation des mêmes informations.

Une différence d'approche apparaît tout de même à travers le premier alinéa de la section JAR 25.1303 sur les instruments de vol et de navigation :

"All flight and navigation instruments must have characteristics suitable for use in the particular aeroplane considered. The presentation must be clear and unambiguous."

Cet alinéa qui est absent du texte de la FAA semble traduire un souci premier dans la réglementation européenne de favoriser une présentation claire et non ambiguë des informations.

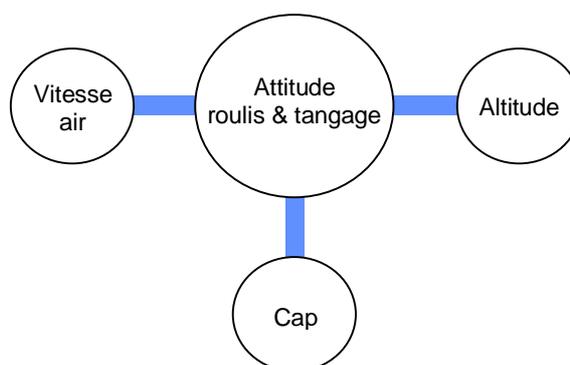
Nous examinons plus précisément ci-dessous les éléments applicables à la constitution des symbologies HUD.

Informations primaires de pilotage et de navigation : le T basique

Les informations primaires de pilotage et de navigation sont définies par la règle FAR/JAR 25.1303. Il s'agit notamment des informations suivantes : vitesse air, altitude, vitesse verticale, attitude (inclinaison et assiette), taux de virage et cap de l'avion.

L'ensemble de ces informations doit donc figurer sur un HUD destiné à être utilisé comme instrument de pilotage.

Le T basique correspond à la disposition selon le schéma classique en T des informations de vitesse, d'altitude, d'attitude et de cap de l'avion :



Cette disposition est spécifiée par la règle de base pour la disposition des instruments de pilotage (FAR/JAR 25.1321) :

- (1) *The instrument that most effectively indicates attitude must be on the panel in the top center position;*
- (2) *The instrument that most effectively indicates airspeed must be adjacent to and directly to the left of the instrument in the top center position;*
- (3) *The instrument that most effectively indicates altitude must be adjacent to and directly to the right of the instrument in the top center position; and*
- (4) *The instrument that most effectively indicates direction of flight must be adjacent to and directly below the instrument in the top center position.*

Il faut noter que selon cette règle de base, l'information de vitesse verticale ne fait pas partie du T basique : cependant sa présentation est requise au titre de la règle relative aux instruments de pilotage et de navigation (25.1303).

Spécifications pour les instruments électroniques

Les textes relatifs aux instruments de vol électroniques (AC et AMJ 25-11, 7a) présentent un intérêt particulier pour la définition d'une symbologie HUD, puisqu'ils comportent des considérations particulières à ce type d'instruments, dont les HUD modernes font partie.

Le chapitre 5 de ces textes aborde plusieurs notions clé de la présentation des informations permises par les instruments électroniques, et a fortiori pour les HUD, par rapport aux instruments traditionnels :

- la **standardisation des couleurs** : cette recommandation vise à faciliter la différenciation des informations et des niveaux d'alarme ; elle est évidemment inapplicable aux HUD actuels, monochromes, pour lesquels des solutions alternatives doivent être trouvées ; ce point nécessite d'être abordé dans les textes spécifiques aux HUD ;
- la **redondance des caractéristiques** d'un symbole : les textes comportent une discussion pertinente sur la relation entre la charge de travail et la séparation des informations au moyen de la couleur ; en évoquant le cas possible d'une déficience visuelle des utilisateurs, les textes recommandent l'utilisation systématique de caractéristiques redondantes dans la constitution de symboles dont la séparation est importante : dans le cas des HUD, forme, taille et positionnement sont des caractéristiques pour lesquelles ce principe devrait être appliqué ;
- la **standardisation de la symbologie** : celle-ci est préconisée ; il est fait référence aux textes de la SAE qui contribuent à cet effort de standardisation et qui pourraient à terme être intégrés aux textes réglementaires ;
- le **positionnement des symboles** : l'uniformisation entre les différents instruments à travers le cockpit est recommandée ; cette recommandation rejoint le sujet plus large de la compatibilité entre les instruments en tête basse et les HUD.
- le **clutter** : la saturation de l'affichage est susceptible d'augmenter le temps nécessaire à l'interprétation des symboles. Deux voies sont suggérées pour l'éviter : la simplification des symboles et la limitation de leur nombre aux informations requises pour la tâche courante. En revanche le problème spécifique aux HUD du possible masquage d'éléments extérieurs n'est pas abordé dans ces textes.

Le chapitre 6 aborde les caractéristiques physiques du visuel qui sont également de première importance pour la conception des HUD :

- le **réglage de la luminosité** : la plage de réglage doit être suffisante pour garantir la lisibilité dans l'ensemble des conditions d'éclairage, et également pour éviter le masquage d'éléments extérieurs lorsque la lumière est très faible: cet aspect vaut en priorité pour les HUD ;
- le **taux de rafraîchissement** : cette donnée technique détermine des phénomènes qui peuvent être particulièrement gênants dans le cas des HUD, tels que le scintillement (*flicker*) et les traînages de la symbologie lors de manœuvres dynamiques.

Le chapitre 7 concerne précisément la présentation des informations.

Au delà de l'exigence fondamentale, citée précédemment, d'une présentation naturelle et intuitive pour une interprétation correcte des symboles, ce chapitre précise les règles de présentation des informations.

La disposition en T basique reste requise : des adaptations ne peuvent être apportées qu'à condition de recherche ou d'expérience suffisantes sur les facteurs humains associés.

L'unique différence entre les textes américains (AC 25-11) et européens (AMJ 25-11) concerne la transposition des indicateurs d'attitude (EADI) et de navigation (EHSI), par rapport à la règle du T basique qui veut que l'EHSI soit situé sous l'EADI : la transposition est jugée inacceptable dans le texte FAA, alors qu'elle doit être jugée au cas par cas pour les JAA.

La disposition (par rapport à la référence d'attitude) et le format (numérique, échelles, limitations, unités,...) des informations de pilotage et de navigation sont également préconisés, avec mention de différentes variations acceptées.

Le cas d'un l'instrument primaire de pilotage (PFD) qui fusionne l'ensemble des informations nécessaires est l'objet de spécifications supplémentaires.

En conclusion, les textes sur les instruments électroniques fournissent des spécifications déjà fort détaillées sur la constitution de la symbologie de base. Ces spécifications dans certains cas ne peuvent pas s'appliquer tels quelles aux symbologies des HUD : des textes complémentaires spécifiques aux HUD sont donc nécessaires.

3.1.2.3. HUD toutes opérations : SAE ARP 4102/8 et JAR HUDS 903

Au contraire des textes généraux (FAR et JAR 25) et des textes relatifs aux instruments électroniques (AC et AMJ 25-11), les textes spécifiques aux HUD et applicables à toutes les opérations n'ont pas d'équivalence exacte des deux côtés de l'Atlantique.

Le texte européen est le document de "politique intermédiaire" HUDS 903, édition de 1997, qui fait partie des JAR.

En l'absence d'un texte FAA correspondant (dont un projet est constitué du texte SAE ARP 5288 étudié plus loin dans ce rapport), le texte américain à considérer est le document de "pratiques recommandées" ARP 4102/8 publié par la SAE, édition de 1998.

Le texte des JAA est destiné à fournir des critères pour la certification, tandis que le texte SAE est destiné à servir de standard minimum pour la conception des HUD : la portée du texte américain est donc d'emblée plus limitée.

Il convient de noter que le texte FAA fait référence au texte JAA, et non l'inverse.

Les deux textes concernent principalement des HUD collimatés à l'infini, sans imagerie (ils ne couvrent pas l'EVS), et conformes, bien que des présentations non conformes ne soient pas exclues.

Les deux textes distinguent différents usages possibles du HUD : celui-ci peut être destiné à remplacer (SAE : *replace*, JAR : *primary reference*) ou à suppléer (SAE : *repeat*, *augment*, JAR : *supplement*) les instruments en tête basse.

Les deux textes sont peu clairs quant aux concepts d'emploi possibles (surveillance ou manuel). Les éléments suivants donnent cependant la philosophie de chacun des textes :

Décembre 2001

- Le texte SAE requiert la présentation d'informations de guidage (*flight guidance*) dans la symbologie de base. Dans le cas d'un HUD primaire, il requiert la présentation des informations permettant le pilotage manuel.
- Le texte JAA prévoit en effet que le HUD puisse servir au pilotage manuel ou à la surveillance du pilote automatique. Une ambiguïté provient de la définition très générale adoptée pour le terme *guidance*³, qui recouvre les informations nécessaires au pilotage manuel comme à la surveillance.

Le texte JAR aborde la plupart des problèmes spécifiques au HUD : charge de travail, focalisation d'attention, risques de confusion, *clutter*, limites de champ, compatibilité avec la tête basse, conséquences pour le travail en équipage, détection des pannes et alarmes,...

Il met en avant la nécessité de constituer la symbologie en fonction de l'appareil et de l'utilisation visés, ce qui semble en effet une approche plus satisfaisante que de chercher à fixer un standard indépendamment du contexte d'utilisation.

Le tableau présenté en Annexe 7 permet de comparer les exigences explicites des deux textes pour ce qui concerne les informations à présenter. Ces exigences sont similaires, à la différence des informations de guidage requises dans le texte SAE.

En conclusion, les textes SAE et JAR relatifs aux HUD pour toutes les opérations sont de niveaux bien différents. Le texte SAE est de portée limitée, il apparaît moins complet et moins clair, il n'aborde pas explicitement l'utilisation du HUD comme moyen de surveillance. Cette conclusion sera prochainement à revoir en considérant le texte SAE ARP 5288 actuellement en projet.

3.1.2.4. HUD cat. II : FAA AC 120-29A et JAR HUDS 902

A l'opposé du texte de la SAE applicables aux HUD pour toutes les opérations, le texte américain pour les opérations de catégorie II est un texte très complet et destiné à la certification. Il donne les conditions, performances, équipements, procédures, entraînement et qualifications nécessaires pour procéder aux approches en catégories I et II, dont les spécification pour les HUD utilisés en manuel ou hybrides, ainsi que sur l'EVS... Une lecture parallèle avec le texte JAR est donc relativement difficile car celui-ci est spécifique aux HUD pour les opérations de catégorie II.

Le texte JAR reprend la définition générale du guidage du texte JAR HUDS 903, commune également au texte FAA ; il s'applique donc également à l'utilisation d'un HUD en manuel ou en surveillance, tandis que l'autre pilote surveille l'approche en tête basse.

Le texte des JAA apparaît globalement plus clair et concis que le texte FAA ; mais il est aussi de champ plus limité. Comme le texte HUDS 903, le texte JAA formule des exigences plus qualitatives que le texte FAA : il met en avant les exigences de performances en relation avec l'opération visée, plutôt qu'une description explicite des informations à fournir. Ainsi, le texte JAA est organisé par fonctionnalité (e. g. : « Go-around rate », « Flight Crew Workload », « Control of flight path »,...) tandis que le texte FAA utilise une description par système (« FD systems », « HUD systems », « Hybrid systems »,...).

Concernant les concepts d'emploi du HUD, le texte FAA apparaît plus précis que le texte JAA.

Pour le concept manuel, le texte FAA spécifie notamment qu'un guidage (directeur de vol) doit être présenté, ainsi que des informations de situation : typiquement, les écarts bruts par rapport au faisceau ILS (5.5 et 5.9). Le texte JAA précise seulement que le guidage (au sens large) doit être de qualité suffisante.

³ "Information used during manual control or monitoring of automatic control of the aircraft that is of sufficient quality to be used by itself for the intended purpose." Cette définition est identique à celle des textes FAA AC 120-29a et 120-28d.

Pour les concepts surveillance ou hybride, le texte FAA est également plus détaillé. Il spécifie que les systèmes hybrides (HUD utilisé comme moyen de surveillance et de récupération en cas de défaillance du PA) sont également acceptables s'ils fournissent le même niveau de performance et de sécurité que le système avec guidage. Dans le texte européen, la notion de HUD hybride n'est pas clairement explicitée.

Il faut noter certains éléments communs entre les deux textes : ainsi tous les deux utilisent la même formule pour spécifier que les transitions (de surveillance à pilotage manuel, ou du HUD à la tête basse) ne doivent pas exiger de dons de pilotage, d'attention ou de force exceptionnels pour maintenir la trajectoire.

La comparaison des exigences explicites en Annexe 7 indique les exigences plus explicites du texte FAA, sur certains points (indication du passage des marqueurs, nécessité du guidage, affichage des sources de navigation, utilisation du HUD pour l'interception, l'arrondi et le roulage).

Enfin, les deux textes comportent la description des critères (performances) et des méthodes (statistiques) à suivre pour la certification.

3.1.2.5. HUD cat. III : FAA AC 120-28D et JAR HUDS 901

Les textes applicables aux HUD pour les opérations en catégorie 3 présentent des caractéristiques analogues aux textes pour la catégorie II.

Il convient de noter que :

- Le texte FAA traite également des opérations de décollage par mauvaise visibilité ;
- Le texte JAA s'applique uniquement aux HUD destinés au pilotage manuel ; les HUD hybrides sont abordés dans la sous partie 3 du JAR AWO. Ce dernier texte est en fait similaire dans son organisation au texte HUDS 901, il définit clairement la notion de système d'atterrissage hybride et considère le HUD comme un élément de ce système, qui doit contribuer au niveau de performance requis pour le système, sans lui-même forcément satisfaire les mêmes critères que le système primaire (le pilote automatique).

Les remarques établies à la comparaison des textes pour les opérations de catégorie II sont également valables pour ces textes, en particulier pour ce qui concerne l'organisation plus claire du texte européen et les spécifications plus précises du texte américain pour ce qui concerne les HUD hybrides (par rapport au JAR AWO).

Il faut noter a fortiori que la réglementation FAA requiert une preuve de concept pour les systèmes hybrides, en préalable à leur certification.

La comparaison des exigences explicites des deux textes en Annexe 7 indique que le texte JAR formule des exigences similaires au texte FAA. Il ne requiert pas l'indication du passage des marqueurs ni l'affichage des sources de navigation, mais en revanche il traite de la présentation d'un symbole de piste et de l'affichage du mode de l'auto manette, au contraire du texte FAA.

3.1.3. Textes américains en projet : SAE ARP 5288 et FAA working paper

Le texte de la SAE constitue un projet de réglementation américaine spécifique au HUD. Au contraire du document SAE ARP 4102/8, ce texte est destiné à servir à la certification et il couvre donc l'ensemble des questions soulevées par les HUD : de leur technologie et leur conception jusqu'à leur évaluation.

Ce texte est organisé par fonctionnalité, de façon similaire au texte FAA AC 25-11 relatif aux instruments électroniques et également, aux textes JAR HUDS.

Il comporte ainsi les grands chapitres suivants :

1. Scope
2. References
3. Display function
4. General design consideration
5. Equipment installation
6. Display visual characteristics
7. Information display
8. Information separation / Symbology presentation
9. Sources and annunciations
10. Verification considerations
11. Glossary of terms

Les principaux éléments relatifs à la constitution des symbologies et à l'évaluation des HUD sont abordés dans la suite de ce chapitre.

Le chapitre 3 distingue 3 types d'applications du HUD, un même HUD pouvant être certifié pour des applications différentes selon la phase de vol considérée :

- Supplemental use : le HUD vient en supplément de la tête basse ; il reste un instrument secondaire. Exemple : apport d'informations lors d'une approche manuelle à vue.
- Alternate use : le HUD peut être utilisé à la place de la tête basse, il constitue un instrument primaire. Exemple : surveillance d'une approche automatique qui pourrait également être réalisée en tête basse.
- Additional credit use : le HUD permet d'augmenter les capacités opérationnelles de l'avion, il constitue un instrument primaire, son utilisation revêt un caractère obligatoire pour les opérations visées. Exemple : pilotage manuel d'approches sans visibilité pour lesquelles l'avion seul n'est pas certifié, réduction de minima sous pilote automatique.

Dans les deux dernières applications, les informations de pilotage primaires doivent apparaître sur le HUD. Ces informations sont au minimum, celles de la FAR 25.1321 (basic T). Les autres informations requises sont fonction de la phase de vol, et selon que le HUD est destiné à être utilisé en surveillance ou en pilotage.

Le chapitre 4 donne notamment les critères pour l'évaluation des défaillances fonctionnelles (FHA) concernant les différentes informations affichées sur le HUD, par type d'application, et pour les différentes catégories d'opérations.

Le chapitre 6 donne des critères détaillés sur les caractéristiques optiques requises pour le HUD : précision, résolution, contrôle de la luminosité, dynamique. En particulier, le retard de la symbologie lors de manœuvres dynamiques ne doit pas dépasser 100 millisecondes. Ce chapitre aborde également les problèmes spécifiques aux HUD avec imagerie.

Le chapitre 7 traite le choix des informations et contient des adaptations des textes réglementaires aux spécificités des HUD :

- La disposition en T basique est exigée sauf preuve contraire. Des exemples de déviations acceptées sont donnés : échelle de vitesse verticale entre altitude et attitude, information de cap en bas plutôt qu'en haut, vitesse air mobile à côté du vecteur vitesse.
- Les problèmes liés aux informations de tangage sont abordés. L'horizon doit rester dans le champ.
- La présentation d'un vecteur vitesse est considérée comme essentielle. Celui-ci peut être de nature inertielle ou aérodynamique, et il est possible d'alterner selon la phase de vol.
- Les informations requises par la FAR peuvent n'être présentées que dans certaines phases de vol (*part-time display*), sous réserve de démonstration sous différents critères explicités dans ce chapitre.

Le chapitre 8 aborde notamment :

Décembre 2001

- La forme et la position des symboles ; il insiste sur l'intérêt de la standardisation.
- Le *clutter* sous les termes qualitatifs identiques à ceux de l'AC 25-11, sans critères plus précis ;
- Les moyens d'attirer l'attention visuelle et de compenser l'absence de couleurs ;
- La compatibilité entre tête haute et tête basse, qui est jugée nécessaire mais ne signifie pas nécessairement l'utilisation de présentations identiques. Des recommandations supplémentaires sont fournies.

Le chapitre 9 aborde les affichages de mode, des sources d'information et des alarmes, y compris les alarmes élaborées telles que TCAS, GPWS ou *windshear* qui doivent figurer sur un HUD utilisé en tant que moyen primaire.

Le chapitre 10 donne des considérations sur les évaluations concernant notamment la variabilité de la performance humaine, identique à celle de l'AC 25-11, la durée et le choix des pilotes pour le programme d'évaluation, les limites de la simulation, ainsi que les méthodes et critères à respecter pour l'évaluation des récupérations de situations inusuelles.

Un glossaire de notions spécifiques aux HUD achève ce projet.

La lecture de ce document appelle les commentaires suivants :

- La définition des trois types d'application vient compléter la notion de système primaire ou secondaire. Cette définition est certainement utile, en particulier pour préciser le concept d'emploi en vue de la certification.
- Le texte contient des spécifications pour la constitution de la symbologie de base pour le cas d'un HUD primaire ; des préconisations supplémentaires, à adapter selon l'opération visée, sont données pour l'utilisation comme moyen de surveillance et pour l'utilisation comme moyen de pilotage. Il est fait également référence aux autres textes applicables, en particulier aux opérations sans visibilité (AC 120-29a et 120-28d).
- Le texte aborde l'ensemble des aspects abordés lors de la certification : lisibilité, *clutter*, risques de confusion, compatibilité avec l'environnement cockpit, comportement dynamique, signalement des dysfonctionnements,... ; il donne des directives certainement utiles pour élaborer et guider le processus d'évaluation.
- Ces directives sont exhaustives mais généralement qualitatives ; elles mettent en avant l'adéquation nécessaire entre l'équipement et son contexte d'utilisation prévu ; une large latitude de jugement est ainsi laissée à l'expertise des certificateurs.

Ce projet de texte de la SAE est susceptible de combler le manque de texte général sur les HUD dans la réglementation américaine. Il est de niveau comparable au texte JAR HUDS 903, en plus complet ; il aborde l'ensemble des problèmes spécifiques au HUD en laissant une large part de jugement aux certificateurs.

Un autre projet de texte est un document de travail de la FAA sur les critères de certification des HUD. Ce texte fait référence aux documents existants de la FAA et de la SAE, dont le projet ARP 5288.

Sa raison d'être est de compléter l'AC 25-11 pour ce qui concerne les aspects spécifiques aux HUD. Il donne notamment des spécifications précises sur les points suivants : informations nécessaires, nécessité et format des échelles, affichage des limites de vitesse, récupération des attitudes inusuelles, affichages pour le décollage, compatibilité avec la tête basse, *clutter* et dynamique... Il donne également des directives concernant le processus de certification : évaluation des tâches, analyse de sécurité,...

Ce texte suscite les commentaires suivants :

- Il omet de discuter de la conformité des informations et de l'affichage du vecteur vitesse et de l'énergie, qui sont pourtant ces spécificités essentielles du HUD ;

- Le texte précise que les spécifications applicables à un HUD conçu comme instruments primaires de pilotage doivent s'appliquer également si on peut raisonnablement s'attendre à ce que le pilote utilise le HUD comme référence primaire. Cette mention semble intéressante pour pouvoir tenir compte de l'usage effectif du HUD plutôt que de se limiter à l'usage prescrit.
- Plusieurs spécifications de ce texte sont relatives à des cas précis d'utilisation (par exemple les spécifications relatives à l'affichage pour le décollage) ; elles dénotent une expérience pratique de l'utilisation du HUD qui semble fort pertinente.
- Le texte insiste particulièrement sur la prise en compte des dysfonctionnements et leur évaluation ; il note que l'affichage d'informations erronées est bien plus dangereux que la perte d'affichage.

Ce document de travail de la FAA fournit des compléments utiles à l'AC 25-11, spécifiques au HUD et issus de l'expérience pratique de la certification. Malgré quelques lacunes, ce projet de texte en complément d'un texte existant déjà harmonisé entre la FAA et les JAA présente l'avantage de sa facilité d'intégration, par rapport au nouveau texte de la SAE.

3.1.4. Synthèse sur la réglementation existante

L'analyse des **textes généraux**, non spécifiques aux HUD, ne révèle finalement que des différences minimales entre les textes américains et européens.

Ces textes, et en particulier les textes relatifs aux équipements électroniques, permettent de spécifier de façon relativement détaillée les éléments constitutifs de la symbologie de base de pilotage et de navigation.

Les **textes relatifs aux HUD** contiennent des adaptations en tenant compte des spécificités de cet instrument ; ils présentent un tableau plus contrasté, selon le type d'opération visé.

Ils indiquent l'existence d'un consensus sur les caractéristiques fondamentales des HUD :

- Affichage monochrome, collimation à l'infini et conformité avec le monde extérieur ;
- Nécessité d'une compatibilité du HUD avec la tête basse et l'environnement cockpit ;
- Les informations à présenter dépendent fondamentalement du type d'opérations (catégorie visée) et de l'utilisation (en pilotage manuel ou sous pilote automatique).

Les différences relevées entre les exigences explicites des textes américains et européens spécifiques aux HUD sont détaillées dans le tableau de l'Annexe 7, selon le type d'opération visé : toutes opérations et opérations de catégories II ou III.

Cette comparaison fait également apparaître des différences pour les exigences explicites de certaines informations, synthétisées dans le tableau suivant :

	FAA	JAA
Altitude radio sonde (toutes ops)	Recommandée	∅
Information d'énergie (toutes ops)	Recommandée	Obligatoire
Détection d'écart ILS excessifs (cat. II)	Recommandée	Obligatoire
Indication du passage marqueurs (cat. II)	Obligatoire	∅
Affichage des sources de navigation (cat. II)	Obligatoire	∅
Guidage sur ILS (cat. II manuel)	Obligatoire	Option
Affichage du mode auto manette (cat. III)	∅	Obligatoire

Ces différences tendent à indiquer que les textes FAA sont plus exigeants pour ce qui concerne les informations de guidage, tandis que les textes JAA sont plus précis pour les informations de base de pilotage. Toutefois, ces différences sont à rapprocher davantage de l'existence de textes de niveaux différents, tels que cela est montré dans l'analyse comparative par type d'opération, plutôt qu'à une différence de conception profonde dans la conception de l'utilisation des HUD.

Au delà de ces exigences spécifiques concernant les informations à présenter, il est possible de dégager deux faits marquants de la comparaison des textes relatifs aux HUD :

- La rédaction plus claire et concise des textes JAR HUDS, limités à l'utilisation des HUD par types d'opération, qui est liée à leur organisation par fonctionnalité, au lieu de l'organisation par système des textes FAA (AC 120-29a et 120-28d) ;
- Les précisions apportées par les textes FAA sur le concept d'emploi hybride, explicables probablement par la nouveauté de ce type de système dans l'histoire de l'utilisation des HUD aux USA, encore renforcées par l'exigence d'une preuve de concept pour les opérations en cat. III.

La comparaison des textes en vigueur existants révèle finalement des différences relativement minimes pour ce qui concerne la constitution des symbologies, et qui ne traduisent pas une différence profonde dans le rôle donné au HUD : les différences plus significatives sont à rechercher éventuellement au niveau de **l'interprétation** des textes.

Enfin, un effort est en cours du côté de la FAA pour combler la faiblesse actuelle de la réglementation américaine en matière de texte général sur les HUD. Les textes en projet sont constitués d'un nouveau texte SAE et d'un document de travail de la FAA destiné à compléter l'AC 25-11. Ces projets doivent être pris en considération dans le souci d'harmoniser la réglementation sur les HUD.

L'analyse de la réglementation révèle un tableau contrasté selon le type d'opération visé ; cependant, il ne fait pas apparaître de différence profonde de conception entre les textes JAA et FAA ; des différences plus significatives sont à rechercher éventuellement au niveau de l'interprétation des textes. Les textes américains actuellement en projet méritent d'être pris en considération pour l'harmonisation des règles de base sur les HUD.

3.2. Interprétation des textes pour la certification

3.2.1. Le processus de certification

Le processus de certification peut s'inscrire dans deux contextes différents :

- une certification d'avion nouveau dans lequel le HUD est un élément intégré ou une option potentielle ;
- une certification spécifiquement dédiée au HUD lorsque l'équipement est ajouté sur un avion déjà certifié sans HUD.

Ces deux contextes induisent des postulants distincts à la certification. Dans le premier cas, la démarche émane de l'avionneur, dans le second de l'équipementier.

Le postulant a la charge :

- de proposer le programme d'essai, en fonction de la base de certification fixée en accord avec l'organisme certificateur ;
- de financer le programme d'essai ;
- d'adapter le produit en fonction des remarques de l'équipe de certification.

C'est dire son rôle dans la méthodologie mise en œuvre pour la certification d'un HUD.

Dans sa globalité, la démarche correspond à un processus cyclique dans lequel une solution technologique fait l'objet d'une évaluation pour en déterminer les limites, les conditions d'inadaptation, voire les incompatibilités éventuelles avec d'autres éléments du système. Les modifications nécessaires de la solution technique en sont déduites qui donnent lieu à des adaptations techniques proposées par le postulant. La nouvelle suggestion technique subit le cycle suivant. Le but est d'optimiser la démarche en réduisant le nombre de cycles et en parcourant successivement différents supports d'évaluation : documents techniques papier, simulateur d'étude, simulateur de l'avion, campagnes d'essais en vol. Le coût croissant de la mise en œuvre des supports d'évaluation au cours de la certification oriente les investigations vers les situations

critiques les plus rarement rencontrées dans l'utilisation nominale du système mais dont la nature est cruciale au regard de la sécurité (scénarios catastrophe associant mauvaises conditions météo, pannes, erreurs humaines simulées,...).

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'activité de l'équipe de certification composée d'un duo pilote-ingénieur navigant d'essai. Ce couple est représentatif de l'accès à l'information affichée dans le HUD, en conditions de vol. En effet, le HUD est un instrument de vol très particulier en ce qu'il est dédié au commandant de bord. C'est donc un support de dialogue homme-système mais pas un support de dialogue de l'équipage.

3.2.2. Entretiens auprès des certificateurs

Des entretiens semi-dirigés avec 2 ingénieurs navigants d'essai et 2 pilotes du CEV ayant l'expérience de certification(s) de HUD ont permis de préciser les bases et les enjeux de leur intervention. Du fait de la dissociation de ces deux catégories d'opérateurs dans l'accès à l'information du HUD, des canevas d'entretien spécifiques ont été développés (Annexe 8 et Annexe 9).

Les objectifs sont définis par la réglementation, au sens large :

- Les textes réglementaires constituent le cadre de référence. Ils comportent un certain nombre de spécifications précises relatives aux symboles d'affichage. Dans la plupart des cas cependant, ils restent à un niveau de recommandation générique pour laisser place à l'innovation et ne transmettent que les principes de conception et de sécurité (c'est l'esprit de la loi).
- Les textes pré-normatifs sont systématiquement pris en compte.
- Les rapports de certification antérieurs font office de jurisprudence, tout ce qui a été certifié ne nécessitant plus de l'être à nouveau (principe de transposition).

Le caractère générique des recommandations figurant dans ces textes laisse une large part à l'interprétation des certificateurs qui s'exprime essentiellement par des options divergentes entre certificateurs :

- Certains privilégient la minimisation du *clutter* et acceptent largement toute information non explicitement affichée mais qui peut être déduite d'un ou plusieurs autres symboles du HUD.
- D'autres, et notamment les anglo-saxons, rendent impérative la figuration par un symbole dédié de toute information, conduisant à une recopie des informations des afficheurs de la planche de bord dans le HUD avant son enrichissement par des symboles dédiés. Les représentations analogiques doivent être complètement explicites, les échelles d'altitude et vitesse pouvant être jugées insuffisantes lorsqu'elles sont affichées sans graduations, par exemple.

Les entretiens ont permis d'aborder les objectifs de la certification pour ce qui concerne les symboles HUD :

- Vérifier la fiabilité des symboles (ex : cas du vecteur vitesse dont le pouvoir de prédiction sur la trajectoire n'est pas assuré au cours de la rotation ou de la remise des gaz, imposant un contrôle de l'avion basé sur l'assiette) ;
- Vérifier que le niveau de performance attendu est obtenu pour les différents types d'opérations et les conditions de vol ; le HUD est toujours évalué de façon globale en performance (critères de qualité), les dimensions FH évoquées dans la réglementation ne sont pas abordées directement (elles relèvent du domaine de l'implicite) ; le critère est limité à la capacité de réalisation de la tâche ;
- Identifier les risques d'erreur d'interprétation de symboles (statique et dynamique, limites de champ) ;
- Lutter contre le *clutter* (forme des symboles, information en ordre de grandeur déduite chaque fois qu'un symbole dédié n'est pas nécessaire [ex : assiette et incidence déduites de la position de la maquette avion par rapport à l'échelle de tangage et au vecteur vitesse], allègement)

Décembre 2001

- Étudier les conditions limites (situations inusuelles, évolution rapide et traînage de la symbologie, erreurs de paramétrage et cas de pannes) et les limites des textes réglementaires. Le centrage de la certification sur des conditions limites pose le problème des conditions d'emploi : une interface compatible des situations extrêmes peut ne pas être adaptée aux conditions habituelles.

Ces entretiens ont permis de mettre en évidence certaines limites des textes réglementaires :

- Le référentiel de pilotage pertinent n'est pas spécifié (vecteur vitesse en général mais assiette en remise de gaz) ; les transitions entre différentes phases de vol requérant des symbologies différenciées ne sont l'objet d'aucune recommandation ;
- Plus généralement, les textes donnent peu d'indication sur la philosophie d'emploi ;
- Les situations inusuelles sont peu abordées bien qu'elles semblent essentielles quant à la sécurité qu'elles mettent en jeu et à la rapidité des réactions qu'elles requièrent pour l'équipage (symbologie dédiée) ;
- Les textes donnent peu d'indications sur la population de pilotes évaluateurs (variation inter individuelle en condition nominale et intra individuelle lors d'exposition à la fatigue).

Les certificateurs attirent cependant l'attention sur les inconvénients d'une réglementation trop restrictive qui seraient une entrave à l'innovation en même temps qu'une limitation à leur libre arbitre.

Le manque de précision des textes réglementaires sur les aspects facteurs humains liés à la symbologie des HUD et à la méthodologie de certification donne une importance considérable à l'expérience acquise par le certificateur dans le domaine. L'expertise du certificateur porte essentiellement sur :

- le contexte d'emploi de la symbologie ;
- les caractéristiques de la population des utilisateurs de HUD, c'est la notion de "Pilote de référence", incluant ses capacités d'intégration de l'information, sa connaissance du système contrôlé, ses habitudes de vie, son respect des procédures, etc...
- la connaissance des pièges spécifiques à de tels systèmes ainsi que des incidents et accidents éventuellement survenus au cours de leur utilisation ;
- la maîtrise de méthodes d'évaluation (identification de critères à prendre en compte, effectif d'opérateurs, construction des scénarios, occurrence des événements, ...).

En pratique, c'est en grande partie cette expertise qui oriente vers des faiblesses suspectées de la symbologie. Il revient au programme de certification le devoir d'apporter une démonstration objective de la faiblesse.

La comparaison des avis des 2 PE sur la pertinence des symboles est synthétisée dans le tableau de Annexe 10.

La comparaison systématique des avis des pilotes évaluateurs sur les différents éléments de la symbologie met en exergue que :

- Même sur une population réduite de certificateurs, les avis sur un symbole peuvent varier en dépit d'une philosophie commune (contexte considéré, expérience, etc...) ;
- Dans un nombre important de cas, les discordances sur les avis des pilotes sont justifiées par leur modèle du pilote de référence (s'agissant de symboles qu'ils n'utiliseraient pas personnellement mais qu'un certain nombre de pilotes ont l'habitude d'exploiter compte tenu de leur expérience professionnelle, d'où nécessité qu'ils puissent trouver l'information attendue sous la forme classique)

3.3. Synthèse sur les textes existants et leur interprétation

L'analyse comparative des textes réglementaires révèle finalement des différences minimales pour ce qui concerne la constitution des symbologies ; ces différences ne traduisent pas une différence profonde entre les JAA et la FAA dans le rôle donné au HUD.

Les textes ne semblent pas comporter de lacune importante sur le fond, pour ce qui concerne les spécifications des symbologies. En revanche, la multiplicité des textes et les recouvrements existants en rendent la lecture compliquée et peu claire. De ce point de vue, l'arsenal des textes JAA apparaît mieux organisé que celui des textes américains. Les JAR HUDS 901, 902, 903 en particulier sont aisés à appréhender. La situation est moins claire pour l'utilisation des HUD de concept hybride dans les opérations avec faible visibilité, qui est couverte par différents textes dont des éléments du JAR OPS.

Un effort est d'ailleurs en cours du côté de la FAA pour combler la faiblesse actuelle de la réglementation américaine en matière de texte général sur les HUD. Les textes en projet (SAE ARP 5288 et document de travail de la FAA) utilisent une approche comparable à celle des JAA, mais ils vont plus loin dans la description des spécificités du HUD et abordent des concepts d'utilisation nouveaux, tels que l'EVS ou l'utilisation d'HUD doubles. Ils méritent être pris en considération dans le souci d'harmoniser la réglementation sur les HUD.

Les entretiens menés auprès des certificateurs révèlent des avis relativement tranchés au niveau de l'interprétation des textes. Ces avis sont liés à l'expérience personnelle, forgée en opération et lors des programmes de certifications.

Cependant, les certifications récentes ne montrent pas de différence entre les certifications FAA et JAA : les certificateurs des deux côtés acceptent des symbologies chargées. Côté JAA, les certificateurs français, rencontrés dans le cadre de cette étude et convaincus de la nécessité d'une symbologie rationnelle et dépouillée, ne sont pas forcément représentatifs de l'opinion de la majorité des certificateurs européens.

Le problème est plutôt lié à une conception du HUD comme devant comporter toutes les informations d'un PFD : un PFD transparent en somme. Cette conviction est révélatrice d'un paradoxe souvent exprimé par les pilotes, qui ne veulent pas de *clutter* mais qui souhaitent en même temps voir figurer un maximum d'informations sur le HUD pour satisfaire tous leurs besoins. Elle est aussi liée à l'ambiguïté de la dénomination de moyen primaire, qui peut être comprise soit comme le fait que le HUD devrait suffire à tout faire à lui seul, soit seulement comme une exigence établie lors de la certification concernant la fiabilité des informations présentées qui devrait être similaire à celle des instruments primaires de pilotage.

En conclusion, et dans la perspective d'un aménagement des textes JAA, les directions suivantes peuvent être proposées :

- ◆ clarifier les textes réglementaires, en regroupant les textes existants spécifiques au HUD ;
- ◆ préciser les différents concepts d'emploi et organiser les textes selon ces concepts ;
- ◆ préparer des compléments aux textes existants, concernant les concepts émergents ;
- ◆ préciser les critères et les méthodes applicables à la certification des HUD pour les aspects FH (ce dernier point est développé dans le dernier chapitre de ce rapport).

4. Les HUD en pratique

Deux grands axes ont été suivis pour accéder à des données relatives à l'usage effectif des HUD et, plus encore, à des données quantitatives ou qualitatives sur les particularités, les difficultés et faits marquants rencontrés en ligne :

- L'analyse des fiches de retour d'expérience développées dans différents contextes civils et militaires ;
- L'analyse des différentes symbologies actuellement employées. Cette analyse rassemble une description des concepts d'emploi de la symbologie, sa description et les avis de ses utilisateurs.

4.1. Analyse des sources de retour d'expérience

Plusieurs systèmes de retour d'expérience sont actuellement disponibles.

L'un d'entre eux est général et vise à recueillir les incidents spontanément et anonymement décrits par les acteurs de l'activité aéronautique. Il s'agit du formulaire diffusé, à la demande de la FAA par la NASA dans le cadre de l'Aviation Safety Reporting System (ASRS). Cet outil est ouvert à l'ensemble des activités aéronautiques militaires et civiles nord-américaines, mais ne lui est pas limité.

Deux autres banques de données ont été consultées. Elles sont militaires. L'une est celle du Bureau Sécurité des Vols de l'Armée de l'Air ; elle est intitulé Vortex et constitue un outil de retour d'expérience anonyme et spontané des incidents rencontrés. La seconde base consultée est celle de l'IMASSA : Baséac. Elle rassemble les analyses des aspects facteurs humains des accidents de l'Armée de l'Air.

Enfin, une autre source d'information a été consultée : il s'agit de l'analyse des vols d'Air France et des retours d'expérience de cette compagnie qui utilise une flotte d'environ 40 appareils équipés de HUD.

Les résultats ci-dessous sont la synthèse des éléments d'informations obtenus.

4.1.1. ASRS

À la suite d'une interrogation de la banque de donnée ASRS (ASRS, 2001), il apparaît que depuis 1990, 16 fiches seulement (parmi près de 100 000 fiches disponibles dans cette banque de donnée) présentent une référence au HUD. Une synthèse de ces fiches est proposée en Annexe 11.

A titre indicatif, le formulaire mis à disposition offre la possibilité de spécifier si l'appareil est équipé de FMS/FMC et d'EFIS mais il n'offre pas la possibilité de mentionner la présence d'un HUD.

En dix ans d'activité aérienne, c'est donc un nombre infime de faits qui sont rapportés à propos des HUD. De plus, ces références sont loin d'être homogènes :

- Pour 8 de ces fiches, il n'y a aucune incidence du HUD sur l'événement. Le HUD est, au plus, cité comme étant utilisé par le pilote ;
- Pour 2 fiches, les pilotes se félicitent d'avoir disposé d'un HUD lors de l'incident rapporté (vents très turbulents et évitement d'un autre appareil en face à face sur la piste au décollage) ; le bénéfice résulte essentiellement de la possibilité d'avoir un pilotage fin de la trajectoire dans une circonstance particulière.
- Dans 1 cas, le pilote mentionne le HUD pour regretter son absence.
- Seuls les 5 cas restants font état de problèmes rapportés à l'utilisation du HUD ou aux conséquences de son usage.

Les différents problèmes peuvent être structurés en plusieurs groupes :

A l'insu du pilote, la symbologie ne rend pas compte de la réalité attendue et il ne s'en rend compte que tardivement:

- (1) Sur un avion de combat, suite à une panne de générateur de symbole en montée, les informations affichées sur les tubes cathodiques et le HUD sont figées ; le pilote ne peut éviter un décrochage à vitesse nulle.
- (2) Le PF à bord pense que son approche est contrôlée au HUD par le PNF (CDB). En fait ce contrôle est passif et ne permet pas de détecter une erreur du PF quant au réglage du mode d'affichage. Les informations constantes trompent le pilote sur la qualité de son approche.

La disparition d'un symbole prive le pilote d'une information attendue importante pour une phase de vol :

- (3) La mise du HUD en test lors d'une approche en cat III prive le pilote d'information détaillée jusqu'à 500 pieds.
- (4) Disparition d'un symbole d'alignement lors d'un atterrissage ; l'appareil passe en dessous des minima pour cette phase de vol.

Le traitement des informations du HUD focalise l'attention du pilote et ne lui permet pas de détecter l'incohérence d'informations reçues :

- (5) Le FO considère que le HUD a focalisé l'attention du cpt (PF) lors d'une remise de gaz imposée par le contrôle ; celui-ci n'a pas construit une représentation assez cohérente de la situation ; une alarme TCAS. (Cette imputation pourrait tout autant être attribuée à la densité de la situation à gérer le pilote : remise de gaz due au contrôle, information incomplète de celui-ci...).

Il n'est pas possible d'évaluer le degré de représentativité et d'exhaustivité des faits rapportés sur les difficultés liées à son usage. Il semble, à l'opposé, que cette absence de données oriente plutôt vers deux interprétations à propos de l'usage des HUD : soit ils ne posent effectivement pas de problème aux pilotes soit ils ne sont que très peu utilisés.

4.1.2. Baséac

L'utilisation du HUD n'est citée dans aucun accident de cette base de données d'accidents de l'Armée de l'Air.

4.1.3. Vortex

La base Vortex, qui regroupe les rapports volontaires d'événements survenus dans l'Armée de l'Air, ne permet pas aujourd'hui de recherche fine sur l'implication du HUD dans un événement aérien.

Dans le domaine de l'aviation militaire, le HUD est cependant cité dans deux événements :

- en tant que facteur aggravant d'une situation au cours de laquelle un pilote de Mirage 2000 a été victime d'illusions sensorielles lors de la rotation au décollage de Mérignac ;
- en tant qu'équipement pouvant rendre difficile la récupération de situations inusuelles, lors d'une perte de contrôle par désorientation spatiale sur un Mirage F1 au-dessus de la mer.

4.1.4. Analyse des vols d'Air France

Le service d'analyse systématique des vols à Air France ne dispose pas d'éléments de retour d'expérience sur l'utilisation du HUD. Cependant il faut noter l'absence de moyen systématique de mesures : la présence ou non du HUD n'apparaît pas dans les champs caractérisant les enregistrements utilisés pour l'analyse systématique des vols, ce qui empêche par exemple la recherche de corrélation entre des événements aériens connus, tels que les approches non stabilisées, et l'utilisation du HUD.

Il est clair en tous cas aujourd'hui que le HUD n'est pas une préoccupation en termes de sécurité.

Pour ce qui concerne les rapports volontaires, il existe sûrement une réticence de la part des pilotes à rapporter des difficultés qui concernent souvent le pilotage de base : le pilote de ligne ne dira pas volontiers que le pilotage manuel est trop difficile, même si la difficulté provient en réalité d'un défaut d'interface plutôt que de son habileté de pilote.

Les sources de retour d'expérience fournissent très peu d'indicateurs négatifs sur l'impact du HUD sur la sécurité. Ceci peut s'expliquer autant par le peu de moyens d'observation disponibles que par l'absence effective de difficultés profondes avec les HUD existants en matière de sécurité.

4.2. Revue de HUD existants et avis des utilisateurs

4.2.1. Méthodologie

Cette revue des HUD en pratique est organisée selon les trois concepts de HUD décrits précédemment en fonction du critère d'usage de référence établi par les certifications:

- **HUD Surveillance** : surveillance optionnelle des automatismes en atterrissage en cat. IIIb,
- **HUD Hybride** : surveillance obligatoire permettant de reprendre en pilotage manuel en cas de défaillance en catégorie IIIa/b
- **HUD Manuel** : permettant l'approche en pilotage manuel en cat. IIIa.

Cette catégorisation repose, rappelons-le, sur l'usage dans les situations les plus contraignantes pour lesquelles il y a eu certification. Il apparaît à l'usage que ces HUD sont évidemment utilisés dans d'autres conditions de vol, en VMC par exemple, pour affiner l'atterrissage.

Nous avons pu obtenir un ensemble de données techniques sur la symbologie et/ou les modes d'usage de HUD représentatifs de ces grands concepts (Annexe 12).

Le tableau ci-dessous rassemble, selon leur concept, les HUD pour lesquels ces données ont été recueillies et les types d'appareils utilisant ces HUD, dont *en italiques*, ceux pour lesquels nous avons pu obtenir des informations sur l'usage en compagnie ; entre parenthèses figurent les organismes et les dates de leur certification.

HUD Surveillance	HUD Hybride	HUD Manuel
HUD Sextant (DGAC 1989) <i>A320 d'Air France</i>	HFDS Sextant MD 82 d'Alitalia (RAI 1997), <i>B737 de l'Aéropostale</i> (DGAC 1995)	VGS BAe Systems B737 NG (FAA JAA 1997 ?) HGS Flight Dynamics B737 NG (FAA JAA 1997 ?) <i>CRJ Brit'Air (FAA JAA 1995)</i>

Pour chaque concept de HUD, la méthodologie appliquée consiste à :

- Présenter le concept d'emploi de ce HUD.
Pour chaque HUD, il est possible d'identifier le concept d'emploi, parmi les concepts pilotage, hybride et surveillance, selon l'utilisation prescrite dans le guide pilote. La principale justification à l'origine de l'utilisation de ce HUD est également précisée.
- Décrire sa symbologie.
Ce chapitre présente un exemple type de la symbologie et une description succincte de ses principales caractéristiques, sans rentrer dans le détail de ses éléments constitutifs qui est abordé lors de l'analyse comparative des symbologies.
- Recueillir l'avis d'utilisateurs de ces HUD au sein des compagnies équipées.
Pour recueillir l'avis d'utilisateur sur ces HUD une enquête au sens strict du terme (consultation d'un groupe de personnes représentatives ou même de l'ensemble de la population concernée) aurait représenté une charge excessive, nous avons donc demandé aux compagnies exploitantes à rencontrer un pilote instructeur qu'elle nous a désigné. Cette fonction est intéressante puisqu'elle conduit la personne à connaître ce système et à en apprécier le degré d'usage parmi les pilotes suivis. L'avis des pilotes rencontrés a été recueilli au moyen d'entretiens semi-dirigés sur la base d'un canevas reproduit en Annexe 13.

4.2.2. Symbologie de type surveillance (HUD A320)

4.2.2.1. Concept d'emploi

Le HUD Sextant de l'Airbus 320 relève du concept de surveillance.

Historiquement, ce HUD a été certifié en 1989 comme un HUD hybride pour permettre les approches automatiques en catégorie IIIb, avant l'extension de la certification de l'avion sans HUD pour ces approches.

Actuellement, son utilisation est optionnelle pour les équipages de la compagnie Air France, et la comparaison avec les autres HUD actuels le classent sans conteste dans le type surveillance.

4.2.2.2. Description de la symbologie

La symbologie du HUD de l'A320 est essentiellement dédiée à la surveillance des approches automatiques en cat. IIIb.

Un exemple typique de la symbologie en approche ILS est représenté sur la figure 4.

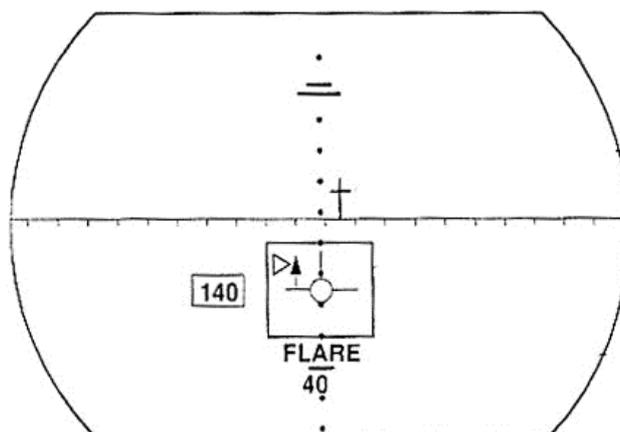


Figure 4 : exemple de symbologie de surveillance (HUD A320)

Cette symbologie est dépouillée ; elle ne présente que les informations requises pour cette tâche. La tâche de surveillance consiste à vérifier que le vecteur vitesse reste à l'intérieur du carré d'écart ILS excessifs ; dans le cas contraire, une remise de gaz est généralement ordonnée.

Cette symbologie présente un certain nombre de particularités :

- absence d'indication du cap, échelle de cap non graduée ;
- absence d'affichage de l'altitude barométrique
- échelle de tangage en pointillés ;
- écart de vitesse symbolisé par un chevron et accélération par une flèche.

Des symbologies spécifiques existent aussi pour les approches à vue, le roulage à l'atterrissage et au décollage.

4.2.2.3. Avis des utilisateurs

Personne rencontrée

La personne désignée par la compagnie Air France est Instructeur Pilote de Ligne depuis 8 ans. Elle a auparavant volé sur Caravelle puis sur Mercure. Depuis environ 10 ans elle vole sur A 320 équipé de HUD.

Historique du HUD dans la compagnie

Une quarantaine d'appareils de la famille 319/320/321 sont équipés de HUD. Ils avaient été commandés ainsi par Air Inter en 1988 pour assurer une continuité à l'emploi de HUD sur les Mercure de cette compagnie. Cette flotte est aujourd'hui regroupée pour les vols effectués à partir d'Orly.

Sur le Mercure, les minima d'approche certifiés étaient, avec HUD, de 35 pieds de DH et 125 mètres de RVR.

Décembre 2001

Sur l'A320, la certification a été portée, en 1989, à 20 pieds de DH et 75 mètres de RVR. Depuis, Airbus a obtenu la certification de l'avion, avec des minima identiques, sans HUD.

Utilisation préconisée dans la compagnie

Les fonctions suivantes sont mises en avant par la compagnie :

- Aide au guidage au sol pour décollage par visibilité réduite
- Aide aux approches à vue
- Surveillance des approches de catégorie IIIa et b
- Surveillance de la vitesse et de la décélération (sélectionnée et réelle) pendant le roll out automatique
- Aide au roulage à l'atterrissage en cas de roll-out manuel et surveillance de la vitesse et de la décélération.

Au sein de la division A320 Air France, n'ayant qu'une partie de la flotte munie de HUD, toutes les procédures de vol, hormis le décollage LVP, ne font que préconiser son utilisation lors des approches, manuelles ou automatiques.

Le tableau ci-dessous décrit les formes d'utilisation en fonction du contexte ainsi que les restrictions d'usage.

Utilisation dans la compagnie :	Opération									
	taxi	déc.	crois.	appr. VMC	appr. cat. I	appr. cat. II	appr. cat. III	remise de gaz	panne moteur	sit. inus.
Obligatoire	NP	M**								
Recommandée*	NP			M	M	S	S		NP	NP
Possible	NP		M S***						NP	NP
Interdite	NP							M et S	NP	NP

M pour pilotage manuel, S pour surveillance des automatismes, NP : usage non prévu

* Pour les approches automatiques recommandée seulement car toute la flotte n'est pas équipée.

** Pour les opérations par faibles visibilités RVR =75m et 100m jusqu'à la rotation.

*** Pour la séparation par rapport aux masses nuageuses.

La seule restriction d'usage rapportée concerne la rotation et la remise de gaz pour laquelle le HUD est interdit du fait d'un défaut constaté pour le repère d'assiette : l'échelle de tangage n'est pas graduée. Comme la présentation de la pente sol est l'élément de pilotage dans le plan vertical, la prise d'assiette au décollage ou en remise de gaz n'est pas satisfaisante.

Usage effectif

Au vu de ce seul entretien, il n'est guère possible de dresser un tableau généralisé de l'usage effectif du HUD en ligne.

Il semble être tout à fait employé dans sa logique de surveillance pour les différentes formes de pilotage en vol et au sol en condition IMC de catégorie III.

Cette surveillance avec HUD présente l'avantage de pouvoir intégrer la vision de l'extérieur pour renforcer la cohérence constatée entre les actions des automatismes sur la trajectoire et le monde extérieur.

Quelques limitations de cette symbologie ont été mentionnées dans des circonstances où le HUD pourrait être employé pour du pilotage de trajectoire (et faire ainsi plus que de la surveillance) :

- l'inclinaison est difficile à percevoir précisément ;
- la valeur du cap n'est pas présentée (bien qu'élément du T basique) ;
- l'échelle de tangage n'est pas graduée ; son utilisation peut prêter à confusion d'où la limitation imposée à l'usage du HUD lors des rotations .

Réponse aux besoins

La symbologie présentée est limitée à l'essentiel. Le fait que la symbologie soit dépouillée :

- favorise la vision de l'extérieur ;
- évite la dispersion des modes d'usage ;

- évite de manquer la disparition d'un symbole critique (défaillance système).

Il est ainsi possible de maintenir le pilote dans la boucle de pilotage lors des approches automatiques, d'apporter des éléments de pilotage améliorant la sécurité des vols en phase de vol à vue.

Le gain lié à la réduction des minima concerne seulement le décollage avec 75 m de RVR, au lieu de 125 m sans HUD : il n'apparaît pas économiquement quantifiable. En effet, les décollages dans ces conditions de visibilité restent exceptionnels : le pilote interrogé n'a eu l'occasion d'en pratiquer que 2 ou 3 en 10 ans...

L'abaissement des minima est aussi une possibilité intéressante pour des approches sur terrains ayant des balisages réduits (tels que Brest ou Biarritz).

Problèmes de formation

Le HUD étant en place gauche, seuls les commandants de bord peuvent l'utiliser. Son apprentissage est intégré à la qualification de type, d'abord en conditions de vol à vue pour familiarisation, puis lors de la formation aux opérations LVP.

Initialement, certains commandants de bord ont quelques difficultés car ils se focalisent trop sur la symbologie. Un point capital de la formation est le réglage de l'intensité lumineuse, qui doit être au minimum.

Pour le maintien périodique des compétences, tous les CDB doivent renouveler leur qualification HUD au simulateur de vol. Pour ce faire les quatre simulateurs A320 de la compagnie ont été récemment équipés. Le HUD est la seule nouveauté par rapport à l'avionique que les CDB connaissent déjà en tant que copilotes. Il n'y a donc pas de difficulté au niveau du pilotage de base. Les vols simulés pour la qualification consistent en 3 ou 4 approches et décollage. Ces simulations n'intègrent pas la présence éventuelle de trafic.

Populations et habitudes

L'appréciation de l'aide apportée par le HUD est, bien sûr liée, à l'habitude de son utilisation. La majeure partie de la population issue de l'ex Air Inter l'utilise. Pour les CDB d'origine Air France, certains ont pu intégrer le HUD dans leur circuit visuel.

Les CDB habitués au HUD se sentent généralement moins à l'aise sans HUD. Il existe également bien sûr un attachement affectif au HUD qui était une particularité d'Air Inter.

Bénéfice pour la sécurité et suivi des opérations

Sur les appareils de nouvelle génération (*glass-cockpit*), il est fréquent de constater la polarisation de la vision des 2 pilotes sur les instruments PFD et ND, au détriment de la vision extérieure en condition de vol à vue. L'utilisation du HUD permet au CDB de garder la vision extérieure tout en ayant des éléments de pilotage très précis dans son champ visuel. Ceci est loin d'être négligeable, surtout lors d'approche sur des aéroports à fort trafic.

Pour l'A320, la présentation de la hauteur radiosonde à partir d'environ 8000 pieds est un point important dans la prévention des CFIT, alors que cette information n'est présentée sur les PFD qu'à partir de 2500 pieds.

Le HUD peut contribuer à éviter un incident. Par exemple, en condition VMC, la détection des gradients de vent à basse hauteur est anticipée par la visualisation permanente de l'énergie totale. Il est ainsi possible d'interrompre des approches de façon préventive.

Le suivi de la régularité des opérations en catégorie III ne prend pas en compte le cas des atterrissages avec HUD. Le gain de précision sur le suivi de la trajectoire est sûrement effectif mais inobservable actuellement. Il n'est donc pas possible de fournir des évaluations chiffrées (par exemple, proportion de décollage et d'atterrissages réalisés avec le HUD et qui n'auraient pas été possibles sans).

Le maintien en service du HUD sur une partie de la flotte seulement, est un signe positif vis à vis d'un système dont la justification économique est difficile, mais qui apporte une aide à la sécurité des vols.

Améliorations souhaitées

Il pourrait être intéressant de présenter sur le HUD les ordres en assiette pour gérer les évitements en vertical (d'origine TCAS ou GPWS) ou en cas de *windshear*.

Une représentation en coupe du relief en avant, à l'aide des informations données par la data base de l'EGPWS, pourrait mieux informer en cas d'alerte. De même, un affichage en coupe du radar météo permettrait d'évaluer la marge par rapport au noyau du nuage à éviter.

Le champ visuel réduit (10° en site) rend la surveillance en approche à vue par vent de travers peu réaliste (les paramètres sont toujours présentés en bordure de glace et le vecteur vitesse clignote). L'élargissement du champ visuel serait nécessaire.

Perspectives d'emploi

Pour la partie non équipée de la flotte existante, il n'est pas prévu de rétrofit.

L'utilisation du HUD ou de son évolution future pourrait être envisagée sur les futurs avions.

4.2.3. Symbologie de type hybride (HFDS B737 et MD82)

4.2.3.1. Concept d'emploi

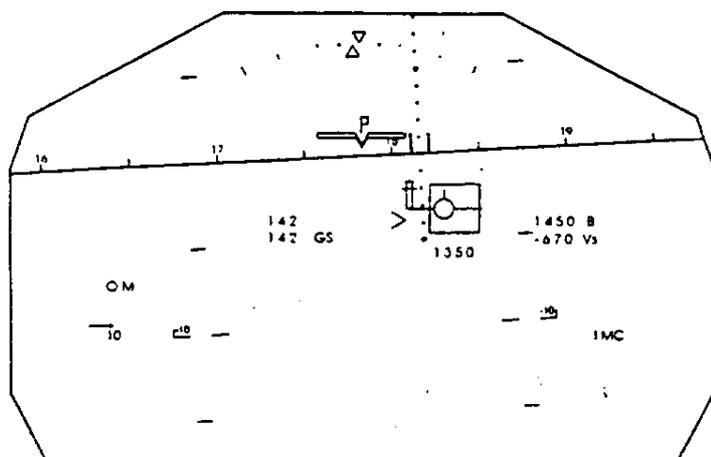
Le HUD Sextant équipant les B737 de l'Aéropostale ou les MD-82 d'Alitalia est de type hybride.

Il est certifié pour les approches en cat. IIIb, alors que l'avion sans HUD n'est certifié que pour la cat. IIIa.

L'utilisation de ce HUD permet également une réduction des minima au décollage.

4.2.3.2. Description de la symbologie

Une présentation typique de cette symbologie lors d'une approche ILS sous pilote automatique est reproduite en Figure 5.



Symboles principaux :

- Vecteur Vitesse
- Horizon
- Cap Magnétique Piste (échelle verticale)
- Carré "écarts excessifs ILS"
- Pente potentielle et écart de vitesse.

Figure 5 : Symbologie HFDS Sextant pour le B737.

Cette symbologie dépouillée présente les caractéristiques suivantes :

- un vecteur vitesse autour duquel sont affichées les valeurs numériques du T basique ;
- un horizon gradué et une échelle de tangage minimale ;
- le cap de la piste et le carré d'écart d'ILS dans lequel doit se trouver le vecteur vitesse si l'approche suit le faisceau ILS ;
- un chevron de pente totale et un thermomètre d'écart de vitesse qui permet de surveiller le travail de l'automanette pour maintenir la vitesse sélectionnée.

4.2.3.3. Avis des utilisateurs

Personne rencontrée

La personne rencontrée pour l'Aéropostale est commandant de bord et instructeur en simulateur. Le matériel employé est le HFDS Sextant qui équipe le poste CDB sur les B737-300 de l'Aéropostale.

Historique du HUD dans la compagnie

Les HUD sont utilisés à l'Aéropostale depuis leur certification en octobre 1995. La compagnie a participé à la certification. Une difficulté rencontrée lors de la certification de ce HUD a concerné le manque d'incitation au pilotage en assiette lors de la remise de gaz avec panne moteur : une symbologie spécifique (échelle de tangage en X ou « sapin ») a alors été développée.

Utilisation préconisée dans la compagnie

Le HUD est utilisé sous 2 modes distincts : soit en surveillance du PA en IMC (usage hybride, avec reprise éventuelle en manuel si écart excessif à la trajectoire), soit en moyen primaire en VMC (information pour le pilotage manuel).

En IMC, le HUD est certifié jusqu'à la cat. IIIb. Il permet une réduction des minima :

	sans HUD	avec HUD
au décollage	RVR 125 m	RVR 75 m
à l'atterrissage	RVR 200 m (cat IIIa)	RVR 125 m (cat IIIb)

Usage effectif

En pratique la réduction des minima est relativement peu intéressante car ces conditions sont rarement rencontrées dans les opérations de l'Aéropostale.

Toutefois, il faut noter que le HUD est utile aussi en VMC :

- pour éviter la désorientation en vol de nuit au dessus de l'eau.
- pour mieux calibrer/stabiliser l'approche dans des conditions dégradées (exemple: approche décalée sur piste en travaux).
- pour évaluer la capacité de monter grâce à la pente potentielle (en remise de gaz, en croisière pour passer un cumulonimbus, en cas de panne moteur pour passer une colline).

Problèmes de formation

Diverses circonstances sont évoquées à propos de la formation initiale et de la familiarité pour l'usage du système : la confusion entre le vecteur vitesse et l'assiette est "classique", notamment lors de la capture de pente au décollage.

Il peut y avoir une difficulté de compréhension de la symbologie de remise de gaz si on n'y est pas entraîné.

Une autre difficulté rencontrée concerne l'accoutumance d'anciens pilotes de Mercure car le vecteur vitesse présenté sur ce HUD est relatif à la vitesse sol et non pas à la vitesse air comme sur le Mercure.

Populations et habitudes

Une requalification pour utiliser le HUD est intégrée dans la requalification cat. IIIb que les pilotes repassent tous les 6 mois. Les pilotes adeptes du HUD n'ont pas de profil particulier.

A l'arrivée des HUD dans la compagnie, la consigne initiale était que tous les équipages de la compagnie utilisent les HUD. Aujourd'hui, l'utilisation des HUD est limitée à quelques pilotes plus convaincus. Cette dérive est liée au faible nombre de HUD disponibles : 15 seulement ont été livrés, il y a eu des pannes relativement fréquentes (mécanique du combiner, boutons de commande) avec des délais de réparation importants car il s'agit d'une petite série.

Bénéfice pour la sécurité et suivi des opérations

Ce point n'est pas l'objet d'un suivi particulier dans la compagnie. Les points de performance cités concerne des contextes d'usage en VMC pour lesquels l'information produite par les HUD est un appoint significatif.

Améliorations souhaitées

Le concept et la symbologie de ce HUD apparaissent tout à fait satisfaisants pour l'emploi prévu. Le réglage automatique de la luminosité pourrait être amélioré pour éviter les risques de masquage du balisage par faible luminosité.

Perspectives d'emploi

L'évolution de l'emploi du HUD au sein de la compagnie est à envisager dans le cadre de son intégration à Air France.

4.2.4. Symbologie de type manuel (HGS sur B737 NG et CRJ, VGS sur B737 NG)

4.2.4.1. Concept d'emploi

Les HUD proposés par Flight Dynamics et BAe Systems sont de concept manuel. Ils sont essentiellement destinés à servir de moyen de pilotage indépendant. Ils disposent de différents modes de symbologie afin de couvrir l'ensemble des phases de vol.

Utilisés obligatoirement en pilotage manuel pour les approches en catégorie IIIa, ils affichent un directeur de vol animé selon une loi propre au HUD, redondante avec la loi du directeur de vol de l'avion qui est utilisée pour la surveillance par le copilote. Ces HUD sont *monitorés* : ils disposent de fonctionnalités de surveillance élaborées, pour la détection des défaillances de capteurs et pour la surveillance du suivi de la trajectoire.

Ces HUD peuvent également être utilisés pour la surveillance du pilote automatique, pour les phases où son utilisation est autorisée.

4.2.4.2. Description de la symbologie

Les symbologies typiques de ces HUD dans les modes primaire et approche en catégorie IIIa est reproduite en Figure 6.

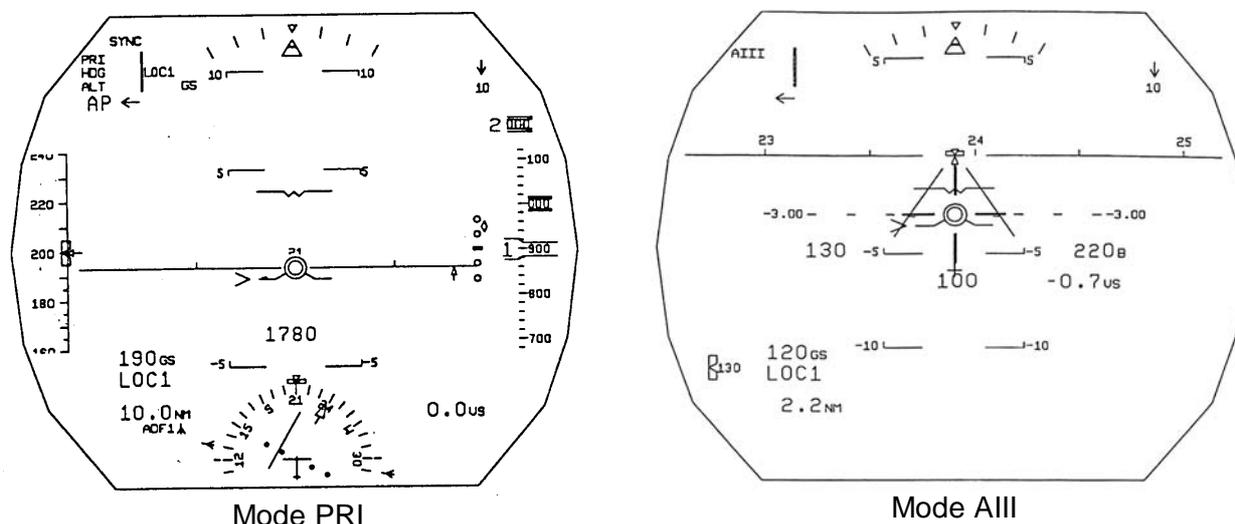


Figure 6 : Symbologies typiques des HUD de concept manuel (HGS du CRJ).

Ces symbologies sont très complètes. Elles présentent notamment les particularités suivantes :

- en mode croisière, des échelles de vitesse et d'altitude avec limitations et valeurs sélectionnées, analogues aux échelles présentées sur les PFD, ainsi qu'une rose de cap (HSI) ; ces éléments disparaissent en mode d'approche en catégorie III ;
- des indications complètes sur les modes du pilote automatique et les sources de navigation ;
- un directeur de vol, petit rond sur lequel il faut placer le vecteur vitesse, ainsi que les informations brutes de positionnement sur le faisceau ILS.

La symbologie d'approche en catégorie III est généralement dépouillée par rapport à la symbologie primaire ; seul le HUD proposé par BAe laisse au pilote le choix d'un affichage dépouillé (mode *decluster*).

4.2.4.3. Avis des utilisateurs

Personne rencontrée

Le pilote rencontré est commandant de bord et instructeur sur CRJ. Il a été pilote militaire sur Mirage III puis sur Mirage 2000 pendant 6 ans. Il en garde un fort attachement à l'utilisation du HUD.

Historique du HUD dans la compagnie

Brit'Air possède des CRJ 100 depuis 1995. En 1996, tous les CRJ de la compagnie ont été équipés de HUD (modèle HGS 2100 de Flight Dynamics).

Le concept d'utilisation était nouveau en Europe (cat. IIIa en pilotage manuel) lors de la certification. La compagnie n'a pas participé à la conception du HGS mais elle s'est largement impliquée dans sa certification : les procédures proposées par le constructeur ont été adaptées pour la compagnie, mais la symbologie n'a pas été modifiée.

Aucune compagnie outre-atlantique n'exploite ces HUD, le constructeur (Bombardier) est donc peu intéressé par cet équipement au marché limité. Ceci explique que le HGS n'ait été approuvé jusqu'alors que pour les opérations en approche classique jusqu'au roulage (modes PRI et cat IIIa). L'extension de sa certification aux autres modes est cependant en cours.

Utilisation préconisée dans la compagnie

Dans la compagnie, tous les CdB de CRJ sont qualifiés pour l'utilisation du HUD en catégorie IIIa. Cette utilisation est obligatoire en dessous de 300 mètres de RVR et jusqu'à 200 m/50 ft de DH. L'utilisation du HUD est recommandée pour la plupart des phases de vol et notamment en entraînement à la cat. III.

Le tableau ci dessous résume l'utilisation du HUD, avec M pour manuel ou S pour surveillance :

Utilisation dans la compagnie :	Opération									
	taxi	déc.	crois.	appr. VMC	appr. cat. I	appr. cat. II	appr. cat. III	remise de gaz	panne moteur	sit. inus.
Obligatoire							M			
Recommandée	M	M*	M/S	M/S	M/S	M/S		M	M	M
Possible										
Interdite										

* uniquement comme aide dans les décollages à vue.

Usage effectif

En pratique, le HUD reste peu utilisé, sauf pour les approches en cat. III où il est obligatoire.

Il y a là un problème, car il est préférable d'être habitué à son utilisation.

Noter que si on ne pilotait qu'au HUD (cas du Mirage 2000), on pourrait éprouver des difficultés à revenir au pilotage classique en tête basse en cas de défaillance du HUD, qui rend le pilotage facile.

Problèmes de formation

L'apprentissage est réalisé en simulation, en commençant par des approches en VMC jusqu'aux approches en cat. III. Il ne pose pas de problème car l'utilisation du HUD est facile. La focalisation excessive sur la symbologie est évitée grâce à un entraînement régulier et en réglant la brillance au minimum, pour éviter qu'elle gêne la vision extérieure.

Populations et habitudes

Les pilotes apprécient différemment le HUD selon leur expérience et leur âge. En pratique, le HUD reste peu utilisé, sauf pour les approches en cat. III où il est obligatoire.

Les pilotes en sont satisfaits (même s'il n'est pas toujours utilisé).

Les jeunes sont souvent plus motivés pour utiliser cet équipement; ils s'adaptent plus aisément aux automatismes. Les pilotes en provenance de l'Armée de l'Air arrivent convaincus de l'intérêt du HUD. Les anciens n'apprécient pas toujours de changer d'habitudes.

La ligne sur laquelle les pilotes opèrent n'a pas d'influence (Brit'Air se consacre au transport en Europe dans la catégorie des avions de 50 à 100 places, pour l'acheminement vers les vols long courrier).

Bénéfice pour la sécurité et suivi des opérations

Le gain est difficilement quantifiable : les approches avec moins de 300m de visibilité (pour lesquelles l'utilisation du HUD est obligatoire) restant rares. Les taux de déroutement ou de décollage reporté sont très faibles. Il n'est pas possible de fournir des évaluations chiffrées (par exemple, la proportion de décollage et d'atterrissages réalisés avec le HUD et qui n'auraient pas été possibles sans).

Le suivi est assuré par des fiches que l'équipage doit remplir à l'occasion de chaque approche en catégorie III. Brit'Air dispose d'un service d'analyse des vols mais aucune étude spécifique sur l'utilisation du HUD n'a encore été réalisée. Il est donc difficile de donner des exemples d'incidents ou de difficultés réels liés à l'utilisation du HUD.

Les effets bénéfiques du HUD sur la sécurité sont évidents pour la surveillance du trafic extérieur (avions légers ou autres avions de transports).

NB : le danger vient du trafic plus lent; la vitesse maximale est limitée à 250 noeuds en dessous du niveau 100 afin de limiter les écarts de vitesse entre avions. La responsabilité de l'anti-collision en VMC incombe toujours au bord.

Les avantages du HUD sont notamment :

- La facilité et la précision de pilotage.
- La transition aisée du pilotage IMC à VMC, puisqu'on est déjà en pilotage tête haute.
- La meilleure surveillance de l'extérieur (sans HUD, un défaut souvent rencontré est de ne pas regarder suffisamment à l'extérieur).

Les pièges possibles que le CDB doit connaître sont :

- d'être aveuglé par la symbologie si le réglage de la brillance est trop fort ;
- de suivre le directeur de vol avec un pilotage trop nerveux : c'est fatiguant à la longue ;
- de ne pas garder de recul sur le fonctionnement (connaître les pré-affichages, veiller à la cohérence globale des informations, rôle de l'OPL pour la vérification).

Améliorations souhaitées

La symbologie actuelle est satisfaisante, aucune modification ne semble souhaitable.

L'utilisation de la couleur pourrait renforcer encore la similarité avec le PFD.

Actuellement, il peut arriver de se perdre au sol : il pourrait être intéressant de disposer de guidage sur les taxiways ou d'une visualisation améliorée.

Perspectives d'emploi

La compagnie est satisfaite des HUD, même s'ils ne sont évidemment pas la première préoccupation dans le contexte de concurrence actuel.

La difficulté est que le HUD n'est pas toujours suffisamment utilisé par les pilotes : c'est une affaire d'habitude de pilotage.

L'équipement HUD n'est pas envisagé sur les avions anciens de la compagnie en raison du coût.

En revanche, il est prévu sur les nouveaux CRJ 700.

4.3. Analyse comparative des symbologies existantes

4.3.1. Méthodologie

La comparaison systématique des symbologies a porté sur les éléments suivants, choisis pour leur pertinence liée à la sécurité :

- 3 types de phases de vol : l'approche en catégorie III, le roulage avant le décollage et le roulage après l'atterrissage,
- 2 types de transition entre phases de vol : la remise de gaz et la rotation,
- les présentations d'informations relatives à des fonctions particulières et/ou élaborées : situations inusuelles, symbologies hors champ, WINDSHEAR , TCAS, GPWS.

Les symbologies comparées sont celles présentées dans le paragraphe 4.2.

Ces symbologies ont été comparées en tenant compte de leur utilisation prévue au niveau de la conception et de la certification. Deux groupes ont été distingués :

- les symbologies destinées au pilotage manuel (HUD manuel) pour le VGS Baé du B 737NG, le HGS Flight Dynamics du B 737NG et le HGS Flight Dynamics du CRJ,
- les symbologies utilisées pour la surveillance du PA (HUD hybride ou de surveillance) pour le HFDS Sextant des B737/MD82 et le HUD Sextant de l'A320.

Les documents techniques ayant permis d'établir les comparaisons sont référencés en Annexe 12 de ce rapport.

4.3.2. L'approche en catégorie III

L'utilisation du HUD pour effectuer des approches par faible visibilité est une des raisons essentielles de l'installation de ce type d'équipement sur les avions de transport civils, ce qui nous a conduit à approfondir l'étude de la phase approche cat. III.

L'Annexe 14 présente les symbologies utilisées pour réaliser la comparaison et les résultats obtenus. Cette annexe comporte trois parties :

- a) la présentation des 6 symbologies HUD ayant servi à l'élaboration de la comparaison,
- b) le tableau de synthèse des présentations adoptées sur chacun des HUD,
- c) le tableau d'identification, pour chacun des deux groupes de HUD, des symboles qui figurent sur tous les HUD (base commune) et de ceux qui sont particuliers (et éventuellement allégeables) à l'un des HUD considéré.

Ces tableaux font clairement apparaître des différences considérables selon le concept d'emploi du HUD :

- Pour le pilotage manuel, le HUD est un moyen primaire de pilotage présentant la plupart des informations de pilotage et de navigation de la tête basse. La base commune entre les trois symbologies comparées est largement partagée, ce qui indique un consensus entre les équipementiers sur les symboles nécessaires (ou demandés par les certificateurs ou par l'avionneur...). Les différences se limitent à des détails qui sont la marque de chaque équipementier (forme du vecteur vitesse et du symbole de piste, présentation du dérapage, indicateur d'incidence, affichage de la valeur de la DH,...).
- Pour le concept hybride et a fortiori pour celui de surveillance du pilote automatique, la présentation est dépouillée, et limitée aux informations juste nécessaires pour permettre la surveillance. La symbologie repose essentiellement sur les symboles spécifiques, conformes et intuitifs du HUD pour faciliter le suivi de la trajectoire. La base commune est plus réduite que dans le cas du pilotage manuel : ceci traduit la différence d'ancienneté des deux symbologies comparées, et l'évolution du concept surveillance au concept hybride de la part de l'équipementier concerné.

4.3.3. Le roulage

L'Annexe 15 présente le résultat de la comparaison des symbologies pour les phases de roulage avant décollage (take-off roll) et après atterrissage (roll out).

Comme pour la phase d'approche, les différences majeures constatées lors de la comparaison des symbologies de roulage apparaissent liées aux concepts d'emploi des HUD. En effet, les symbologies présentées sur le HFDS et le HUD de l'A320 sont assez restreintes contrairement à celles des HUD destinés au pilotage manuel. Parmi ces dernières, les différences observées sont mineures et dépendent du choix des équipementiers de présenter certaines informations, telles que la distance DME ou la vitesse verticale, dès le roulage ou seulement en vol.

4.3.4. Les transitions : remise de gaz et rotation

L'Annexe 16 présente le résultat de la comparaison des changements de symbologies intervenant lors de la remise de gaz, d'une part, et, lors de la rotation, d'autre part.

Les symboles maintenus sur les quatre HUD étudiés lors des transitions n'ont pas été répertoriés dans les tableaux, de sorte que seuls les symboles faisant l'objet d'un changement sur au moins un des HUD sont mentionnés. La symbologie du HUD équipant l'A320 n'apparaît pas dans les tableaux comparatifs car les procédures d'utilisation de ce HUD sur A320 interdisent d'effectuer la rotation et la remise de gaz avec l'aide du HUD, ces deux manœuvres devant se faire en tête basse.

L'étude des symbologies lors des transitions révèle la co-existence de différentes solutions adoptées par les équipementiers, pour résoudre des points potentiellement délicats dans l'utilisation du HUD.

De façon générale, les transitions entre deux phases du vol imposent un changement dans la façon d'opérer. Lors de l'utilisation d'un HUD, les transitions peuvent ainsi concerner :

- l'information sur laquelle porte la consigne (passage d'une référence pente à une référence assiette lors de la remise de gaz par exemple) ;
- le mode de pilotage (de manuel à automatique ou inversement).

Certains points délicats, pour lesquels des tentatives de solution ont parfois été apportées, ont pu être identifiés lors des transitions. Ces points sont les suivants :

- défauts de précision d'un type d'indicateur. L'échelle de tangage sur A320 en est un exemple, la solution a consisté en l'application des restrictions d'utilisation citées ci-dessus,
- manques d'incitation à changer de référentiel lors du décollage ou de la remise de gaz. On peut citer la solution proposée par Sextant sur le HFDS sous la forme d'une échelle de tangage spécifique à ces 2 situations ("sapin" du mode TO/GA) qui a pour but d'aider le pilote à passer à une référence en assiette. Cependant, le pilote de l'Aéropostale (utilisateur de ce HUD) que nous avons rencontré, évoque l'existence de difficultés de compréhension et d'utilisation de cette symbologie lors de la formation initiale ou en situation de manque d'entraînement, ce qui semble révéler une insuffisance d'efficacité de la solution apportée par Sextant,
- lois d'animation de symboles peu adaptées, par exemple le traînage du vecteur vitesse sur Transall,
- changement de loi de guidage du directeur de vol (ex : guidage *flare* sur HGS).

4.3.5. Les fonctions particulières et élaborées

L'Annexe 17 présente, pour chaque HUD, les solutions retenues pour 5 situations particulières :

- la visualisation des situations inusuelles,
- la présentation des symbologies hors champ,
- la situation de cisaillement de vent (*windshear*)
- la présentation des informations délivrées par le TCAS,

- et enfin, la présentation des alarmes GPWS.

Tous les HUD de concept manuel prévoient des solutions pour les 5 situations étudiées, exceptée la présentation des informations relatives au TCAS et au GPWS qui n'est pas prévue sur le HGS équipant le CRJ. Il apparaît que les solutions retenues pour les HUD sont sensiblement identiques, ce qui est le reflet d'un consensus entre les équipementiers sur la présentation de ces informations particulières.

On peut citer, à titre d'exemple, que :

- La symbologie dédiée aux situations inusuelles se présente en général sous la forme d'une symbologie allégée s'inspirant largement d'une présentation de type horizon artificiel, à laquelle peut s'ajouter une échelle de tangage compressée et un chevron destiné à aider le pilote à se faire une représentation exacte de l'attitude avion.
- Le point commun aux 3 symbologies hors champ étudiées est la présentation de symboles mités (ligne d'horizon et vecteur vitesse *ghosted*). Cette présentation vise à indiquer que les informations de tangage et de trajectoire liées au vecteur vitesse ne sont plus conformes au monde extérieur.

Pour ce qui concerne les HUD de concept hybride et surveillance, aucune des 5 situations n'est prise en considération, hormis celle des symboles hors champ, pour laquelle la présentation adoptée est identique à celle des HUD de concept manuel (symboles mités).

4.3.6. Synthèse des comparaisons

Il se dégage des diverses comparaisons effectuées qu'un large consensus existe pour les symbologies de base ; ce consensus est en premier lieu fonction du concept d'emploi : surveillance, hybride ou manuel.

En revanche, des particularités propres à chaque équipementier ont été recensées pour les HUD étudiés concernant pour l'essentiel le traitement des points délicats (transitions, ...).

Des solutions relatives à la présentation des fonctions élaborées (TCAS, GPWS) apparaissent sur les HUD les plus récents.

Du point de vue méthodologique, la comparaison opérée nous conduit à penser qu'une simple approche par catalogue de symboles est inadaptée et qu'il est nécessaire de procéder à une analyse comparative plus fine prenant en compte des critères techniques liés à l'avion (concept d'emploi et compatibilité avec la tête basse) dont la définition des symboles dépend étroitement.

Un consensus peut être dégagé pour les symbologies de base, en fonction du concept d'emploi : surveillance, hybride ou manuel, tandis que des solutions diverses co existent pour les points de pilotage délicats ou la présentation de fonctions élaborées. La constitution des symbologies reste d'abord liée au contexte d'utilisation, ce qui limite la pertinence de spécifications par symbole.

4.4. Confrontation des symbologies existantes avec la réglementation

4.4.1. Constitution des symbologies et exigences explicites de la réglementation

Le tableau de l'Annexe 18 présente une synthèse de la confrontation des HUD avec les textes réglementaires, pour leur mode d'approche en catégorie III.

Il ressort de cette synthèse que les symbologies existantes comportent naturellement davantage d'informations que celles explicitement requises par la réglementation : celle-ci vise à garantir un standard minimum et à poser les limites en terme de sécurité : elle ne constitue pas un guide de conception !

Etendue aux autres phases de vol, aux transitions ou aux situations particulières, la confrontation directe des symbologies avec les spécifications explicites de la réglementation amène la même conclusion : on constate un décalage entre la réglementation et ce qui est effectivement affiché sur les HUD, sans, bien entendu, que ce décalage présente forcément un caractère négatif.

La confrontation plus détaillée des exigences réglementaires avec la réalité des symboles affichés révèle également la part d'interprétation laissée au certificateur. Par exemple, l'information de vitesse verticale qui est pourtant requise explicitement n'apparaît pas en valeur sur tous les HUD existants ; elle peut cependant être évaluée indirectement car la pente et la vitesse air sont affichées : ceci a été jugé satisfaisant par les certificateurs dans le cadre de l'emploi prévu pour le HUD. Ceci est valable également par exemple pour la présentation des informations de vent ou de dérapage.

4.4.2. Usage effectif et fonctionnalités offertes

Au delà du décalage attendu entre les éléments constitutifs de la symbologie et les spécifications de la réglementation, l'analyse des informations collectées sur l'usage effectif des HUD et des documentations techniques fournies par les équipementiers fait apparaître un décalage parfois important entre l'usage réel et les fonctionnalités offertes par l'équipement.

A titre d'illustration, il est intéressant de mentionner le décalage parfois constaté concernant les HUD de concept manuel, entre leur emploi préconisé dans la documentation et leur usage effectif, pour des raisons souvent économiques. En effet, ces HUD sont conçus et certifiés principalement pour permettre des approches de catégorie IIIa en pilotage manuel au HUD ; dans la pratique, les usages sont divers : ils sont souvent utilisés uniquement en surveillance de ces approches lorsque les avions sont équipés d'*autoland* (cas de SAS, Delta et Alaska Airlines, EasyJet,..). Cependant, l'usage préconisé s'étend progressivement, soit pour le retrofit d'avions anciens non équipés d'*autoland* (B 727,...), soit directement pour de nouveaux avions achetés sciemment sans *autoland* (B 737 NG chez SouthWest et American Airlines).

Il convient également de signaler certains décalages entre la documentation fournie par l'équipementier et la certification. Ainsi, certains guides pilotes fournis avec les HUD décrivent des modes de fonctionnement disponibles, mais qui n'ont pas encore été nécessairement certifiés. Cet état de fait est justifié par le temps nécessaires au processus de certification ; le décalage est progressivement corrigé au fur et à mesure de l'extension de la certification.

Un exemple de ce décalage concerne les HUD de concepts manuels, qui offrent des modes nombreux pour couvrir l'ensemble des phases de vol : certains de ces modes ne sont pas encore certifiés ou approuvés pour les opérations. Ces modes restent complètement disponibles ; le contrôle de leur utilisation repose uniquement sur la publication de limitations d'emploi qui interdisent explicitement leur utilisation.

A un niveau plus proche des opérateurs, il faut également noter que des limitations d'emploi sont parfois imposées par la compagnie utilisatrice elle-même, suite à l'expérience acquise lors de la mise en exploitation de l'équipement ou à des difficultés d'utilisation rapportées.

Ces défauts de correspondance entre l'usage réel par l'opérateur, les usages prescrits par l'exploitant et par la certification, et les fonctionnalités disponibles pour un HUD donné, schématisés sur la Figure 7, constituent des zones de fragilité qui méritent une attention particulière, au niveau des formations et des dispositifs de retour d'expérience. Une autre solution au même problème résiderait dans les limitations à imposer éventuellement sur les fonctionnalités offertes par les équipements.

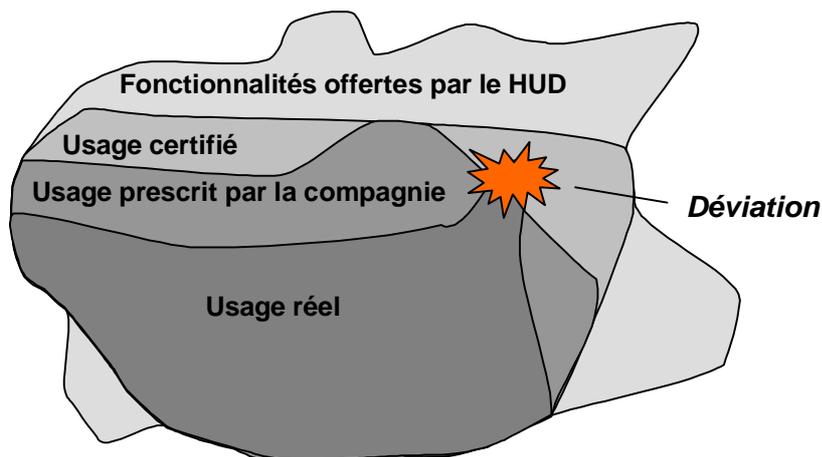


Figure 7 : Les défauts de correspondance entre usages réel, prescrits et disponibles.

En définitive, la constitution d'une symbologie résulte de la confrontation des objectifs différents :

- des réglementateurs : assurer des standards minimum plutôt que des bonnes pratiques ;
- des concepteurs : plusieurs orientations d'usage et d'interactions, concept d'emploi, compromis de conservation liés à l'image commerciale et au coût de la certification ;
- des certificateurs : assurer une cohérence globale de l'interface et la sécurité dans les conditions d'emploi prévues ;
- des opérateurs : gain opérationnel même modeste mais économiquement chiffirable ;
- des pilotes : appliquer une stratégie efficace en fonction de la formation, de la culture et des expériences antérieures ; assurer la sécurité et le confort de pilotage.

4.5. Synthèse sur l'utilisation opérationnelle des HUD

4.5.1. Des fragilités suspectées

Cette revue des HUD existants et le recueil de l'avis des utilisateurs indique l'importance du concept d'emploi du HUD considéré, qui conditionne largement le choix de la symbologie.

Chaque concept implique un compromis dans la constitution de la symbologie, entre les informations à présenter et les limitations de la visualisation en tête haute.

Plus précisément, pour chaque concept, plusieurs points délicats peuvent être suspectés :

Pour les concepts hybride ou surveillance :

- Confiance excessive conduisant à une difficulté de réaction face à un événement peu fréquent (décrochage PA,...).
- Difficultés lors de la reprise en manuel (remise de gaz, arrondi).
- Difficultés de détection des évolutions lentes anormales (symboles figés ou sujets à dérive).

Pour le concept manuel :

- Focalisation excessive sur le directeur de vol : retard sur la détection de changements dans la symbologie ou dans l'état avion (modes, alarmes).
- Symbologie chargée provoquant un masquage de l'environnement extérieur (trafic).
- Difficulté liée à un changement de mode de pilotage (vecteur vitesse -> assiette) lors des transitions (remise de gaz ou arrondi).
- Symbologie mal adaptée (présentation inutilement précise ou loi de dynamique trop sensible) imposant une charge de pilotage superfétatoire.

4.5.2. Des avis largement positifs en pratique

Dans la pratique, les sources de retour d'expérience et les avis recueillis auprès des utilisateurs donnent remarquablement peu d'indicateurs négatifs concernant la sécurité. Le consensus qui se dégage, malgré le peu d'observables objectifs disponibles, est plutôt que l'utilisation du HUD est bénéfique.

Cet avis est partagé, non seulement pour les approches sans visibilité sur lesquelles se focalise généralement la certification, mais également dans les bonnes conditions de visibilité, pour le gain apporté en facilité et en précision du pilotage.

Les points délicats propres à chacun des concepts d'emploi et mentionnés dans le paragraphe précédent sont généralement bien identifiés : ils sont l'objet d'une attention particulière lors des formations et des rappels de qualification pour l'utilisation des HUD.

L'analyse comparative des symbologies indique une tendance à l'uniformisation des symbologies, particulièrement achevée pour les symboles de base, et encore en maturation pour les symboles spécifiques aux situations particulières ou aux équipements récents (alerte *windshear*, GPWS, TCAS). Cette uniformisation accompagne celle des instruments en tête basse ; elle est positive dans la mesure où elle favorise les changements de qualification et où elle évite les risques de confusion de symbole.

Le HUD reste cependant un instrument de bord particulier, qui modifie le partage des tâches dans le cockpit et qui requiert une pratique régulière.

Enfin, la confrontation de la réalité opérationnelle avec les spécifications réglementaires révèle certains décalages, attendus lorsqu'ils découlent des espaces de liberté volontairement laissés dans la réglementation pour permettre l'évolution des équipements, mais également parfois potentiellement fragilisants, lorsqu'ils permettent la dispersion des usages réels au delà du domaine objet de la certification ou des limitations d'emploi posées par les exploitants. Ces décalages sont toutefois réduits progressivement par l'extension des certifications.

5. Méthodes et critères d'évaluation dans la littérature sur les HUD

Tant par les entretiens que les analyses de retour d'expérience il n'a pas été possible de mettre en évidence une classe d'événement ou des circonstances critiques pour l'emploi des HUD. Leurs types d'usages actuels ou leur diffusion modeste n'ont pas permis de relever de défaillances pour lesquelles les textes de certification auraient "laissé passer" des risques potentiels qu'il conviendrait de circonscrire.

La seule observation d'importance sur les textes concerne leur organisation et leur spécification des différents modes d'usage des HUD (surveillance hybride et manuel ainsi que leurs interactions) qui pourrait être améliorée.

Avant de clore ce parcours, un dernier champ d'analyse est à investiguer afin d'identifier des problématiques potentielles dans l'usage des HUD : les très nombreuses recherches menées à propos des HUD, que ce soit pour la définition de leur symbologie ou pour la mise en évidence de difficultés d'emploi.

L'analyse de ce champ scientifique présente également l'avantage de préparer les recommandations demandées pour les méthodes de certification.

Le compte rendu des études menées dans le cadre scientifique sera le suivant :

Décembre 2001

- Objets d'expérimentation présents dans la littérature
- Supports expérimentaux utilisés
- Critères d'évaluation et paramètres retenus
- Scénarios et variables utilisés
- Sujets observés
- Méthodes de traitement des résultats

5.1. Objets d'expérimentation présents dans la littérature

Les HUD ont suscité une production scientifique abondante durant les 20 dernières années (Annexe 19); il n'est sans doute pas nécessaire de la parcourir exhaustivement pour dresser un tableau contemporain des problématiques actuelles des HUD. Deux finalités sont pertinentes au regard de la présente étude : la recherche de points faibles apparaissant dans la littérature d'une part et d'autre part les conséquences des évolutions futures des HUD proprement dits ou des transformations de l'environnement aéronautique.

5.1.1. Points faibles

Les différentes investigations expérimentales étudient le moyen de quantifier les faiblesses, les limitations des HUD et les éventuelles solutions pour y remédier. Parmi les points critiques les plus émergents, on identifie les problèmes liés :

- au partage de l'attention entre la symbologie du HUD et l'environnement extérieur (Boston & Braun, 1996 ; Foyle, McCann, Sanford & Schwirzke, 1993 ; McCann et al., 1993 ; Wickens, 1994),
- à l'élaboration d'une représentation de la situation en conformité avec la situation en cours, notamment pour la récupération de situations inusuelles (Billingsley & Kuchar, 2001 ; Weinstein & Ercoline, 1991 ; Weinstein, Ercoline & Gillingham, 1992 ; Zenyuh, Reising, et al, 1987 ; Previc & Ercoline, 1999),
- à l'exhaustivité de l'information contenue dans le HUD pour en faire un instrument de vol primaire (Weinstein & Ercoline, 1992 ; Weinstein, Ercoline & Gillingham, 1992),
- au risque de masquage de l'environnement extérieur par phénomène de clutter (May Ververs & Wickens, 1995 ; May Ververs et al., 1998) ;
- à la difficulté de diagnostic de panne à travers la symbologie du HUD (Ligett et al., 1993)
- à la prise de décision sous symbologie HUD, notamment dans la phase finale de l'approche au moment de l'arrondi (Mulder et al., 2000).

5.1.2. Evolutions futures

Elles concernent essentiellement les changements des procédures dans le contrôle aérien. Des aides à l'équipage s'avèrent nécessaires pour la prise de décision et le HUD qui autorise la surveillance directe simultanée de l'environnement extérieur se révèle un support de choix aux nouvelles symbologies.

- Les approches à trajectoire courbe en sont un exemple typique : l'évolution n'est pas propre au HUD mais celui-ci peut être une réponse à des critères de circulation aérienne en approche. Le HUD devient alors un instrument indispensable pour piloter des trajectoires courbes menant vers la piste en interaction avec un système de positionnement tel le GPS. (Reising et al., 1995, 1998). Levy, Foyle, Mc Cann (1998), Snow et al. (1999) ont comparé différentes symbologies d'aide au contrôle 3D de trajectoire présentant ou non une dépendance directe à l'environnement survolé.
- Au roulage également l'aide à la navigation 3D a été envisagée face à la densité du trafic sur les plate-formes et à la complexité des circuits de roulage. Des cartes animées 3D en perspective et des symbologies de guidage dans le HUD ont été proposées (McCann et al., 1997).

5.2. Supports expérimentaux utilisés

L'investigation scientifique pour la mise en évidence des facteurs pertinents dans les travaux ont conduit à élaborer des protocoles et dispositifs très variables, du Full Flight Simulator au simple écran de station de travail posé sur un bureau.

Les environnements les plus représentatifs des conditions réelles comprennent un simulateur de base fixe (le plus souvent d'avion de combat) dans lequel le pilote a accès à des informations de pilotage, de navigation et de communication avec les acteurs extérieurs au cockpit sans, cependant, que l'activité de l'équipage soit jamais mentionnée (Reising et al, 1995, 1998 ; Billingsley, Kuchar, 2001 ; Weinstein et al., 1994 ; Ligett et al., 1993 ; Zenyuh et al. 1987 ; Snow et al., 1999). De plus, le degré de réalisme reste toujours faible pour le HUD qui est systématiquement simulé, généralement sous la forme d'une incrustation dans l'image de l'environnement. Ces conditions expérimentales les plus élaborées sont mises en œuvre pour l'analyse de difficultés d'emploi nécessitant la prise en compte globale de la situation, telles que la conscience de la situation dans l'analyse de la récupération de situations inusuelles, l'évaluation d'aide au pilotage par des trajectoires 3D, ou la recherche de l'exhaustivité nécessaire dans l'information présentée dans le HUD pour en faire un instrument de vol primaire.

Par contre, des dispositifs très rudimentaires sont mis en œuvre pour l'étude du partage de l'attention, de l'effet de clutter, de la prise de décision (McCann et al., 1993 ; Foyle McCann, Sanford, Schwirzke ; May Ververs & Wickens, 1995 ; May Ververs et al., 1998 ; Mulder et al., 2000) mais aussi parfois pour des situations intégratives relatives à la perception spatiale (Levy, Foyle, Mc Cann. 1998 ; McCann et al., 1997). Dans ce cas, une station de travail permet à la fois l'animation de la symbologie et la restitution de l'environnement extérieur.

Enfin, il faut mentionner que certains auteurs préfèrent effectuer un transfert de contexte d'application pour éviter d'avoir recours à des sujets expérimentaux possédant un haut niveau d'expertise dans l'activité de pilotage. C'est ainsi que Boston et Braun (1996) ont étudié le partage de l'attention dans l'utilisation du HUD avec un simulateur de navigation maritime facilement contrôlé par des étudiants.

5.3. Critères d'évaluation et paramètres retenus

Deux grandes familles de critères sont classiquement rencontrés dans la littérature scientifique : les critères objectifs recueillis au cours de l'activité et les critères subjectifs résultant d'une analyse a posteriori impliquant un regard de l'opérateur sur son activité.

Les critères objectifs les plus fréquemment rencontrés sont :

- des écarts aux paramètres de vol prescrits : trajectoire, altitude, vitesse (Reising et al., 1995 ; Reising et al, 1998 ; Weinstein et al., 1994 ; Levy, Foyle, Mc Cann. 1998 ; Zenyuh,et al. 1987 ; McCann et al., 1997 ; Snow et al. 1999)
- des temps de réalisation d'une manœuvre (Billingsley, Kuchar, 2001 ; Boston, Braun, 1996 ; Zenyuh,et al. 1987), des échecs dans la tâche (McCann et al., 1997), des temps de détection d'un élément critique (May Ververs & Wickens, 1995 ; May Ververs et al., 1998), des temps d'identification de panne ou des erreurs d'identification (Ligett et al., 1993 ; McCann et al., 1993).

Les critères subjectifs sont constitués :

- de questionnaires (Reising et al. 1995, 1998 ; Boston, Braun, 1996)
- d'entretiens semi-dirigés (Snow et al., 1999)
- d'échelles de caractérisation de l'activité telle que l'échelle de Cooper-Harper, le SA-SWORD pour l'évaluation de la conscience de la situation (Weinstein et al., 1994 ; Snow et al., 1999)

Il existe donc une panoplie de critères sélectionnés et combinés en fonction de l'objet de l'analyse et des possibilités offertes par le dispositif expérimental. L'association de ces deux catégories de

critères assure de façon complémentaire la mise en évidence des différences de performances entre deux conditions analysées (deux symbologies, par exemple) et l'analyse des mécanismes mis en œuvre par les opérateurs dans la conduite de leur activité. Il est à noter que les critères objectifs restent toujours directement issus des données de la simulation, donc facilement collectés et disponibles pour une analyse statistique, par exemple. Aucun auteur n'a eu recours à des méthodes plus lourdes de recueil et d'analyse de l'activité à base d'enregistrement de l'activité.

5.4. Scénarios et variables utilisés

Les scénarios développés pour les études sont variables par leur durée, la phase de vol qu'ils concernent, les événements intercurrents qu'ils prennent en compte et la tâche prescrite à l'opérateur. Ils sont, de ce fait, plus ou moins représentatifs des conditions réelles de vol.

La plupart des études s'en écartent cependant notablement par la faible occurrence de tâches parasites et donc la focalisation de l'opérateur sur le paramètre étudié.

Le contexte le plus étudié est la phase d'approche (Reising et al., 1995, 1998 ; Levy, Foyle, Mc Cann, 1998 ; Snow et al., 1999 ; Liggett et al. 1993 ; McCann et al., 1993 ; May Ververs, Wickens, 1995), éventuellement réalisée en mode automatique lorsque le contrôle en ligne de la trajectoire par le pilote n'est pas l'objet de l'analyse (Mulder et al., 2000), cette phase est parfois même limitée aux quelques secondes précédant l'atterrissage (Wickens, 1994).

Plus rares sont les simulations plus élargies dans le temps concernant la phase de croisière (Foyle et al., 1993 ; Wickens, 1994 ; May Ververs et al., 1998) ou même plusieurs phases de vol (Billingsley, Kuchar, 2001 ; Weinstein et al., 1994).

Deux exemples de scénario réalistes ont été relevés dans la littérature :

- l'un concerne la prise en compte exhaustive des différentes phases de vol en prenant en compte les fluctuations de l'attention et de l'activité au cours d'un vol ; il est proposé par Zenyuh et al. (1987) avec une simulation de 90 min de vol en avion de chasse pour évaluer l'efficacité de symbologies HUD dans la récupération de situations inusuelles, le pilote devant respecter les procédures réglementaires ;
- le second concerne la navigation sur la plate-forme de l'aéroport avec 24 navigations du parking à la piste de décollage (distance parcourue environ 2 mn, durée 7 min) sur l'aéroport de Chicago sous faible visibilité (McCann et al., 1997).

Outre les différentes symbologies étudiées, les conditions expérimentales prennent souvent en compte différents niveaux de visibilité de l'espace survolé (Reising et al, 1998 ; Snow et al., 1999 ; May Ververs, Wickens, 1995) ou différents niveaux de difficultés dans la tâche (Billingsley, Kuchar, 2001).

Des événements intercurrents interfèrent sur le déroulement nominal de l'activité qu'ils soient de type météorologique, comme des rafales de vents (Reising et al., 1995, 1998 ; Foyle et al., 1998 ; Snow et al., 1999), de type situations d'urgence (Reising et al., 1995, 1998 ; Boston, Braun 1996 ; Wickens, 1994 ; Snow et al., 1999 ; Liggett et al., 1993), ou dus à la mise inattendue en situation inusuelle (Foyle et al., 1998 ; Weinstein et al., 1994 ; Zenyuh et al., 1987).

Le passage des scénarios dans les différentes conditions expérimentales est précédé d'une phase d'entraînement de durée suffisante pour stabiliser les performances de l'opérateur et assurer que les variations observées dans l'étude peuvent être rapportées aux variables envisagées. Naturellement, la durée de l'entraînement dépend de la complexité de la tâche demandée à l'opérateur, ce qui inclut aussi la représentativité de l'environnement de simulation.

5.5. Sujets observés

Le nombre de sujets participant aux expérimentations reste relativement réduit (de 10 à 20 en général) chacun effectuant une séquence de simulation dans les différentes conditions expérimentales après la période de familiarisation avec l'environnement de simulation.

Globalement, l'effectif de participants est d'autant plus élevé qu'il ne s'agit pas de pilotes mais d'étudiants (effectif maximum : 60, Boston, Braun, 1996).

Lorsqu'il s'agit de pilotes, ceux-ci ont toujours une grande expertise aéronautique (> 1000 heures de vol) et une expérience en utilisation de HUD beaucoup plus disparate, même au sein d'une étude. Des sujets pilotes sont systématiquement impliqués lorsqu'il s'agit de tâches très dépendantes de la connaissance du contexte aéronautique (contrôle de trajectoire courbe en approche, récupération de situations inusuelles, recherche de l'exhaustivité nécessaire dans l'information contenue du HUD pour en faire un instrument de vol primaire, effet du clutter sur la surveillance de l'espace extérieur).

5.6. Méthodes de traitement des résultats

Les critères objectifs issus de la simulation font généralement l'objet d'une analyse de variance, les variables à l'origine des différentes conditions expérimentales constituant les variables indépendantes. Les différences sont parfois difficiles à mettre en évidence d'un point de vue statistique en raison du faible effectif de la population considérée et de l'absence de répétition dans les plans expérimentaux. Les données subjectives qui font l'objet d'une synthèse ou d'une analyse circonstanciée lorsqu'il s'agit d'une réponse personnalisée à un type d'événement, sont alors l'unique recours pour mettre en évidence le bénéfice pour l'opérateur apporté par une symbologie.

En conclusion, les équipes de recherche travaillant sur les difficultés présentes ou futures engendrées par les HUD développent des plans expérimentaux relativement variés dont les caractéristiques répondent directement aux questions posées, s'éloignant du contexte aéronautique lorsque la problématique peut être transposée à un contexte plus facile d'accès. Cependant, du point de vue de la certification, les environnements expérimentaux, les tâches, les événements intercurrents sont beaucoup trop rudimentaires pour rendre compte des aspects intégratifs des différentes composantes de la tâche réelle et permettre qu'une telle approche dépouillée puisse être la base d'une méthode directement utilisable par les certificateurs. Les résultats de ces études au moins doivent être systématiquement pris en compte dans la procédure de certification et l'esprit de la démarche d'analyse reste adaptée.

6. Recommandations pour les méthodes d'évaluation

L'évaluation du HUD est historiquement paradoxale car les anciens HUD ont été développés et certifiés selon des textes réglementaires pour lesquels ils étaient très en avance. L'essentiel du défrichage et du traitement des innovations technologiques a précédé le développement d'un cadre réglementaire pourtant plus sommaire que celui d'aujourd'hui.

L'évaluation est toujours d'actualité car il est maintenant question d'un élargissement des contextes d'usage, d'une mise en interaction entre systèmes incluant le HUD.

La demande en HUD et les innovations le concernant semblent donc devoir se maintenir, imposant sans doute un travail d'analyse plus complexe lors des certifications. Cette complexité résulte de l'exploration, par les équipementiers ou les opérateurs, de contextes exploitant des "marges réglementaires" ou des interactions avec d'autres fonctions embarquées (TCAS, GPWS, système de vision infra rouge,...), ou encore de l'apparition des trajectoires d'approche non rectilignes. Dans ces divers cas, le HUD devient plus qu'un simple support d'information lors d'une phase de vol relativement limitée. Son usage s'étend, se diversifie et les éventuels points de blocage peuvent être plus difficiles à mettre en évidence.

C'est dans un tel contexte qu'il est nécessaire de reconsidérer les textes actuellement en vigueur à propos des HUD et d'établir des recommandations pour leur évolution. En d'autres termes il est nécessaire de préparer le matériel réglementaire pour des certifications plus complexes.

Les analyses rapportées précédemment à propos de l'usage opérationnel du HUD, des recherches FH sur le sujet et des textes existants nous permettent d'avancer quelques recommandations destinées à favoriser les évaluations à venir.

Trois questions guident cette mise en forme :

- L'exploitation des appareils équipés de HUD indique-t-elle une évolution à apporter au processus de certification ?
- Les éléments recueillis lors des recherches sur les HUD suggèrent-ils des points d'amélioration susceptibles d'être insérés dans les textes en vigueur (méthodologie, résultat...) ?
- Le contenu des textes actuellement en vigueur peut-il être aménagé pour en rendre l'usage plus simple et plus clair ?

6.1. L'exploitation des appareils équipés de HUD indique-t-elle une évolution à apporter au processus de certification ?

Les chapitres précédents du présent rapport ont déjà pointé le nombre infime de faits qui pourraient être considérés comme des symptômes montrant que le processus de conception ou de certification est insuffisant. La réponse la plus immédiate à la question est donc négative.

La proportion d'appareils équipés de HUD reste réduite et celle des vols dans lesquels ils doivent être employés impérativement l'est tout autant. La quasi-absence d'événements doit donc être rapportée à cette mise en situation limitée.

Une première recommandation peut être avancée à la suite de cette observation sur les apports des éléments issus de l'exploitation opérationnelle.

Le retour d'expérience est vraiment très lacunaire à propos des HUD tant sur leur usage effectif (volume, fréquence...) que sur les particularités de leur emploi. Un retour d'expérience plus structuré pourrait s'appuyer sur le contrôle continu évoqué dans le Temporary Guidance Leaflet n°20 du JAR OPS consacré aux opérations avec HUD, dans ses deux paragraphes :

- (2.3.2.) nombre d'approches effectuées en cat. II et IIIa, rapports sur les approches inadéquates ;
- (2.3.3.) l'opérateur doit établir une procédure de contrôle des performances du système de guidage avec HUD sur chaque appareil.

Quelques points pourraient toutefois être plus spécifiquement analysés et faire plus spécifiquement l'objet d'investigation sur la cohérence de la symbologie. Les situations de transition en sont de bons exemples. L'équipage passe, parfois brutalement, d'une situation maîtrisée à un autre contexte qui s'impose techniquement à lui (remise de gaz...). Cette transition est à la fois cognitive et perceptive puisque les repères, les valeurs se transforment radicalement avec un changement de symbologie conséquent.

Ceci peut être expliqué par la nature même des textes existants. Ils opèrent principalement par focalisation sur des aspects ou des informations types et par énoncés d'objectifs généraux.

La démarche induite, directement, aux concepteurs et, indirectement, aux certificateurs privilégie donc les analyses ponctuelles d'un symbole ou d'une configuration mais ne prend que sommairement en compte les dynamiques de situation. Les transitions appartiennent typiquement à ces dynamiques complexes, on pourrait également citer les situations inusuelles ou les fortes turbulences.

Une autre spécificité opérationnelle apparaît avec le recul des années à propos des HUD. Des contextes réglementaires très voisins donnent lieu à des développements différents en matière de symbologie. La question a déjà été plusieurs fois pointée dans ce rapport.

La diversité des contextes opérationnels, des types de machines et des cultures sur le pilotage proprement dit conduit inévitablement à une diversité des symbologies produites et acceptées. Cet état doit être considéré comme une résultante historique, culturelle et technologique. La question est sans doute maintenant de s'assurer de la manière dont ces philosophies de symbologie vont pouvoir supporter la confrontation avec les innovations envisageables dans les années à venir dans des contextes d'usage variés.

Il s'agit donc de développer des méthodes qui évaluent les symbologies dans la complexité des situations rencontrées et dont la réalité montre qu'elles sont tout à la fois rares et très pertinentes pour l'usage du HUD (transitions, évitement, mauvaise météo, situation inusuelle...).

Une telle recommandation s'articule parfaitement avec la question suivante à propos des méthodes inventoriées dans les contextes de recherches sur le HUD.

6.2. Les éléments recueillis lors des recherches sur les HUD suggèrent-ils des points d'amélioration susceptibles d'être insérés dans les textes en vigueur ?

Le point le plus spécifique issu de l'analyse des travaux scientifiques menés sur le HUD concerne les méthodes qui sont employées. Le premier constat ne laisse pas de grands espoirs quant aux méthodes qu'il serait possible de transférer.

En effet, toutes les études décrites dans la chapitre 5 ont en commun de ne pas considérer les conditions opérationnelles et le contexte de la certification :

- Aucun HUD complet n'est employé dans les études recensées depuis une décennie.
- Aucune étude ne traite de la complexité d'usage du HUD dans des contextes opérationnels.
- La dynamique de son emploi (au sein de l'équipage, dans les interactions entre HUD et instrumentation ou automatismes) n'est pas non plus explorée.

Si les études ne semblent pas répondre aux besoins de développements méthodologiques pour la certification, elles sont par contre très utiles pour ouvrir des pistes aux concepteurs quant à la diversification de l'usage du HUD. C'est en fait leur principale destination dans le cadre de projets contractuels de recherche.

L'essentiel des travaux porte sur des dimensions spécifiques que les chercheurs tentent de mettre en évidence (points faibles des HUD, comparaison de différentes formes d'information...).

En termes de réflexion méthodologique, les travaux analysés montrent qu'un enrichissement peut être proposé pour l'association de critères objectifs et subjectifs dans l'évaluation. Actuellement l'essentiel des méthodes décrites pour la certification est de nature quantitative et concerne des indicateurs tels que la dispersion des points d'impact ou des écarts de vitesse.

Les travaux recensés font apparaître l'intérêt de la convergence entre des critères purement quantitatifs et des critères qualitatifs.

En effet, une dispersion ne décrit le degré de maîtrise d'un dispositif que dans le contexte simple dans lequel se déroule l'essai et ne permet pas d'établir pas la robustesse de cette maîtrise dans des situations diversifiées, plus contraignantes mais aussi plus révélatrices des limites du dispositif évalué.

D'un autre côté, une évaluation FH poussée des HUD ne peut guère être envisagée actuellement dans le cadre de la certification. Elle serait coûteuse, complexe et longue ; les effectifs (de pilotes et d'essais) qui sont généralement restreints dans la recherche doivent y être bien plus conséquents.

Cette limite notoire pourrait toutefois être contournée de deux manières

- par une analyse plus poussée du domaine d'analyse FH relative aux évolutions à évaluer et qui serait à la charge du concepteur
- par l'enrichissement du savoir faire FH de l'évaluateur pour apprécier ces analyses et ajouter une investigation qualitative à l'évaluation.

La recommandation qui en résulte consiste à fournir aux certificateurs des "points de suspicion" qui concernent les données FH de l'évaluation des HUD.

Cette démarche par éléments de suspicion s'apparente à la démarche générale de la certification consistant à aller prioritairement tester les domaines des dispositifs qui sont ceux connus pour la difficulté de leur maîtrise technologique ou pour leur originalité.

Il en va de même pour les facteurs humains et les HUD.

La représentation mentale de l'espace construite par le pilote avec le HUD, les mécanismes d'attention ou encore le temps d'analyse d'une situation inusuelle sont autant de "points de suspicion" permanents pour tout HUD ; ils lui sont inhérents.

6.3. Le contenu des textes actuellement en vigueur peut-il être aménagé pour en rendre l'usage plus simple et clair ?

L'étude des textes actuellement disponibles dans le cadre des JAR conduit à deux recommandations en matière d'évaluation des HUD :

- **Les données pertinentes sont disséminées dans un vaste ensemble de références. Il convient de les rassembler en une structure cohérente.** Cette structure n'a pas pour vocation de se substituer aux autres mais de les concentrer.
- **Les textes actuels rédigés sont essentiellement destinés au concepteur. Il est nécessaire de leur construire un complément qui soit, lui, centré sur les méthodes d'évaluation. Ce document serait, de fait, structuré à destination des certificateurs.**

Reprenons les chacune succinctement.

6.3.1. Rassembler des données disséminées.

Les éléments disponibles sont présents dans la JAR 25, l'AMJ 25-11 et les JAR HUD 901, 902 et 903. Certaines des informations concernent explicitement les HUD, d'autres sont une généralisation visant les instruments électroniques.

Les défaillances doivent être en accord avec les principes généraux énoncés dans le JAR 25.1309. La validation s'effectue en vol et les statistiques sont utilisées pour rapporter le nombre d'approches manquées au nombre d'approches effectuées. La charge de travail est évoquée dans le JAR HUD 903 en fonction des spécificités des HUD (tension sur l'activité oculaire, tenue rigide de la tête, concentration excessive) mais renvoie à des textes sommaires (25.1523) à ce sujet. Un autre exemple de la dissémination des textes est rapporté par le document de politique temporaire (JAA interim policy « Human factors aspects of flight deck »), pour laquelle les nouveautés introduites dans les planches de bord ne sont qu'imparfaitement traitées dans les JAR 25. Ces nouveautés justifient l'introduction de conditions spéciales pour être considérées, sous les termes du JAR 21 – 16 (consacré à la certification), avec un intérêt sur les erreurs au sein de l'équipage, les capacités humaines et les risques qui leur sont associées.

La recommandation de rassembler, au sein d'un seul document, les éléments pertinents à propos du HUD s'impose d'autant plus que le HUD est en interaction avec de nombreuses dimensions du pilotage : le pilotage à deux, les automatismes, les basses visibilités, le guidage de l'avion, des situations marginales de vol... Sa réalisation en fait un système de compromis apte à être employé dans des contextes très variables.

Une illustration de cette synthèse nous est fournie par le document SAE ARP 5288 (Transport category airplane, Head Up Display systems), qui rassemble des définitions, des concepts, une analyse des défaillances, de nombreuses données sur l'installation, les caractéristiques optiques et enfin des éléments liés aux vérifications des capacités opérationnelles.

Il est ainsi à noter que ce document SAE reprend, entre autre, le texte de l'Advisory Circular 25-11 (FAA) qui est quasi identique au texte AMJ 25-11 de la JAA sur les Electronic Display Systems qui, lui, n'est pas repris au sein des documents de synthèse de la JAA (HUD 901-3).

6.3.2. Un document pour l'évaluation.

Il n'existe pas de texte décrivant explicitement la méthode et les étapes d'évaluation destinés au certificateur. En particulier, il n'existe pas de "flight test guide" pour les HUD. Les textes existants indiquent les caractéristiques et objectifs à atteindre lors de la conception du HUD ; ils sont essentiellement rédigés à destination des concepteurs.

Les indications portant sur la méthodologie y sont réduites. Par exemple, la démonstration des performances attendues dans le JAR HUD 901 est fondée sur la réalisation de 1000 atterrissages simulés et de 100 atterrissages effectifs sur avion. Ces manœuvres sont effectuées par au moins 10 pilotes de différents degrés d'expérience dont les licences soient à jour et ayant reçu une formation à l'usage des HUD semblables à celle de pilotes de ligne.

Il n'est pas fait mention de scénarios spécifiques qui permettraient d'explorer des situations telles que les fortes turbulences, les étapes de transition lors de remise de gaz, les situations inusuelles. L'absence de guide méthodologique pour le processus de certification constitue également une difficulté pour la pérennisation et la comparaison des résultats obtenus.

La nature même de la démarche de certification illustre cette difficulté. Il revient aux certificateurs d'apprécier que le matériel proposé satisfait au "minimum standards for safety". Ce minimum ne peut toutefois être décrit de manière détaillée pour tout dispositif ; il revient donc à l'évaluateur une large part d'appréciation. La conduite de cette appréciation implique l'expérience du certificateur ; elle est, de fait, de nature empirique (au sens philosophique de démarche fondée sur l'expérience). Le JAR 901, paragraphe AWO H307 « HUD characteristics » est illustratif de cette situation. Trois rubriques y sont proposées (Équipement installation, Display presentation, Display symbology), pour lesquelles il n'est indiqué à chaque item que des objectifs généraux à atteindre sans spécifier ni critère ni méthode de vérification.

La méthodologie est donc le moyen de stabiliser tant les savoir faire que les résultats obtenus.

Le texte SAE ARP 5288 déjà cité donne quelques éclairages intéressants sur l'évaluation (qui sont très voisins de l'AC 25-11/FAA- et de l'AM J25-11/JAA) :

A propos des facteurs humains, ce texte propose la vue générale suivante :

Humans are very adaptable, but unfortunately for the display evaluation process, they adapt at varying rates with varying degrees of effectiveness and mental processing compensation. Thus, what some pilots might find acceptable and approvable, others would reject as being unusable and unsafe. Aeroplane displays must be effective when used by pilots who cover the entire spectrum of variability. Relying on a requirement of "train to proficiency" may be unenforceable, economically impracticable, or unachievable by some pilots without excessive mental workload as compensation.

Les thèmes traités y sont les suivants : *colour, symbology, coding, clutter, dimensionality, and attention-getting requirements; display visual characteristics; failure modes; information display and formatting; specific integrated display and mode considerations, including maps, propulsion parameters, warning, advisory, check list procedures and status displays.*

En conséquence le programme de test doit inclure une quantité suffisante d'essais en vol et en simulateur avec une population représentative de pilotes pour s'assurer des points suivants :

- *Reasonable training times and learning curves;*
- *Usability in an operational environment;*
- *Acceptable interpretation error rates equivalent to or less than conventional displays;*
- *Proper integration with other equipment that uses electronic display functions;*
- *Acceptability of all failure modes not shown to be Extremely Improbable; and*
- *Compatibility with other displays and controls.*

La recommandation sur le contenu d'un guide méthodologique pourrait être la suivante (certains des éléments sont déjà inclus dans les réglementations, d'autres sont spécifiques) :

- Rappels des textes existants concernant l'usage et l'évaluation des HUD
- Rappels de définitions et concepts liés au HUD
- Rappels sur les généralités FH des HUD :

Processus d'attention dans l'usage du HUD

Par exemple, quel que soit le type de symbologie de HUD, l'effet de masquage cognitif d'un objet sur la piste est possible puisqu'il peut être obtenu, en laboratoire, avec des symbologies extrêmement succinctes. Cet effet n'est donc pas propre à une symbologie mais à un contexte d'exploitation des données affichées par rapport à la vision de l'extérieur de l'appareil.

Représentation spatiale du pilote

Spécificité du pilotage avec HUD (points fort et points faibles : qualité des guidages, effet des temps de calcul, luminosité,)

Interactions dans un cockpit HUD

• Méthode d'évaluation d'une symbologie HUD

Analyse de la tâche

Mise en situation

Scénario type pour l'investigation

Aérodromes ; pannes touchant les senseurs ; éclairage de terrain ; erreur induite par le pilote lui-même (écart de vitesse, de trajectoire...); récupération de situations inusuelles, fortes turbulences, vol avec transition (remise de gaz...)

Choix des sujets : profil et compétence (incluant des pilotes de compagnie), effectifs

Exploration des différents types de pilotage pour lesquels le HUD doit être certifié (cat I, II ou III) en pilotage automatique ou hybride.

Méthode disponible pour une évaluation facteurs humains de l'usage des HUD

Echelle de Cooper Harper, questionnaire, entretiens semi dirigés et observation lors des vols test.

Analyse des écarts à des valeurs de consigne ou à la performance attendue (non détection de panne, retard de décision...)

7. Conclusion

L'analyse de l'usage du HUD dévoile un paradoxe : il occupe une place particulière dans la panoplie des instruments de la planche de bord. Elle est liée à sa position centrale en même temps qu'à sa relative rareté d'emploi effectif. En effet, les avions fortement automatisés n'en sont guère tributaires tant qu'ils opèrent sur des terrains adaptés à leur degré de technologie ; les appareils à l'automatisation moins intégrée doivent y avoir recours mais dans des situations somme toute exceptionnelles. L'usage pratique du HUD évolue ainsi depuis la source d'information "high-tech" apportant un confort d'opportunité à l'outil parfois irremplaçable et obligatoire mais dans des situations survenant rarement.

La diffusion de ce système est, elle aussi, ponctuelle et organisée en créneau : certaines flottes sont largement équipées, des gammes d'appareils d'affaire semblent prometteuses en termes d'équipement, dans d'autres segments de marché, le HUD est inexistant.

Les grandes lignes de conclusion illustrent aussi, à leur manière, ce paradoxe.

Cette première phase de l'étude a permis d'établir les points suivants :

- L'analyse des textes réglementaires révèle un tableau contrasté : l'organisation des textes FAA ou JAA est complexe, la détermination des textes applicables pour la certification d'un HUD donné dépend de nombreux facteurs. En premier lieu, le concept d'emploi (HUD manuel, de

surveillance ou hybride, instrument primaire ou secondaire) détermine les exigences applicables : il pourrait donc déterminer une éventuelle réorganisation des textes.

- Les textes récents publiés par la JAA apparaissent globalement plus clairs que les textes FAA ; ils abordent les problèmes spécifiques aux HUD en terme d'exigences fonctionnelles, ce qui semble une approche plus pertinente que de tenter d'établir un standard de symbologie indépendamment du contexte d'utilisation prévu.
- Les textes FAA et SAE en projet visent à combler l'absence de texte général applicable au HUD dans la réglementation américaine ; ces textes reprennent l'approche fonctionnelle des textes JAA existants, mais ils sont plus détaillés et ils comportent des éléments relatifs aux concepts émergents tels que la vision synthétique. Ils peuvent constituer une base de réflexion pour l'évolution des textes JAA.
- L'analyse des spécifications des textes en matière de symbologie ne révèle pas de différence flagrante d'approche entre les textes JAA et FAA.
- Les différences d'approche apparaissent davantage au niveau de l'interprétation des textes selon les certificateurs. Elles trouvent leur origine dans des conceptions différentes sur l'emploi des HUD et des appareils, et au delà, sur le rôle de l'opérateur humain dans la conduite de l'appareil.
- Le processus de certification prend naturellement en compte les textes existants, mais surtout différentes dimensions techniques (compatibilité avec l'avion, emploi prévu) et culturelles (expérience des certificateurs, habitudes des utilisateurs). La méthodologie des programmes de certification est pragmatique et orientée sur la performance ; les contraintes de coût rendent difficile l'application de méthodes d'évaluation spécifiques sur les notions subjectives de la réglementation concernant les facteurs humains.
- L'analyse des symbologies existantes permet de distinguer 3 types de symbologie selon le concept d'emploi pour lequel ils sont principalement conçus : surveillance, hybride ou manuel. Une base commune à ces symbologies existe, qui fait l'objet d'un consensus stabilisé entre les équipementiers, pour les phases de vol courantes. Des solutions différentes apparaissent pour des situations de transitions (remise de gaz, rotation), ainsi que pour les situations particulières, liées à de nouveaux équipements (GPWS, TCAS).
- La confrontation de ces symbologies avec les textes réglementaires existants révèle effectivement un décalage : les HUD existants sont naturellement 'en avance' par rapport à la réglementation, ils ont des capacités supérieures à ce qui est spécifié dans les textes et, au delà de la réglementation, ils font appel à un savoir faire propre aux équipementiers pour résoudre des problèmes spécifiques non abordés dans les textes.
- Un décalage moins attendu est parfois constaté entre le très large domaine d'utilisation prévu à la conception des HUD et effectivement accessible en pratique, et le domaine d'utilisation certifié, limité à certaines phases de vol (approches) et effectivement prescrit par les compagnies. Ce décalage est lié au coût et au temps nécessaires pour l'extension de la certification à l'ensemble des phases de vol possibles avec les HUD récents.
- Les sources de retour d'expérience offrent peu d'observables ; elles ne révèlent pas de problème significatif de sécurité lié au HUD. Quel que soit le concept d'emploi, les utilisateurs interrogés se déclarent satisfaits de leur équipement et affirment son intérêt pour la facilité et la précision du pilotage. Ils reconnaissent cependant le besoin de formation et d'entraînement spécifiques pour l'utilisation du HUD.

En conclusion, les différentes analyses et entretiens indiquent clairement que la constitution des symbologies HUD résulte de la confrontation de contraintes techniques, de besoins opérationnels, de conceptions d'emploi et d'intérêts économiques, qui peuvent difficilement être pris en compte de façon exhaustive dans la réglementation.

Décembre 2001

Une abondante littérature existe déjà sur des recherches amont en laboratoire concernant les questions spécifiques aux HUD : conformité des informations, *clutter*, allocation d'attention,... Ces recherches ont permis d'établir le consensus actuel sur les éléments de base de la symbologie.

L'absence de difficulté avérée concernant la sécurité et les consensus maintenant établis sur la constitution des symbologies limitent la pertinence d'un programme d'essai orienté sur la performance d'une symbologie HUD particulière dans le cadre du système aéronautique actuel, en particulier si l'environnement expérimental n'est pas représentatif du contexte d'emploi.

Un programme d'essai davantage orienté sur l'illustration d'une méthodologie d'évaluation utilisable pour la certification semblerait plus adéquat dans la perspective d'une seconde tranche de cette étude, sous réserve de la disponibilité d'un environnement expérimental adapté. Le contexte d'application pourrait concerner des concepts nouveaux dans le cadre des futures évolutions de la navigation aérienne, afin de contribuer à la réflexion nécessaire sur les dispositions réglementaires à prévoir pour ces concepts.

-o-O-o-

Annexe 1 : Références contractuelles

- [1] DGAC/SFACT
Recherche pré normative sur la sécurité de l'aviation civile
Programme fonctionnel DGAC/SFACT (7 octobre 1998).
- [2] DGAC/SFACT
Notification du marché n°99.50.074.00.227.75.0. Réalisation de travaux en vue de maintenir la sécurité du transport aérien à un niveau acceptable. Lot 3 : symbologie HUD.
Contrat N°21320 – SFACT/AEF du 23 juin 2000, reçu le 03 juillet 2000
- [3] DGAC/SFACT
Règlement particulier de consultation (RPC)
N° 98/01 du 23 novembre 1998.
- [4] DGAC/SFACT
Cahier des clauses administratives particulières (CCAP)
N° 98/01/C du 24 novembre 1998.
- [5] Le Blaye P.
Symbologie des collimateurs tête haute (HUD)
Proposition technique et financière ONERA DCSD 7009.06 (février 1999)

Annexe 2 : Abréviations

AC	Advisory Circular
ACJ	Advisory Circular, Joint
ADI	Attitude Director Indicator
AGL	Above Ground Level
AMJ	Advisory Material Joint
ARP	Aerospace Recommended Practice (SAE)
AS	Aerospace Standard (SAE)
ASRS	Aviation Safety Reporting System
AWO	All Weather Operations
BASEAC	BASE d'Accident du CERMA
CDB	Commandant De Bord
CEV	Centre d'Essais en Vol
CRI	Certification Review Item
CSERIAC	Crew System Ergonomics Information Analysis Center
DCSD	Département Commande des Systèmes et Dynamique du vol
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
DH	Decision Height
DME	Distance Measuring Equipment
EADI	Electronic Attitude Director Indicator
EFIS	Electronic Flight Instrument System
EGPWS	Enhanced Ground Proximity Warning System
EHSI	Electronic Horizontal Situation Indicator
EVS	Enhanced Vision System
FAA	Federal Aviation Administration
FAR	Federal Aviation Regulations
FCL	Flight Crew Licensing
FHA	Functional Hazard Assessment
FMC	Flight Management Computer
FMS	Flight Management System
HFDS	Head-up Flight Display System (® Sextant)
HGS	Head-up Guidance System (® Flight Dynamics)
HQRS	Handling Qualities Rating Scale
HSI	Horizontal Situation Indicator
HUD	Head Up Display
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
IMASSA	Institut de Médecine Aéronautique du Service de Santé des Armées
IMC	Instrument Meteorological Conditions
JAA	Joint Aviation Authorities
JAR	Joint Aviation Requirements
LVP	Low Visibility Procedure
MEL	Minimum Equipment List

NPA	Notice of Proposed Amendment
PA	Pilote Automatique
PF	Pilot Flying
PFD	Primary Flight Display
PNF	Pilot Not Flying
POC	Proof of Concept
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SAE	Society of Automotive Engineers
SFACT	Service de la Formation Aéronautique et du Contrôle Technique
SOAR	State Of the Art Report
SOP	Standard Operation Procedure
SVS	Synthetic Vision System
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
TSO	Technical Standard Orders
VFR	Visual Flight Rules
VGS	Visual Guidance System (® BAe Systems)
VMC	Visual Meteorological Conditions
VORTEX	Visualisation Objective des ReTour d'Expérience

Annexe 3 : Glossaire

Ce glossaire fournit un certain nombre de mots-clefs fréquemment rencontrés dans la littérature sur les HUD, avec leur définition et les notions principales qui y sont rattachées en l'état des recherches actuelles.

Collimation (*collimation at infinity*)

Effet produit par le dispositif optique du HUD (combiner) : les symboles apparaissent à l'infini, ce qui affranchit l'œil de l'accommodation. Cette caractéristique est aujourd'hui reconnue comme indispensable pour les HUD. Notons l'apparition sur les avions militaires d'affichages collimatés en tête basse ou moyenne.

Conformité (*conformal*)

Caractéristiques d'un symbole dont la présentation est géométriquement directement transposable au monde extérieur. Ainsi, un horizon conforme se superpose à l'horizon réel (à la différence du décalage d'altitude) ; 1 degré sur une échelle de cap ou de tangage conformes correspondent à 1 degré dans la réalité ; un vecteur vitesse inertiel conforme indique le point vers lequel l'avion se dirige réellement ; une piste synthétique conforme se superpose directement sur la piste réelle (à l'imprécision de la navigation et du paramétrage près). Les études sur l'allocation d'attention (modèle *object-based*) indiquent que la conformité favorise le suivi simultané du monde extérieur et de la symbologie. Cette caractéristique est aujourd'hui reconnue comme indispensable pour les HUD, pour les informations qui s'y prêtent.

Compatibilité avec la tête basse (*head-down compatibility*)

Selon la réglementation, les symboles présentés en tête haute doivent être compatibles des symboles présentés en tête basse. Plus précisément, il ne doit pas être utilisé le même symbole en tête haute et en tête basse pour désigner des informations différentes. En revanche, un symbole différent de celui de la tête basse peut être utilisé en tête haute pour présenter la même information, s'il n'y a pas d'ambiguïté avec d'autres symboles.

Mal comprise, cette notion aboutit à faire de la symbologie HUD une simple recopie des instruments en tête basse (exemple du HSI). Il est certain cependant que cette notion conduit à particulariser les symbologies selon l'avion.

Historiquement, il faut noter que des transferts dans la forme des symboles se font également de la tête haute vers la tête basse. Ainsi certains horizons artificiels (PFD) présentent aujourd'hui un vecteur vitesse comme un HUD.

Au delà du choix de la forme des symboles, la notion de compatibilité devrait être étendue au concept d'emploi de l'appareil : le HUD doit faire partie d'un ensemble d'instruments cohérents avec l'emploi de l'appareil.

Clutter (*clutter*)

Le *clutter* désigne la saturation du champ visuel, tel qu'il peut être provoqué par la présentation d'une symbologie trop chargée. Plus précisément, il semble que l'on puisse distinguer deux types de *clutter* : le *clutter* physique, directement proportionnel au champ couvert par les symboles, et le *clutter* cognitif, plus difficilement quantifiable, lié à la difficulté d'appréhension de symboles trop nombreux (par exemple, la fameuse saturation au delà de 7 informations présentées) ou de forme inadaptée.

Des solutions utilisées pour lutter contre le *clutter* consistent à alléger la symbologie en enlevant des symboles ou en changeant le format de représentation (numérique au lieu d'échelle). L'allègement peut se faire soit de façon automatique en fonction de la phase de vol (e.g. au contact des roues) ou du mode actif (e.g. en mode AIII), soit au choix du pilote (mode *declutter*) (AC/AMJ 25-11, 5e).

La notion de *clutter* est naturellement liée à celle de focalisation d'attention...

Concept d'emploi (*concept of use*)

Le concept d'emploi correspond à la façon dont le collimateur doit être utilisé.

Il est possible de distinguer trois concepts principaux :

- Le concept 'manuel' : le HUD sert d'instrument de pilotage manuel. Pour les opérations sans visibilité, les ordres de guidage sont présentés sous la forme d'un directeur de vol.
- Le concept 'surveillance' : le HUD sert à la surveillance du fonctionnement du pilote automatique. Lors des opérations sans visibilité, il ne présente pas d'ordre de guidage, mais seulement les écarts bruts à la trajectoire et leurs valeurs maximales admissibles. Dans ce concept, l'utilisation du HUD reste optionnelle puisque l'avion est certifié au même niveau avec ou sans HUD.
- Le concept 'hybride' correspond à une extension du concept précédent pour permettre un gain opérationnel. Le HUD est alors utilisé en surveillance de l'approche automatique, et éventuellement en pilotage manuel en cas de défaillance du PA en dessous de la hauteur de décision. L'utilisation du HUD hybride est obligatoire pour permettre ce gain opérationnel.

Le choix d'un concept d'emploi est lié à la conception du rôle de l'équipage dans la conduite de l'appareil. Il est surtout fortement déterminé par les capacités de l'avion et son niveau d'automatisation.

Le concept d'emploi est un élément déterminant pour la constitution de la symbologie : le concept manuel favorise une symbologie très complète donc chargée, les concepts surveillance ou hybride favorisent une symbologie plutôt dépouillée. Cependant, les collimateurs modernes tendent à un domaine d'utilisation large et peuvent fréquemment être utilisés en manuel ou en surveillance, avec des limitations d'emploi selon les phases de vol.

Catégories d'opération (*operation category*)

Une opération de **catégorie I** est une approche de précision aux instruments utilisant ILS, MLS ou PAR suivie d'un atterrissage avec une hauteur de décision égale ou supérieure à 200 ft et une portée visuelle de piste égale ou supérieure à 550 m. (JAR OPS 1E).

Une opération de **catégorie II** est une approche de précision aux instruments suivie d'un atterrissage effectués à l'aide d'un ILS ou d'un MLS caractérisés par :

- (i) une hauteur de décision comprise entre 100 et 200 ft ; et
- (ii) une portée visuelle de piste non inférieure à 300 m.

Les opérations de **catégorie III** se subdivisent comme suit :

- (i) *Opérations de catégorie III A* - Une approche de précision aux instruments suivie d'un atterrissage effectués à l'aide d'un système ILS ou MLS caractérisé par :
 - (A) une hauteur de décision inférieure à 100 ft ;
 - (B) et une RVR égale ou supérieure à 200 m.
- (ii) *Opérations de catégorie III B* - Une approche de précision aux instruments suivie d'un atterrissage effectués à l'aide d'un système ILS ou MLS caractérisé par :
 - (A) une hauteur de décision inférieure à 50 ft, ou sans hauteur de décision ;
 - (B) et une RVR inférieure à 200 m, mais supérieure ou égale à 75 m.

Système de pilotage passif après panne (*fail passive landing system*)

Un système de pilotage est passif après panne, s'il ne génère, en cas de panne, aucune condition significative hors trim ni aucune déviation notable de la trajectoire ni attitude anormale ; l'atterrissage n'est toutefois pas effectué automatiquement. Avec un système de pilotage automatique passif après panne, le pilote reprend le contrôle de l'avion après une panne. (JAR OPS 1E).

Système de pilotage opérationnel après panne (*fail operational landing system*)

Un système de pilotage est opérationnel après panne, à condition que, en cas d'occurrence d'une panne en dessous de la hauteur d'alerte, l'approche, l'arrondi et l'atterrissage puissent être effectués automatiquement. En cas de panne, le système d'atterrissage automatique fonctionnera comme un système passif après panne. (JAR OPS 1E)

Système d'atterrissage hybride opérationnel après panne (*fail operational hybrid system*)

Ce système est constitué par un système d'atterrissage automatique passif après panne et d'un système de guidage secondaire indépendant qui permet au pilote de terminer l'atterrissage manuellement après défaillance du système primaire. (JAR OPS 1E)

Note : Un système de guidage secondaire indépendant typique est constitué d'un viseur tête haute qui fournit des informations de guidage qui prennent normalement la forme d'information de contrôle mais qui peuvent aussi être des indications de position (ou d'écart). (JAR OPS 1E)

Champ de vision (*field of view*)

Le champ de vision est le champ angulaire couvert par le collimateur, spécifié en degrés verticalement et horizontalement.

On distingue généralement deux champs :

- le champ de vision total (*total field of view*) désigne le champ maximal visible en déplaçant éventuellement la tête ;
- le champ de vision instantané désigne le champ visible lorsque la tête est en position fixe (la position normale de pilotage avec le HUD).

Les HUD civils récents présentent un champ de vision total de l'ordre de 30° par 20° (AGARD, 1999).

Confusion de mode (*mode confusion*)

Ce problème relève du thème plus large de la compréhension du fonctionnement d'un automatisme par l'opérateur humain. Dans le cas des HUD, plusieurs modes interviennent : les modes du pilote automatique (typiquement un mode vertical et un mode horizontal) et le mode du HUD lui-même, qui concerne la symbologie mais aussi sa logique de fonctionnement. Ces différents modes sont signalés par des abréviations et par des changements de symbologie adéquats afin d'éviter les confusions. (voir notamment JAR 25.1335 et JAR HUD 903, section 7.a).

Instrument primaire (*primary instrument*)

Un instrument qui satisfait aux exigences de précision et d'intégrité requises pour une phase de vol, une procédure ou une opération donnée (FAA AC 120-28D).

Typiquement, l'utilisation d'un instrument primaire de pilotage permet d'accomplir la tâche avec une performance satisfaisante sans avoir à se référer à d'autres instruments.

Situation inusuelle (*unusual situation*)

Situation dans laquelle l'attitude de l'avion est inusuelle : typiquement, au delà de -20/+30 degrés d'assiette longitudinale ou +/-60 degrés d'inclinaison latérale.

Des symbologies dédiées à ces situations ont été développées. Elles comprennent classiquement une compression de l'échelle de tangage et un allègement de la symbologie usuelle.

La capacité d'un HUD à permettre le rétablissement d'une situation usuelle est un aspect important abordé lors de la certification.

Focalisation d'attention (*attentional tunneling / cognitive capture*)

Ce phénomène d'attention excessive allouée à la symbologie au détriment des autres éléments externes ou internes est bien connu des utilisateurs de HUD ; il est fréquemment rencontré lors de leur formation.

Il constitue en effet un thème de recherche récurrent dans la littérature sur les HUD.

Différents modèles de l'allocation d'attention permettent des tentatives d'explication et d'évitement de ce phénomène : l'attention se porterait plus volontiers sur des éléments de même nature que sur des éléments géographiquement proches. Cette hypothèse motive l'utilisation de symboles conformes ou rattachés au monde extérieur. A fortiori, la séparation des éléments d'information dans le champ visuel pourrait favoriser les stratégies de parcours visuel (*scanning*) et ainsi améliorer la performance (NASA).

Formation et entraînement (*instruction and training*)

L'utilisation du HUD requiert la mise en place de programmes de formation et d'entraînement spécifiques, dans la mesure où le pilotage au HUD modifie profondément les habitudes du pilotage de base. Le HUD constitue souvent le seul équipement nouveau lors des qualifications de copilotes en commandant de bord. (voir FAA AC 120-29a et 120-28d).

Criticalité d'une fonction (*function criticality*)

Cette notion s'applique notamment à la fonction d'affichage d'un instrument tel que le HUD. La réglementation distingue trois niveaux :

- critique : la perte de la fonction doit être Extrêmement Improbable (probabilité d'occurrence inférieure à 10^{-9} par heure de vol ou par événement – décollage ou atterrissage – voir par exemple FAA AC 120-28D),
- essentielle : la perte doit être Improbable (probabilité comprise entre 10^{-5} et 10^{-9}),
- non essentiel.

Charge de travail (*workload*)

La non augmentation de la charge de travail est un critère primordial de la certification d'un HUD (JAR HUDS 903 4.a). La notion de charge de travail est précisée en appendice des textes FAR et JAR 25, en décrivant les différentes fonctions et dimensions de la charge de travail. En revanche, il n'est pas proposé de méthode d'évaluation spécifique.

Symbologie (*symbology*)

Au delà de la liste des symboles qui la compose ou des informations qu'elle présente, une symbologie peut être caractérisée notamment en utilisant les différentes notions clefs recensées ci dessous :

référentiel (*frame of reference*)
T basique (*basic T*)
alphanumérique (*digital*)
analogique (*analogue*)
forme (*shape*)
taille (*size*)
position (*location*)
dynamique (*dynamics*)
retard (*latency*)
compensation (*quickening*)
limitation du déplacement (*caging*)
hiérarchie (*hierarchy*)
masquage (*masking*)

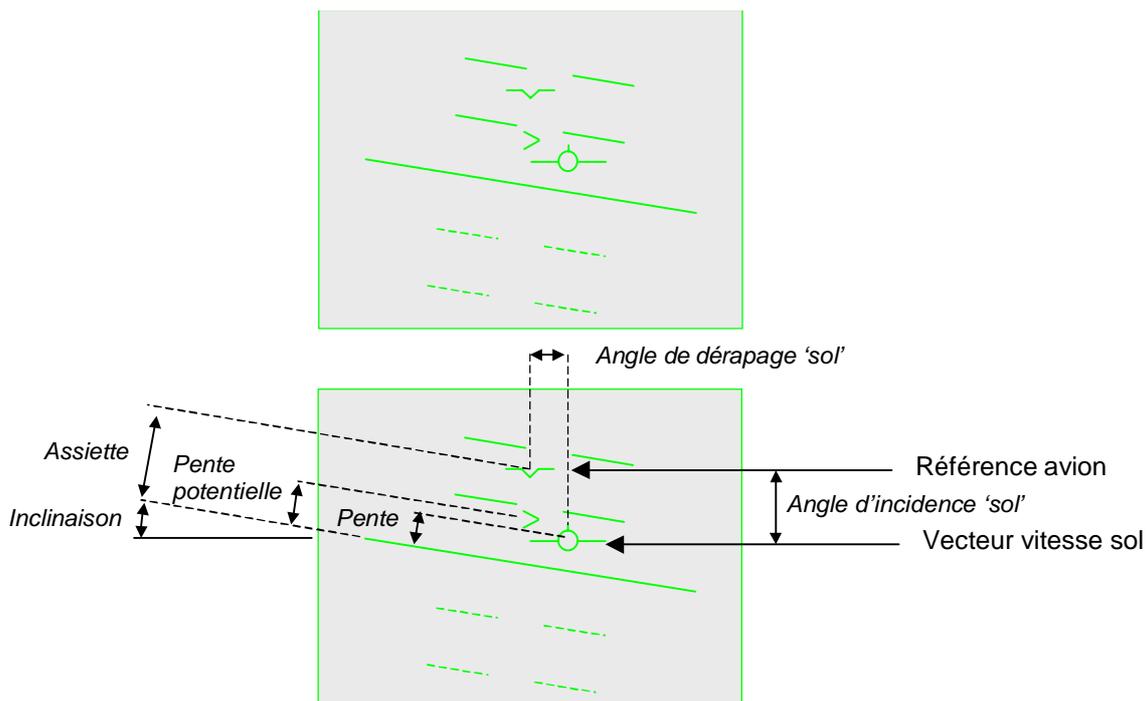
-o-O-o-

Annexe 4 : Principaux symboles HUD analogiques

Les symbologies des collimateurs tête haute modernes sont construites autour d'un ensemble de symboles analogiques conformes qui, complétés des affichages numériques de l'altitude et de la vitesse, fournissent l'ensemble des informations nécessaires au pilotage basique.

Ces symboles ont été l'objet de nombreuses études, leur présentation est aujourd'hui quasiment stabilisée.

Cette annexe présente un schéma typique de la symbologie analogique de base et rappelle la signification de ces principaux éléments constitutifs.



Symbole de référence avion :

Ce symbole, également souvent désigné sous le terme de maquette avion, est la trace de l'axe longitudinal de l'avion sur le collimateur. Ce symbole est donc fixe par rapport au collimateur ; c'est par rapport à lui que sont placés les autres symboles, mobiles dans le repère avion.

Ce symbole est vu superposé à l'horizontale locale (i.e., à l'horizon lorsque l'avion est au niveau du sol), lorsque l'assiette longitudinale est nulle.

Ce symbole prend classiquement la forme d'une silhouette d'avion vu de derrière (aile de mouette).

Horizon et échelle de tangage :

L'horizon et l'échelle de tangage sont des éléments solidaires entre eux.

L'horizon est figuré par une ligne figurant l'horizontale locale. Il se superpose effectivement à l'horizon réel lorsque l'avion est au sol.

La position de l'horizon par rapport au HUD permet de connaître l'attitude de l'avion : inclinaison latérale et assiette longitudinale qui correspond à l'écart angulaire entre le symbole de référence avion et l'horizon. L'horizon constitue donc un élément du T basique. L'horizon est généralement gradué pour constituer une échelle de cap (non figurée sur le schéma ci dessus).

L'échelle de tangage est solidaire de l'horizon. Généralement constituée de barres tous les 5 degrés, asymétrique à cabrer et à piquer, elle permet de repérer la valeur de l'assiette longitudinale et d'améliorer la perception de l'attitude.

Vecteur vitesse :

Ce symbole constitue l'un des intérêts majeurs de la présentation d'informations en tête haute. Les premiers collimateurs tête haute figuraient un vecteur vitesse air, positionné à partir des valeurs d'incidence et de dérapage mesurés par les moyens anémométriques traditionnels. Avec la généralisation des centrales à inertie, le vecteur vitesse inertiel est aujourd'hui présenté sur l'ensemble des collimateurs modernes.

L'intérêt est que ce symbole indique directement la direction dans lequel l'avion se dirige ; cette information capitale devient accessible au pilote sans que celui-ci ait à intégrer mentalement les informations d'attitude et anémométriques et les effets du vent...

Les écarts angulaires entre le symbole de référence avion et le vecteur vitesse (VV) fournissent une évaluation des angles d'incidence et de dérapage (au vent près).

L'écart angulaire entre l'horizon et le VV donne la valeur de la pente.

Pente potentielle :

L'information de pente potentielle constitue un autre intérêt majeur des collimateurs tête haute ; elle est un des concepts de base initialement défendu par les ingénieurs d'essais français (Klopfstein, Wanner,...).

On rappelle que la pente potentielle est une grandeur indicative dérivée de l'énergie totale de l'avion, obtenue par le calcul suivant :

L'énergie totale est : $E = mgz + \frac{1}{2}mV^2$. Elle permet de définir la hauteur totale : $H = z + \frac{V^2}{2g}$.

La dérivée fournit la vitesse ascensionnelle totale : $W = \frac{dH}{dt} = V_z + \frac{V}{g} \frac{dV}{dt}$

En utilisant que $V_z = V \sin \gamma$, on peut définir une pente totale (ou potentielle) telle que $W = V \sin \gamma_t$ (en supposant $W < V$; sinon la pente totale est de 90° : ce cas n'existe que pour les avions dotés d'un rapport poussée/poids supérieur à 1 ; il indique que l'avion est capable de monter à la verticale en continuant d'accélérer).

La pente totale est donc donnée par : $\sin \gamma_t = \sin \gamma + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}$.

La pente potentielle de l'avion correspond à la pente que peut prendre l'avion avec la poussée courante, tout en conservant sa vitesse.

Cette information est généralement présentée sous la forme d'un chevron décalé pour coïncider avec l'aile du vecteur vitesse lorsque la pente potentielle est égale à la pente totale.

L'écart angulaire entre l'horizon et le chevron est directement égal à la pente potentielle.

L'écart angulaire entre le vecteur vitesse et le chevron représente l'écart entre la pente actuelle et la pente potentielle : il figure l'accélération sur trajectoire, mesurée par un accéléromètre.

Le chevron de pente potentielle permet donc le contrôle de la vitesse et de la poussée délivrée par les moteurs ; il permet également le contrôle du travail de l'automanette quand l'avion en est équipé.

La pente potentielle constitue une aide au pilotage considérable, notamment aux basses vitesses (stabilisation de l'approche, résolution de l'instabilité de propulsion, passage d'orages, remise de gaz).

Elle est également un élément de sécurité en cas de panne au décollage, puisqu'elle permet le contrôle direct de la pente maximale possible sans risque de dégrader la vitesse.

Autres informations et symboles couramment rencontrés :

Vitesse air et vitesse sol

Décembre 2001

La connaissance de la vitesse air est indispensable pour le pilotage de l'avion puisqu'elle détermine les qualités de vol, tandis que la valeur de la vitesse sol détermine l'énergie de l'avion.

La connaissance de la vitesse sol est également intéressante pour la gestion des situations de cisaillement de vent (*windshear*) mais bien souvent elle n'est utilisable que par des pilotes expérimentés.

Les collimateurs récents présentent simultanément des affichages numériques des valeurs de la vitesse air et de la vitesse sol.

Altitude barométrique et hauteur sol

De façon analogue aux informations de vitesse air et sol, la connaissance de ces deux informations est indispensable au pilotage et à la navigation.

L'altitude barométrique est ainsi toujours présentée, tandis que la hauteur radio sonde est généralement présentée dès lors que la radio sonde fournit effectivement une information correcte, soit généralement à une hauteur inférieure à 1500 pieds.

Vitesse verticale

Le signe de la vitesse verticale est directement figuré en tête haute par l'écart entre l'horizon et le vecteur vitesse.

L'affichage de la valeur numérique de la vitesse verticale n'apparaît pas directement nécessaire dans la mesure où cette valeur peut être évaluée à partir de la pente et de la valeur de la vitesse figurant sur le HUD.

Cependant, la connaissance du 'vario' est une exigence fréquente de la part des pilotes d'expérience traditionnelle, et elle apparaît souvent utile pour le suivi des consignes données par le contrôle aérien.

Ecart de vitesse

Cet écart est généralement figuré par une barre de longueur proportionnelle à la valeur de l'écart, située au bout de l'aile du vecteur vitesse.

Il correspond à l'écart entre la vitesse actuelle et la vitesse visée (présélectionnée).

-o-O-o-

Annexe 5 : Recensement des textes réglementaires concernant les HUD

Réglementation JAA

JAR 25 : Large Aeroplanes, AMJ 25-11 : Electronic Display Systems. Change 14, 27 mai 1994.

Ces textes sont les équivalents européens de la FAR 25 et de l'AC 25-11 de la FAA. Les différences entre les textes européens et américains sont tout à fait minimales, notamment pour ce qui concerne la description des informations à présenter. Voir les commentaires sur les documents FAA.

JAR AWO : All Weather Operations Change 2, 1st August 1996.

Ce document traite des opérations sans visibilité, et notamment de l'utilisation d'un HUD hybride pour les opérations de catégorie III (sous partie 3).

Il définit le concept de système hybride opérationnel après panne et il spécifie que ce système doit satisfaire les exigences de performance globales, sans que HUD doivent forcément satisfaire les mêmes critères que le système primaire.

JAR HUDS 901 : Category 3 Operations with a Head Up Display Issue 18, 11 avril 1994.

Traite d'un HUD symbolique et conforme utilisé pour le pilotage manuel des opérations de cat. III (l'utilisation hybride est couverte par la sous partie 3 de la JAR AWO) : le HUD est utilisé par le pilote aux commandes tandis que l'autre pilote surveille l'approche en tête basse.

Ce document fournit les spécifications d'un tel HUD, selon une organisation fonctionnelle, et il donne les critères et méthodes à utiliser pour sa certification.

Quelques extraits :

JAR-AWO H307 : HUD characteristics : (c) Display symbology :

(i) Symbology design :

The designed symbol set (size and font) must be clear and uncluttered and enable easy assimilation of the displayed information. It must have no features which might lead to confusion or to an error by the pilot.

The display format must contain features minimising the possibility of pilot fixation on the symbology when the aircraft is near the ground.

There must be clear and unambiguous indication to the pilot of pitch and bank. If non-conformal positioning of normally conformal elements occurs (e.g. horizon line and flight path vector), this must be clearly indicated [not by a message].

(ii) Symbology hierarchy

A symbology hierarchy must be established such that higher priority symbology clearly and unambiguously overwrites lower priority symbology.

(iii) Compatibility with head down instruments

The HUD symbology must be sufficiently compatible with normal flight instruments to prevent misinterpretation or difficulty in transition between the two types of display.

(iv) Outside world view

(...) If an artificial runway or other external ground references are provided they must correlate with the real world as seen by the pilot.

JAR-AWO H315 : Decision height determination

(...) arrival at the decision height must be positively annunciated on the HUD.

JAR-AWO H316 : Go around

The HUD must provide sufficient information to permit the pilot to initiate and stabilise a go-around manoeuvre during the approach and flare without reverting to other displays.

The approach information must be removed on selection of go-around unless it is shown that its presence does not interfere with the go-around information.

JAR-AWO H323 : Automatic throttle control

An automatic throttle control system must be installed unless it can be shown that :

*airplane speed can be controlled without an excessive workload
the touchdown performance limit are achieved
(...) The mode in which the auto throttle is operating must appear in the HUD.*

JAR-AWO H351 : Mode selection and switching

A positive and continuous indication must be given on the HUD and at the other pilot's station of the mode in which the HUD is being used and of any armed modes (e.g. localizer or glide path track, flare). (...) Changes of symbology to denote the mode selected and its status are acceptable, provided they are unambiguous.

JAR-AWO H352 : Indications and Alerts

(i) An excess ILS deviation alert on the HUD and at the other pilot's station (e.g. an amber flashing light).

**JAR HUDS 902 : Category 2 Operations with a Head Up Display
Issue 8, 26 avril 1995.**

Ce texte fournit les spécifications, critères et méthodes pour la certification d'un HUD unique pour les approches de cat. II, l'autre pilote surveillant l'atterrissage en tête basse.

**JAR HUDS 903 : Interim Policy – Head Up Displays.
Issue 7, 30 avril 1997.**

Applicable sous la JAR 25, ce texte concerne des HUD symboliques, sans imagerie, mais non nécessairement conformes, utilisés comme moyen primaire ou secondaire (complément des informations primaires présentées en tête basse).

La non augmentation de la charge de travail est retenue ici comme la première exigence.

Le texte prévoit que le HUD puisse servir au pilotage manuel ou à la surveillance du pilote automatique.

Il aborde la plupart des problèmes spécifiques au HUD : charge de travail, focalisation d'attention, risques de confusion, modes, *clutter*, limites de champ, compatibilité avec la tête basse, conséquences pour le travail en équipage, détection des pannes et alarmes,...

Il met en avant la nécessité de constituer la symbologie en fonction de l'appareil et de l'utilisation visés, ce qui semble en effet une approche plus satisfaisante que de chercher à fixer un standard indépendamment du contexte d'utilisation.

JAR OPS 1 Sous partie E : opérations tout-temps.

Ce texte concerne la démonstration opérationnelle, à établir par l'exploitant avant mise en opérations d'un système nouvellement certifié, ainsi que le cadre de la formation des pilotes.

Il définit les minimums, équipements et qualifications requis pour procéder aux opérations tous temps (classique, I, II, IIIA et IIIB). Il définit également les concepts d'instruments hybrides et secondaires utilisables pour ces opérations.

JAR-OPS Section 4 / Part 3, 01 février 1999.

All Weather Operations with Head Up Display Guidance Systems (HUD).

Ce texte apporte des recommandations sur l'utilisation de HUD en tant que moyen primaire ou secondaire dans les opérations avec faible visibilité.

Les procédures pour HUD hybrides sont données dans le JAR OPS 1, sous partie E. Cette section 4 donne seulement des compléments concernant la formation et l'entraînement des équipages pour l'utilisation du HUD hybride.

Il donne les procédures pour atterrissages manuel avec HUD en catégories II et IIIA.

Il spécifie (2.3.3) que la compagnie doit mettre en place un dispositif de suivi de la performance du système de guidage HUD de chaque avion. Il spécifie également (3.2) les programmes d'entraînement nécessaires, qui doivent comporter notamment une description de la symbologie et de ses relations avec le monde extérieur, avec la réponse de l'avion, avec les alarmes relatives à l'environnement.

Le document donne également les programmes requis pour effectuer un décollage avec moins de 150 à 200 m de visibilité.

Décembre 2001

Les procédures doivent être établies en fonction des caractéristiques propres à chaque équipement ; elles doivent spécifier la répartition des tâches au sein de l'équipage.

JAA project of interim policy : Human Factors Aspects of Flight Deck Design, Issue 2, 15-03-2001.

Ce projet de document vise à définir les règles de certification à appliquer lors de l'introduction dans le cockpit d'une nouvelle fonctionnalité (*novel feature*).

En effet, ce document est requis en l'absence actuelle de règles spécifiques aux facteurs humains pour ce type de certification, dans l'attente d'un règlement définitif élaboré par le groupe d'harmonisation FH des JAA (HFHWG),

La définition de *novel feature* est précisée : peut être considéré comme telle :

- une nouvelle technologie,
- un nouveau concept d'interface,
- une nouvelle utilisation d'un équipement existant,
- une nouvelle procédure.

La certification doit permettre de vérifier les points suivants :

- la facilité d'utilisation,
- l'effet des erreurs, leur détection et leur récupération,
- le partage des tâches, la charge de travail en situation normale et anormale,
- la pertinence des retours d'information.

La méthode suggérée est intitulée *Human Hazard Assesment* ; elle est similaire à la méthode *Functional Hazard Assesment* largement utilisée pour la certification de systèmes.

L'accent est mis cependant sur les caractéristiques spécifiques de l'opérateur humain, dont la probabilité d'erreur qui au mieux doit être appréciée comme Probable, et l'identification des éléments de protection qui prennent ainsi une importance considérable.

L'importance d'identifier clairement la philosophie de conception de l'interface est également soulignée.

Applicabilité pour la certification de HUD :

Ce projet de texte réglementaire est général ; le cas des HUD utilisé pour améliorer les capacités d'atterrissage est néanmoins cité comme exemple de nouvelle technologie dont la certification nécessite l'application de règles orientées sur les facteurs humains.

Ce texte reste cependant qualitatif, il définit une démarche générale pour l'élaboration d'un programme de certification orienté facteurs humains sans préciser les moyens, autres que la présence d'un assistant FH dans l'équipe de certification.

Réglementation FAA

FAR PART 25, May 27, 1998.

Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes.

Il s'agit des règles de base de la certification ; les règles principales applicables aux HUD sont notamment :

- 25.773 Pilot Compartment View
- 25.777 Cockpit Controls
- 25.1303 Flight & Navigation Instruments
- 25.1321 Instruments: Arrangement & Visibility : the "Basic T".
- 25.1323 Airspeed Indicating System
- 25.1331 Instruments Using a Power Supply
- 25.1333 Instrument Systems
- 25.1335 Flight Director Systems
- 25.1381 Instrument Lights

FAA AC 120-28D et appendices, 13 juillet 1999.

Criteria for Approval of Category III Weather Minima for Takeoff, Landing and Rollout.

Décembre 2001

Ce texte très complet comporte des recommandations pour la certification des HUD (5.6) pour les opérations en catégorie III.

Le HUD utilisé en manuel doit présenter des informations de guidage et être 'fail passive', c'est à dire qu'une défaillance du HUD ne doit pas conduire à une déviation significative de la trajectoire avant détection et transition avec un autre système.

Le texte aborde aussi le HUD utilisé en système hybride (e.g., *a fail passive autoland system used in combination with a monitored HUD flight guidance system*) : le pilote automatique est le système primaire et le HUD sert à la surveillance et au guidage si un retour en manuel est nécessaire. La transition de l'automatique au guidage manuel fait l'objet de recommandations précises.

L'appendice 2 traite les décollages sans visibilité, avec des recommandations sur les HUD (8.3) :

- a) la charge de travail doit satisfaire à la section 25.1523
- b) le HUD ne doit pas obscurcir la vue extérieure de façon significative
- c) sauf défaillance du HUD, il ne doit pas y avoir besoin de retour sur un autre instrument pendant tout le décollage ou en cas d'arrêt décollage.
- d) l'utilisation du HUD ne doit pas demander plus de travail ou d'habileté que celle d'un autre instrument.
- e) les modes du HUD et du PA doivent être affichés clairement dans le HUD, à moins qu'il ne soient affichés ailleurs de façon acceptable...
- f) la seule présentation de l'écart latéral semble insuffisante : une POC est nécessaire si le HUD présente des informations brutes sans guidage.
- g) si il n'y a qu'un HUD, celui-ci doit se trouver en place gauche (CDB).

L'appendice 3 concerne l'atterrissage et le roulage en cat. III. Elle donne des éléments sur les critères applicables et le choix de pilotes pour la certification des HUD en particulier (7.1). Des recommandations détaillées sont données pour la certification des HUD utilisés comme moyen de guidage ou de surveillance (8.3). Comme pour le décollage, l'absence de guidage est jugée inacceptable sauf POC. Le chapitre 8.4 traite spécifiquement de la certification des HUD hybrides, qui sont soumis aussi à POC, tout comme l'EVS (5.7).

FAA AC 120-29A et appendices, draft 18, 1999.

Criteria for Approval of Category I and Category II Weather Minima for Approach

Ce texte donne les conditions, performances, équipements, procédures, entraînement et qualifications (dont HUD) nécessaires pour procéder aux approches en cat. I et II.

Il comporte des spécifications sur les HUD, utilisé pour guidage ou surveillance ; il spécifie en particulier que :

- le HUD utilisé en manuel doit fournir des informations de guidage : directeur de vol (5.8.7)
- dans ce cas, des informations de situation doivent tout de même être présentées (5.5)
- les systèmes hybrides (HUD comme moyen de surveillance et de réversion) sont également acceptables s'ils fournissent le même niveau de performance et de sécurité que le système avec guidage.

FAA AC 25-11, 16 juillet 1987.

Transport Category Airplane Electronic Display Systems.

Recommandations (non obligatoires, comme toutes les AC) générales pour la certification des affichages à tube cathodiques (CRT) et notamment sur leur symbolologie.

Ce texte ne peut pas toujours s'appliquer tel quel aux HUD en raison de leur spécificités (monochrome...), mais il constitue une base de référence.

Cette circulaire précise le niveau de criticité des différentes informations de pilotage et de navigation, repris ci-dessous. Cette considération concerne la probabilité d'occurrence de la disparition d'un affichage ; elle est de première importance dans l'élaboration d'un programme de certification.

Sont ainsi considérées comme :

- critiques : attitude, vitesse air, altitude barométrique ;
- essentielles : vitesse verticale, dérapage, cap, navigation, propulsion*, alarmes* ;
- non essentiel : taux de virage.

Décembre 2001

* avec des mentions particulières.

Un chapitre est consacré aux problèmes FH dans la méthodologie d'évaluation (4.b) : choix de la population, usage de la simulation.

Symbologie : recommandations sur la position (5.d), le *clutter* (5.e), l'interprétation des affichages en 2D (5.f), les dispositifs destinés à attirer l'attention (5.g).

Les spécifications pour la présentation des informations (7) reposent sur l'exigence fondamentale :
Display elements should be natural, intuitive, and not dependent on training or adaptation for correct interpretation.

Instruments de vol primaires (7.d) : recommandations sur la disposition, la longueur des échelles, problèmes liés à l'information d'altitude, indications des unités, graduations (10 nœuds pour la vitesse et 100 pieds pour l'altitude, si la valeur courante est affichée).

Représentation de l'attitude (7.e) : situations inusuelles attendues, horizon toujours visible, pas de mélange entre les indicateurs de roulis à référence sol ou avion dans le même cockpit.

Numérique / analogique (7.f) : la FAA est en faveur des affichages analogiques ; validation doit être effectuée si l'affichage est digital.

Sources de navigation et changements de mode (8.c) : indication des systèmes de navigation utilisés (VOR 1,...), cap magnétique ou vrai, changements de mode.

FAA Dale Dunford

Head Up Display – Certification Factors for Transport Airplanes.

Los Angeles ACO, 21 septembre 1996.

Cette présentation rappelle les textes en vigueur aux USA : FAR 25, AC 25-11, AC 120-28D entre autres, ainsi que les nouveaux standards et critères : Issue Paper, AC 120-29A (draft), SAE ARP 5288 (qui constitue un projet de circulaire FAA sur les HUD).

Elle se réfère également aux documents SAE, JAR, MIL et à des ouvrages de fond.

Elle développe certains facteurs à prendre en compte dans la certification :

- System Safety Assessment
- Visibility and Field-of-View
- "Basic T" Deviations (cf AC 25-11)
- *Clutter* vs. Information Content ("a design challenge")
- Unusual Attitude Recovery (needs to support attitude awareness, recognition and recovery – must be usable in nominal and dynamic, unusual conditions)
- Monochrome Limitations (HUDs lack color, symbology must compensate)

FAA DOT/FAA/CT-96/1

Human Factors Design Guide

Contient des définitions, des directives et des recommandations sur tous types d'interfaces : environnement, écrans, commandes, ordinateurs, documentation,...

Le chapitre 7 concerne les interfaces homme-équipement et notamment les écrans larges. Les directives sur les symboles portent sur leur taille (fonction de la distance), forme. Des règles de choix sur la présentation des informations (digital ou analogique, échelle ou pointeur mobile,..) sont données.

Le chapitre 8.5 concerne l'affichage de données sur ordinateur mais s'applique aussi aux affichages d'autres équipements.

Peu de choses concernent explicitement les HUD.

FAA HUD Certification Criteria - Working Paper.

7 septembre 2000.

Ce papier communiqué par Dale Dunford complète le projet SAE ARP 5288. Il donne des précisions sur l'interprétation des exigences réglementaires sur le contenu des symbologies, notamment sur des points exigés par l'CA 25-11 pour les affichages électroniques mais non abordés dans les textes portant spécifiquement sur les HUD : informations nécessaires, nécessité et format des échelles, récupération des attitudes inusuelles, affichages pour le décollage, placards de vitesse,...

FAA Issue Papers, for each Part 25 HUD certification...

Aucun *Issue Paper* n'a pu être obtenu dans le cadre de cette étude, pour des raisons de protection du secret industriel.

FAA Memorandum, 25 février 1992.

POLICY: Airspeed Displays for Electronic Flight Instrument Systems (EFIS) Transport Airplane Directorate, Aircraft Certification Service, ANM-100

Ce memorandum complète l'AC 25-11 (7.d) ; il concerne un problème de perception de la vitesse sur EFIS lié à une échelle de vitesse avec graduation mobile.

Cette échelle comporte des indications de vitesses minimales et/ou maximales (placards) qui sont indépendantes de la masse et de la configuration (volets,..) : cela est jugé inacceptable.

FAA Memorandum, 12 septembre 1996.

POLICY: Low and High Speed Awareness Cues for Linear Tape Airspeed Displays Manager, Transport Airplane Directorate, ANM-100.

Ce memorandum donne des compléments sur la nature, la forme et la couleur des placards à présenter. Il spécifie que : l'indication de vitesse minimale doit prendre en compte le facteur de charge (en plus de la masse, de la configuration, de l'altitude..), l'indication de vitesse maximale doit tenir compte de la sortie des éléments.

Documentation SAE

SAE AIR 4742, Head-Up Display Issuing Committee, mars 1998.

Display Characteristics of FDI Head-Up Guidance System as Approved for the B-727 Airplane.

The scope of this document is limited to descriptions of the display characteristics of the Flight Dynamics, Inc. (FDI) Model 1000WS Head up Guidance System (HGS) as installed on the Boeing 727 airplane and certified by the Federal Aviation Administration for use in Category III landing operations. The symbology depicted in this document is referenced to the particular pilot task(s) for which it was designed. Also included are descriptions of operational features of the particular symbol along with any associated criteria regarding symbology constraints, source data, or position error.

Ce document décrit en détail les symboles présentés sur un HUD Flight Dynamics certifié sur B 727 pour des atterrissages en cat. III. Chaque symbole fait l'objet d'une fiche dont le canevas peut servir de référence pour la description d'autres symbologies.

SAE ARP 4102/8, novembre 1998.

Flight Deck, Head-Up Displays

This document recommends criteria for the design and installation of Head-Up Display (HUD) systems. The recommendations are applicable to HUD systems which display flight information focused at infinity in the forward field of view. This annex does not address devices for peripheral vision or displays worn by the pilot, nor the presentation of EVS information.

Ce document recommande que la symbologie HUD soit conforme dans les situations usuelles, que le nombre de mode reste limité, et que le mode soit clairement indiqué. Les modes principaux peuvent être : décollage, croisière, approche et roulage.

Il précise la liste des informations de base à présenter : attitude, cap courant et sélectionné, vecteur vitesse, vitesse air avec ses limites basse et haute, altitude, vitesse verticale, mode, guidage et accélération latérale. Et en option : incidence, altitude radio sonde et pente potentielle.

La disposition doit respecter le T basic ; attitude, cap et trajectoire doivent être conformes.

En mode d'approche à vue, le HUD doit présenter en plus la pente sélectionnée.

En mode d'approche ILS, le HUD doit présenter en plus ILS, DH et guidage pour l'arrondi.

En mode roulage, le HUD doit présenter un guidage en direction, l'accélération sur trajectoire et les vitesses de référence.

La dimension des caractères alphanumériques ne doit pas être inférieure à 10 mrad (info. primaires) ou à 6 mrad (secondaires).

Décembre 2001

SAE ARP 4155, Aerospace Behavioral Engrg Technology, octobre 1997.

Human Interface Design Methodology for Integrated Display Symbology

The recommended design approach is described in Figure 1. The approach emphasizes the fundamental relationship between symbols, the information they encode, the context within which the symbols are displayed, and the tasks being supported. While this document is aimed at aircraft displays involving dynamic control or monitoring tasks, the methodology is applicable to a wide range of symbology development situations.

Ce document propose une méthodologie pour la conception des symbologies. Il fournit les définitions de termes clefs d'une approche 'facteurs humains' des symbologies.

Les symboles doivent satisfaire 3 critères :

- a) transmettre l'information qu'ils représentent sans introduire de biais ;
- b) permettre, en combinaison avec les autres symboles, de réaliser la tâche avec la performance voulue ;
- c) ne pas interférer avec d'autres symboles ou d'autres tâches.

Cette méthodologie repose sur l'hypothèse que l'association tâche-symbole est favorable. Elle utilise une analyse de tâche et un arbre de décision.

SAE ARP 5288, draft 12, 19 janvier 2000.

Transport Category Airplane Head Up Display (HUD) Systems.

Ce document important constitue un projet de réglementation américaine spécifique au HUD.

Il liste les documents de référence : FAR 25, AC, RTCA, SAE...

Il distingue 3 types d'applications du HUD :

- Supplemental use : le HUD vient en supplément de la tête basse. Exemple : apport d'informations lors d'une approche manuelle VFR.
- Alternate use : le HUD peut être utilisé à la place de la tête basse. Exemple : surveillance d'une approche automatique.
- Additional credit use : le HUD est utilisé à la place de la tête basse et permet d'augmenter les capacités opérationnelles de l'avion.

NB : un même HUD peut être certifié pour des applications différentes selon la phase de vol.

Dans les deux dernières applications, les informations de pilotage primaires doivent apparaître sur le HUD. Ces informations sont au minimum, celles de la FAR 25.1321 (basic T). Les autres informations requises sont fonction de la phase de vol.

Le chapitre 7 traite le choix des informations et contient des adaptations des textes réglementaires aux spécificités des HUD :

- La disposition en T basique est exigée sauf preuve contraire. Des exemples de déviations acceptées sont donnés : échelle de vitesse verticale entre altitude et attitude, information de cap en bas plutôt qu'en haut, vitesse air mobile à côté du vecteur vitesse.
- Les problèmes liés aux informations de tangage sont abordés. L'horizon doit rester dans le champ. (Le paragraphe 10.4 spécifie les méthodes de tests de situations inusuelles.)
- La présentation d'un vecteur vitesse est considérée comme essentielle. Celui-ci peut être de nature inertielle ou aérodynamique, et il est possible d'alterner selon la phase de vol.
- Les informations requises par la FAR peuvent n'être présentées que dans certaines phases de vol, sous réserve de démonstration (*part-time display*).

Le chapitre 8 aborde :

- la forme et la position des symboles ; il insiste sur l'intérêt de la standardisation.
- le *clutter*, mais ne donne pas de critères précis (8.3).
- les moyens d'attirer l'attention visuelle (8.4).
- la compatibilité entre tête haute et tête basse (8.5).

Le chapitre 9 aborde les affichages de mode, des sources d'information et des alarmes.

Le chapitre 10 donne des considérations sur les évaluations concernant notamment la variabilité de la performance humaine, la durée et le choix des pilotes pour le programme d'évaluation, les limites de la simulation et les critères de récupération de situations inusuelles.

Enfin, un glossaire de notions spécifiques aux HUD achève le document.

**SAE AS 8055, A-4 Aircraft Instruments Committee, mars 1999.
Minimum performance Standard for Airborne Head Up Display.**

This SAE Aerospace Standard (AS) specifies minimum performance standards for airborne binocular Head Up Displays (HUDs) in fixed wing aircraft. This document covers criteria for conformal and non-conformal HUD systems that are intended for use in the cockpit by the pilot or copilot. Display minimum performance characteristics are specified for standard and other environmental conditions for the purpose of product qualification. This document does not address sensor imaging systems, displays worn by the pilot (goggles, helmet mounted displays) or specific symbology to be displayed.

Ce document donne des spécifications chiffrées des caractéristiques géométriques, optiques (y compris imagerie) et technologies du HUD. Il ne précise pas la forme des symboles ni la nature des informations à présenter.

Annexe 6 : Tableau de synthèse des textes réglementaires existants

Texte	Origine			Statut			Finalité			Instrument			Opération			Concept			
	JAA	FAA	Autre	Règle applicable	Conformité	CR certification	Projet de règle	Conception	Certification	Opérations	Tous instruments	EFIS	HUD	Toutes opérations	Catégorie I	Catégorie II	Catégorie III	Manuel	Surveillance & Hybride
JAR 25	x			x				x	x		x			x					
HUDS 903	x			x				x	x				x	x				x	x
HUDS 902	x			x				x	x				x			x		x	x
HUDS 901	x			x				x	x				x				x	x	
JAR AWO	x			x				x	x				x			x	x		x
JAR OPS 1/E	x			x						x	x					x	x		x
JAR OPS 4/3	x			x						x			x			x	x	x	x
AMJ 25-11	x				x				x			x		x					
CRI	x					x			x		-	-	-	-	-	-	-	-	-
FAR 25		x		x				x			x			x					
AC 25-11		x			x			x				x		x					
AC 120-29a		x			x				x	x			x		x	x		x	x
AC 120-28d		x			x				x	x			x				x	x	x
Memorandum		x			x				x		-	-	-	-	-	-	-	-	-
IP		x				x			x		-	-	-	-	-	-	-	-	-
SAE ARP 4102/8			x	x				x					x	x				-	-
SAE ARP 5288			x				x	x					x	x				x	x

NB : les tirets indiquent des réponses variables selon le texte considéré.

Annexe 7 : Exigences réglementaires explicites sur les symboles HUD

	Toutes OPS		Catégorie II		Catégorie III	
	SAE ARP 4102/8	JAA HUD 903	FAA AC120-29a	JAA HUD 902	FAA AC120-28d	JAA HUD 901
Vitesse air	X	X	>	>	>	>
Altitude	X	X	>	>	>	>
Attitude roulis-tangage	X	X	>	>	>	>
Cap	X	X	>	>	>	>
Vecteur vitesse sol	x	x	>	>	>	>
Pente potentielle	r	x		>		>
Effet vent	x	x	>	>	>	>
Effet dérapage	x	x	>	>	>	>
Vitesse verticale	x	x	x	>	>	>
Radio altitude	r		x	x	x	x
Ecart ILS excessif			r	x	f	x
Position sur ILS			x	x	x	x
Passage marqueurs			x		>	
Passage DH			x	x	>	x
Guidage ILS	x		m	f	>	>
Accrochage ILS				x	x	x
Source de navigation			x		>	
Mode HUD					x	x
Modes PA en opération	x	x	x	x	>	x
Mode automanette						x
Symbole piste						f
Détection de panne	x	x	x	x	x	x
Interception ILS			f		f	f
Remise de gaz			f	f	x	x
Guidage à l'arrondi			f		f	f
Guidage au roulage			f		f	f

Légende : **X** : informations requises dans le T basique
 x : exigence réglementaire m : exigence réglementaire si pilotage manuel
 > : exigence au titre d'un texte plus général
 f : fonctionnalité mentionnée, non obligatoire, mais réglementée si elle est offerte
 r : recommandation

Annexe 8 : Canevas d'entretien Ingénieur Navigant d'Essai

Nom :

Organisme :

Objet : Certification des HUD : textes réglementaires, interprétation, expériences et difficultés rencontrées...

Quelles sont vos principales expériences en certification de HUD (quelle symbologie, sur quel avion, pour quel type d'opération) ?

Pouvez-vous décrire le processus de certification habituel des HUD ?

Partent-ils de l'utilisation prescrite ou de la philosophie des textes, ont ils construit des outils individuels (check list, do list, compilation de textes réglementaires ou connaissance par cœur) ? Prise en compte prioritaire de la cat III et des autres ensuite ou non, par des essais effectifs en vol ou des évaluations théoriques

Quel est votre rôle dans ce processus ?

Elaborez-vous un plan de certification que vous réalisez directement ou est-ce un travail que vous prescrivez à d'autres ?

Quels sont les textes réglementaires utilisés ?

On attend une liste de règles JAA ou FAA? Appréciation qualitative globale : bien fait suffisant, efficace, exhaustif...

Utilisez vous d'autres références que ces textes réglementaires ?

Nature (expérience, documents divers) origine ? pour quelle raison les utilisez vous ?

Quels textes traitent plus particulièrement de la symbologie ?

On attend une liste de règles JAA ou FAA

La certification porte-t-elle sur des caractéristiques précises de la symbologie :

- informations présentées ?
- forme des symboles ?
- analogique/digital ?
- disposition ?
- conformité ?
- autre ?

Quelles méthodes d'analyse de la symbologie ?

Quels sont les problèmes connus des HUD d'un point de vue technique et d'un point de vue FH?

Symbologie HUD et reste du cockpit ? et place droite?

Différentes phases de vols, des scénarios type, des analyses de parades à des problèmes connus de cette famille de système ?

Quels sont les aspects FH abordés lors de la certification?

Quelle référence faites-vous du pilote usager standard : niveau d'expertise, familiarité, fréquence d'usage ?

Comment traitez vous les parasitages de transfert d'expérience depuis d'autres systèmes civils ou militaires ?

Quels sont les méthodes et les critères utilisés pour ces aspects FH ?

Comment évaluez-vous les dimensions FH telles que "ne doit pas provoquer de focalisation de l'attention", "ne doit pas provoquer de fatigue excessive", "ne doit pas provoquer de restriction de vue, de mouvement, de blessure". De même appréciation des niveaux de lumière ; sous la DH les infos ne doivent pas empêcher un atterrissage en toute sécurité ?

Quelles méthodologies pour les zones de fragilité ? comment les mettez-vous en situation (scénario ou autre?)

Ces aspects sont-ils abordés au titre des textes réglementaires ? au-delà de ces textes ?

Quelle part est laissée à l'interprétation des textes ?

Niveau de profondeur des investigations : jusqu'où faut-il aller pour être sûr de la certification dans les domaines FH

Souhaitez-vous conserver des textes généraux et donc parfois approximatifs et imposant une large part d'interprétation des certificateurs ou des textes plus détaillés demandant d'interprétation ; avantages et inconvénients

Pouvez-vous donner des exemples de différences d'interprétation entre certificateurs ?

Divergence FAA/JAA d'une part et au sein des JAR d'autre part qui conduisent à des symbologies très différentes (utiliser les planches avec les symbologies des différentes variantes pour illustrer les commentaires) ?

Par association : l'usage du HUD comme moyen primaire seulement ou aussi secondaire est-il inclus dans ces différences ?

Ces divergences sont-elles résolues ? Si oui, comment ?

Une fois la certification accordée, avez-vous un retour sur l'utilisation opérationnelle du HUD ?

Compagnies, pilotes, autorités, syndicats, ou encore biblio et rapports d'étude hors des institutions de contrôle ?

Pouvez dresser les grandes étapes historiques sur la réalité de la certification des HUD ?

Certifieriez-vous ceux d'il y a quelques années comme ceux d'aujourd'hui ? enrichissement progressif de la démarche, des méthodes, de vos connaissances, qu'est ce qui a changé ?

Pouvez-vous mentionner des lacunes ou des défauts dans les textes réglementaires existants, portant sur :

- la conception des HUD ?
- les procédés de certification ?
- l'utilisation opérationnelle des HUD ?
- l'organisation actuelle des textes réglementaires (HUD 901-3) : classement, articulation, homogénéité ?

Voyez-vous des recommandations pour y remédier ?

Grandes tendances, selon vous, dans l'évolution de l'usage des HUD : type d'opération, de machine, généralisation d'usage ou non ?

-o-O-o-

Annexe 9 : Canevas d'entretien Pilote d'Essai

Nom :	Organisme : CEV Istres
--------------	-------------------------------

Entretien :

Sujet : Votre expérience des HUD : certification, utilisation et difficultés rencontrées...

Objectif :

Dégager des fragilités de nature FH dans l'utilisation des symbologies des HUD civils.
Mettre en évidence vos stratégies, liées à votre connaissance de ces fragilités lors de la certification des HUD.

Ceci nous servira à orienter l'étude DGAC pour l'évolution de la recommandation JAA sur les symbologies HUD.

Principales expériences en certification et utilisation de HUD

Avion / Equipementier / Type d'opération / Cadre de certification (DGAC, JAA, FAA) / Type d'utilisation (primaire, secondaire...).

Sur le processus de certification des HUD :

Rôle du pilote d'essais ?

Comment participez-vous à la certification ?

Quelle part d'expérience ?

Quelle part d'extrapolation ?

Utilisation de la réglementation ?

Quels textes FAA, JAA ?

Quelles différences entre FAA et JAA ?

Utilisez-vous d'autres textes ?

Participez-vous à l'évolution des textes réglementaires ?

Les moyens de vérification proposés par la réglementation sont-ils suffisants ?

Quelle méthodologie ?

Existe-t-il une démarche systématique pour évaluer une symbologie ?

check-list, questionnaires, grille d'analyse de la symbologie ?

sur papier, sur maquette animée, sur simulateur, en essais en vol ?

par symbole ou par fonction ou par phase ?

en statique ou en dynamique ?

Utilisez-vous des manœuvres particulières pour mettre en évidence d'éventuels défauts ?

Avez-vous d'autres 'trucs' pour mettre en défaut une symbologie ?

Envisagez-vous la dimension équipage dans la méthodologie (HUD instrument primaire avec copilote sans information de trajectoire...) ?

Point de vue sur le pilote de référence

Quelles formes de pilotage et de pilotes de référence considérez-vous ? (ceux qui refusent de s'en servir, ceux qui s'en servent nominalement, ceux qui s'en servent au-delà des prescriptions (contrôles des automatismes...)).

Qu'est-ce que pour vous "se mettre à la place du pilote de référence" ?

Avez-vous eu une expérience en ligne du pilotage d'appareil avec HUD ?

Votre expérience en compagnie vous conduit-elle à aménager votre vue de la certification ?

Sur la symbologie :

Pouvez-vous décrire des exemples de symbologies ?

Avec quelle symbologie êtes-vous le plus familier ?

Décembre 2001

Existe-t-il des « écoles » différentes ?

Voir exemples sur papier.

Commentaires par information présentée : pertinence / problèmes connus

	Adaptée ou non	Cat. d'ops	Phase de vol					pannes		
			I/II/III	roulage	décoll	cruise	appr	Rdg		
attitude (tangage roulis)										
altitude baro										
vitesse air / vitesse sol										
vitesse verticale										
cap										
vecteur vitesse										
Ecart de vitesse										
accélération / pente potentielle										
hauteur radiosonde										
dérapiage										
facteur de charge										
ILS / guidage										
navigation / buts										
propulsion										
modes PA										
alarmes										

Commentaires par caractéristiques de la symbologie :

couleur / forme / taille / niveau lumineux

analogique / digital

collimation

conformité avec le monde extérieur

homogénéité avec la tête basse

clutter : indice, degré...

limitations de représentation de la symbologie dues au champ de visualisation du HUD

moyens d'allégement de la symbologie : lesquels ? quelles utilisations ? à la demande ou automatique ? quelle pertinence ?

Symbologies et exigences réglementaires

L'objectif de ce tableau est double :

- évaluer si à partir de la réglementation JAA il est possible de définir une configuration minimale de symbologie HUD de façon totalement ou partiellement objective et,
- préciser si des compléments de symbologie peuvent s'avérer nécessaires et pourquoi.

Les symbologies spécifiques aux différentes phases de vol peuvent se superposer.

(Ce tableau vise à ouvrir un cadre de discussion sur la traduction par le pilote de la réglementation en matière de symbologie et sur la possibilité pour certaines informations d'être présentées sous forme d'éléments de situation ou de guidage)

s : informations de situation ou de déviation - g : informations de guidage
 (6) = JAR HUDS 901 - (2) = JAR HUDS 902 - (3) = JAR HUDS 903

Phase de vol	Exigences réglementaires	Symbologie	
		s	g
croisière et toutes phases de vol	<ul style="list-style-type: none"> - Both digital and analogue representations of airspeed, altitude, vertical speed and heading must be provided and positioned using the basic T format (3) - The minimum acceptable information ... must include : clear and unambiguous indication of pitch and roll attitude, sufficient information to permit a rapid evaluation of the aircraft's energy state and position(e.g altitude, airspeed, vertical speed and heading) during each flight phase for which approval is sought (3) - clear and unambiguous indication of pitch and bank (1) - clear indication of non-conformal positioning of normally conformal elements (1,3) - the mode in which the autothrottle is operating (1) - a positive and continuous indication of the mode in which the hud is being used and of any armed modes (1,2) - to monitor automatic and manual flight guidance modes and system status (2,3) - the pilot using the hud will need to have his attention brought to any changes of mode(normal or un commanded) (2) 		
approche et atterrissage	<ul style="list-style-type: none"> - to intercept the ILS app. path, to track it, to land (1) - an excess ILS deviation alert (1,2) - arrival at DH, height must be positively annunciated (1,2) - radio altitude (2) - clear visual indication on the hud when the aeroplane reaches the preselected DH (1,2) - to monitor the hud system operational status and approach performance continuously without referring to the head down displays (1) 		
remise de gaz	<ul style="list-style-type: none"> - to make a go-around without reference to other cockpit display (1) - sufficient info. to initiate and stabilise a Go-A.at any point during the app. and flare without reverting to other displays (1,2) - an appropriate indication or warning of on-engagement of Go-A mode when it is selected (2) 		

roulage	- to control the aeroplane along the runway after touchdown within the prescribed limits (if ground control guidance is provided on the hud) (1)			
décollage				
pannes et dysfonct.	- in the event of an engine failure huds must permit to control the aeroplane without reverting to others displays (1) - si pb radioalti, the warning must be given by removal or obscuration of displayed information at least in the height band from 30m downwards (1)			
situations inusuelles				

Facteurs humains :

Difficultés liées à l'apprentissage ?

Différents types de pilotages ? En fonction du pilote ou du HUD ?

Charge de travail ?

Confusion entre informations ?

Focalisation sur un symbole ?

Maintien possible d'une bonne perception du monde extérieur au travers du HUD (obscurcissement partiel au travers du HUD) ?

Désorientation ? Situations inusuelles ?

Support de dialogue pour l'équipage lors de l'utilisation exclusive du HUD par le pilote et conséquences sur la sécurité ?

Existe-t-il des situations où la conjonction d'événements rend l'interprétation de la symbologie difficile ou ambiguë dans le HUD ?

Utilisation opérationnelle du HUD après certification

Avez-vous un retour de la part des utilisateurs ?

Avez-vous questionné ou entendu des pilotes de ligne évoquer les HUD, en quels termes ?

Connaissez-vous les raisons de la non utilisation du HUD sur des avions équipés ?

Connaissez-vous des difficultés, voire des cas d'incidents liés à l'utilisation des HUD ?

Evolution des symbologies HUD et de la réglementation

Quelles sont vos préoccupations actuelles relatives aux symbologies ?

Ressentez-vous un besoin d'étude sur un point ou un autre ?

Quels concepts sont actuellement candidats pour la certification ?

Quelles perspectives pour l'utilisation dans les compagnies ?

Quel impact des transformations des règles de circulation aérienne (évolution de la responsabilité du pilote dans la gestion du trafic) : place du pilotage avec HUD dans ce cadre ?

Quelles améliorations pour la réglementation HUD ?

Qu'est-ce qui permettrait de s'orienter vers une harmonisation de la réglementation JAA / FAA ?

-o-O-o-

Annexe 10 : Comparaison des avis de 2 pilotes d'essais sur la pertinence des symboles, par phase de vol.

	Taxi	Déc.	Crois.	Appr. VMC	Appr. cat. I	Appr. cat. II	Appr. cat. III	RdG	Panne mot.	Sit. inus.
Vitesse air	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Altitude	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Attitude roulis tang.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Cap	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Vecteur vitesse sol	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Pente potentielle	+	+		+	+	+	+	+	+	
Vent (dir. et force)				++	++	++	++			
Dérapage				+	+	+	+			
Vitesse verticale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Radio altitude					+	+	+			
Ecart ILS excessif					+	+	+			
<i>Position sur ILS</i>					+-	+-	+			
Passage marqueurs					+	+	+			
Passage DH					+	+	+			
Guidage ILS					+	+	+			
Accrochage ILS										
Source de nav.										
Mode HUD										
<i>Modes PA in ops</i>	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	
Mode automanette										
Symbole piste					+	+	+			
Alarme	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Interception ILS										
Remise de gaz										
Guidage à l'arrondi										
Guidage au roulage										
Indicateur de roulis								+	+	
<i>Distance DME</i>					+-	+-	+-			
<i>Vitesse sol</i>	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	+-	-
Ecart de vitesse	-	+		+	+	+	+			
Selected speed		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Speed scale & limits		+								

Légende : **gras** symbole objet d'une réglementation (voir Annexe 7)
italique avis divergents
 non abordé lors des entretiens
+ symbole nécessaire
+ symbole utile
- symbole inutile

Décembre 2001

Annexe 11 : Synthèse des fiches ASRS

N° fiche	Date Lieu	Avion	Implication HUD	Circonstances	Autres faits
1/133705	1990 CA	Fighter	Instrument primaire et symbologie figés	Perte de contrôle (0kts) récupérée avec instrument secours	Pas d'éjection du fait de la zone habitée
2/138647	1990 US	Triréacteur Aile basse 2 Pil	Symbole d'alignement disparu lors de l'approche	Vol en dessous des minima lors de l'approche Avion posé	Différents avec la compagnie. Le CDB doit mentir aux passagers à la demande de la compagnie.
2/168235	1991 US	Triréacteur	En utilisation lors d'une approche par temps neigeux	Incursion d'un autre appareil sur la piste. L'équipage n'incrimine pas le HUD mais le contrôle (séparation insuffisante)	
4/197645	1991	Triréacteur	Deux att VFR interrompus Commentaire HUD positif	Très efficace pour poser l'avion dans une météo très turbulente	Vent au sol très différent du vent en altitude
5/223355	1992 AK	Triréacteur	HUD en test lors de l'approche cat III	Panne aérofreins distrait le PF qui fait une approche cat III un peu au dessus Info tardive sur le HUD du fait de son auto test le pilote ne peut avoir d'info détaillée du HUD qu'à 500ft	
6/299958	1995 CA	B 737	Le pilote aurait voulu en avoir un	737 pris dans les turbulences d'un autre 737 4 nm devant	
7/314184	1995 MI	Dornier 328	Aucune	Défaillance informatique et électrique sur un appareil dernière génération	
8/371632	1997 AK	Commuter Fixed wing	Aucune	Un capteur endommagé produit une alarme erronée de perte de vitesse sur manche, HUD et primary displays	
9/391408	1998 AK	737-400	HUD utilisé par le PNF mais sans usage de contrôle	Une approche aux instruments pour "garder la main" mais réglage erroné du PF. Information incohérente tardivement détectée et interprétée = EGPWS	
10/423675	1998 NY	727-100	HUD utilisé pour un att sur piste enneigée Sans plus d'implication	Mauvais freinage qui conduit l'avion hors piste	

Décembre 2001

11/452301	1999 GA	737-800	Le copi pense que l'usage du HUD a conduit le PF à une insuffisante conscience de la situation	Lors d'une remise de gaz imposée par le contrôle, des communication ambiguës, une mauvaise interprétation des paramètre conduit à une alarme TCAS avec un autre appareil.	
12/453091	1999 US	737-700	Aucune	737 en vol d'essai fait un touch and go sans l'autorisation de la tour (charge excessive et pb radio pour la vérification de l'autorisation	
13/456663	1999 US	737-300	Aide au pilotage en situation d'évitement	Le 737 doit éviter au décollage un autre avion sur la piste, il monte brutalement et évite l'autre appareil	Le pilote est un ancien pilote militaire familier du HUD qui l'a utilisé pour gérer finement un décollage en limite
14/462540	2000 PA	727-200	Utilisé mais sans implication	Information d'approche ILS incohérentes entre les deux places et avec la réalité. Posé à vue avec l'aide du contrôle	Présence d'eau dans le rack électronique (double dégivrage sur l'aéroport de départ peut-être)
15/487446	2000 IL	737-300	Usage partiel du HUD lors d'une panne de génération de symboles	FL 330 Panne d'affichage sur les tubes cathodiques (totale CDB, /2s pour copi) déroutement	Assistance par le contrôle pour emergency faute d'information de pilotage soit absente soit en dégradation progressive
16/502070	1999 AZ	PA 28 Cherokee F 16	Aucune (évoqué à propos de la vidéo qui est associée)	Un appareil est croisé par une patrouille de F16 en deçà de la limite de sécurité des 500' d'espacement	

Annexe 12 : Documentation technique de HUD existants

Flight Dynamics (1996, avril).

Head-Up Guidance System – HGS Model 2100 – Canadair Regional Jet

Ce modèle du HGS équipe les CRJ de Brit'Air ; il est certifié par les autorités canadiennes, américaines et européennes pour les approches manuelles en cat. IIIa. Il vérifie notamment les textes JAR HUD 901 et 902, et FAR AC 120-29 et 120-28C.

Il possède un mode primaire (avec échelles et HSI), et plusieurs modes d'approche (AIII, AII, AI, F/D, VMC) qui diffèrent entre eux de par la source du guidage (HGS ou DV du calculateur de vol) et par le niveau d'auto surveillance.

La hauteur radio sonde apparaît directement en dessous du vecteur vitesse.

L'accélération latérale est indiquée par un double triangle sur l'index de cap et également sous le vecteur vitesse en cas de dérapage important.

Lorsque l'incidence est proche de l'incidence du vibreur de manche (écart < 2°), un symbole de proximité de décrochage vient s'appuyer sur le vecteur vitesse. En situation inusuelle, le HGS présente un double chevron dirigé vers l'horizon ainsi qu'une flèche sur le vecteur vitesse.

En cat. III, la piste synthétique disparaît en dessous de la DH et la déviation par rapport au glide ILS disparaît en dessous de 70 ft.

Bombardier (1997, juin & 1996, janvier).

HGS Canadair Regional Jet Flight Crew Operating Manual : Description & Limitations

Ce manuel d'opérations fourni par Bombardier décrit le HGS conformément au pilot guide de Flight Dynamics. Il pose également des limitations importantes à l'emploi du HGS sur le CRJ, malheureusement sans en expliquer les raisons :

- Le HUD ne doit pas être utilisé au décollage ;
- L'utilisation des modes autres que PRI et AIII est prohibée ;
- L'utilisation du mode PRI est limitée à l'interception et à l'approche jusqu'à 800 ft AGL, ainsi qu'à la remise de gaz.
- L'utilisation du HGS en mode AIII avec pilote automatique couplé est interdite en dessous de 650 ft AGL.

Bombardier (2001, juin).

HGS Canadair Regional Jet Flight Crew Operating Manual : Temporary revision RJ/92.

Cette révision du manuel d'opérations du CRJ équipé de HGS indique l'extension de la certification du HGS, pour les modes suivants, avec quelques limitations :

- PRI pour toutes les phases, sauf le décollage avec guidage sur le localizer et l'approche en dessous de 800 pieds AGL,
- VMC pour les phases de croisière jusqu'à l'atterrissage ;
- AI et AII de l'approche à l'atterrissage.

Rockwell Collins Flight Dynamics (2000, mai).

Head-Up Guidance System Model 4000 – HGS Pilot Guide – Boeing 737 NG

BAE Systems (2000, janvier).

Pilot's Guide for the Visual Guidance System for Boeing 737 NG Aircraft, issue 3.

AIR France DT-NT (1999).

Navigation HUD – A319/20/21, 25 février 1999.

Sextant Avionique (1997)

HFDS – MD82 Training Syllabus rev. B – Alitalia, 21 mai 1997

-o-O-o-

Annexe 13 : Canevas d'entretien compagnie

Compagnie : _____ Lieu et date de l'entretien : _____

Profil du pilote rencontré :

Objet : Expérience et Utilisation du HUD dans la compagnie.

1 HISTORIQUE DE L'UTILISATION DES HUD DANS LA COMPAGNIE

2 UTILISATION ACTUELLE DES HUD DANS LA COMPAGNIE

Informations sur le HUD actuellement utilisé

Pouvez-vous décrire le HUD ?

Sa symbologie présente-t-elle des particularités ?

La compagnie a-t-elle participé à sa conception ? à sa certification ?

Sur quel avion est-il installé ? Sur toute la flotte ? Sur toutes les lignes ?

Pouvez-vous nous fournir une documentation décrivant le HUD ?

Quelles sont les procédures en vigueur ?

Quel est l'emploi fait du HUD dans la compagnie : pouvez-vous remplir le tableau ci dessous avec M pour manuel et/ou S pour surveillance ?

Utilisation dans la compagnie :	Opération									
	taxi	déc.	crois.	appr. VMC	appr. cat. I	appr. cat. II	appr. cat. III	remise de gaz	panne moteur	sit. un.
Obligatoire										
Recommandée										
Possible										
Interdite										

Pouvez-vous nous décrire les procédures d'utilisation pour les phases les plus courantes ?

Les procédures ont-elles été aménagées suite à des difficultés rencontrées ? pour d'autres raisons ?

Quelles considérations ont guidé le choix de l'utilisation du HUD ?

Pouvez-vous expliquer comment s'est fait l'élaboration de ces procédures : les procédures recommandées par l'équipementier ont-elles été adaptées ? procédez-vous à des essais préalables ? est-ce que les autorités jouent un rôle ?

Pouvez-vous nous fournir une documentation décrivant les procédures actuellement en vigueur ?

3 POUVEZ-VOUS PRÉCISER LES AVANTAGES ET LES DÉFAUTS DU HUD ACTUEL ?

Sur le plan humain ?

Les pilotes sont-ils contents de disposer d'un HUD ?

Le HUD facilite-t-il l'apprentissage lors d'une conversion sur nouvel avion ? Ou pose-t-il des problèmes ?

La perception du HUD par les pilotes est-elle fonction de leur expérience ? de leur âge ? de la ligne sur laquelle ils opèrent ?

Sur le plan économique et opérationnel ?

Quel est le gain principal lié à l'utilisation du HUD ?

Réduction des minima ?

Disposez-vous de moyens qui permette de mesurer l'impact de l'utilisation du HUD sur les opérations ?

L'utilisation du HUD a-t-elle été l'objet d'une attention particulière ?

Pouvez-vous fournir des évaluations chiffrées (par exemple, proportion de décollage et d'atterrissages réalisés avec le HUD et qui n'auraient pas été possibles sans)

Sur le plan de la sécurité ?

Pouvez-vous donner des exemples d'incidents ou de difficultés réels liés à l'utilisation du HUD ?

A contrario, pouvez-vous mesurer les effets bénéfiques du HUD sur la sécurité ?

Avez-vous des exemples de cas réels dans lesquels le HUD a contribué à éviter un incident ?

Pour l'améliorer...

Quelle modification souhaiteriez-vous ?

4 QUEL EST L'AVIS DE LA COMPAGNIE SUR L'UTILISATION DES HUD ?

De façon générale ?

Pour l'avenir de la compagnie ?

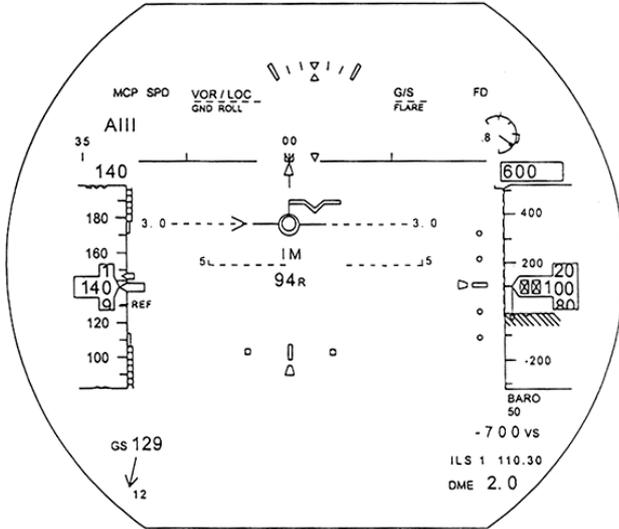
L'achat de HUD est-il envisagé sur des avions existants ? sur des avions nouveaux ?

5 SUITE À DONNER, DOCUMENTS, AUTRES CONTACTS ?

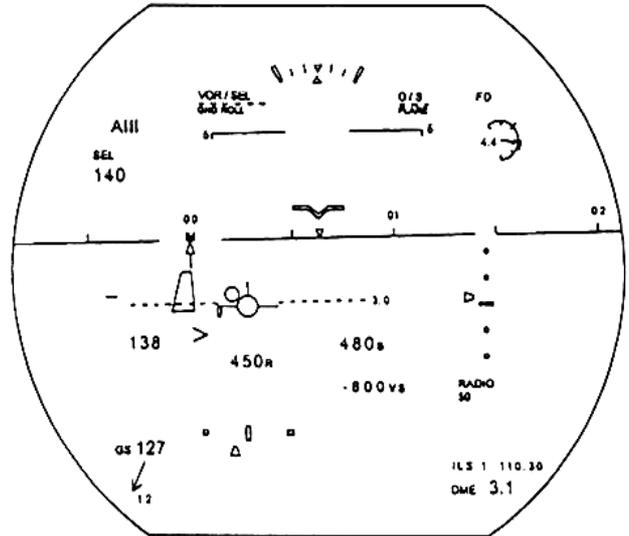
-o-O-o-

Annexe 14 : Comparaison des symbologies pour la phase approche cat. III

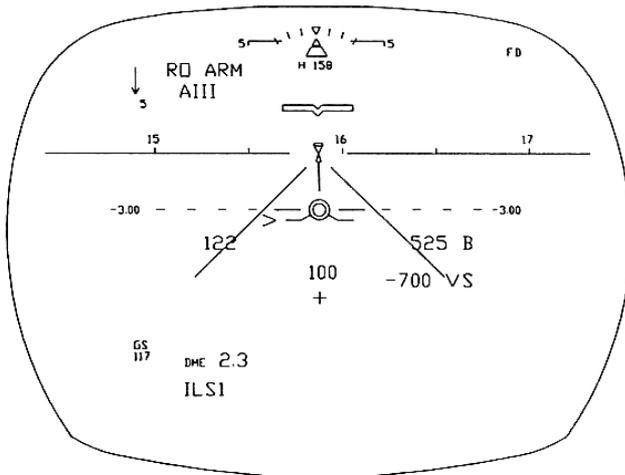
a) Symbologies HUD ayant permis d'établir les tableaux comparatifs "approche cat. III" (cf. pages suivantes)



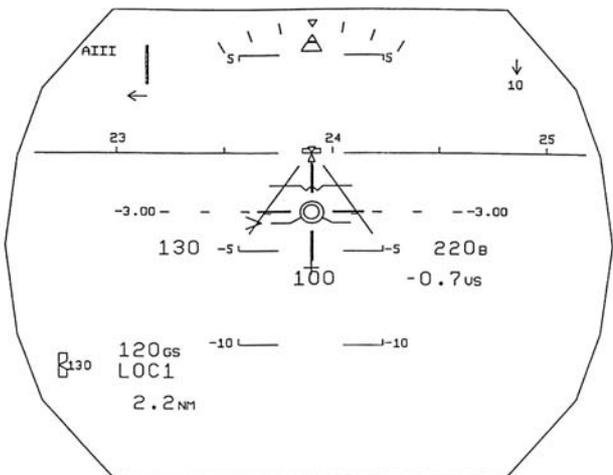
VGS Baé B737 NG - Mode AIII Normal



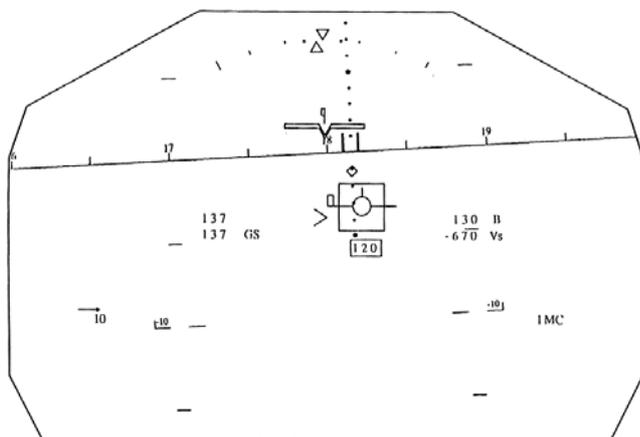
VGS Baé B737 NG - Mode AIII Declutter



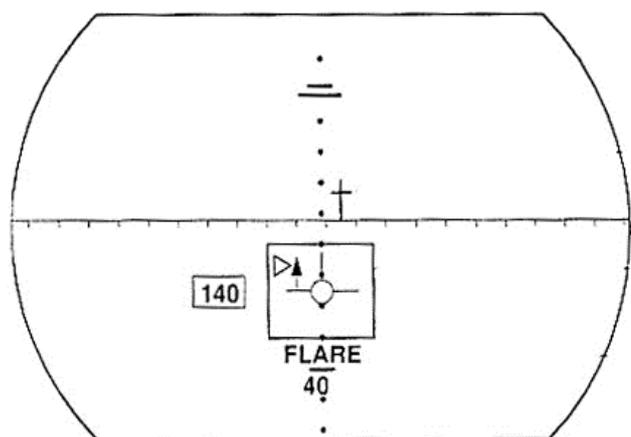
HGS Flight Dyn. B737 NG - Mode AIII



HGS Flight Dyn. CRJ 100 - Mode AIII



HFDS Sextant MD 82 - Cat III B autoland



HUD Sextant A320 - Approche ILS

b) Comparaison des symbologies pour la phase approche cat. III.

	Pilotage manuel			Surveillance du PA	
	B737 NG BAé systems	B737 NG Flight Dyn.	CRJ Flight Dyn.	MD 82 Sextant	A 320 Sextant
Vitesse air	num	num	num	num	num + box clign. à VLS-5
Altitude	num B	num B	num B	num B	∅
Attitude roulis- tangage	éch tangage + horizon	éch tangage + horizon	éch tangage + horizon	éch tangage + horizon	éch tangage + horizon
Cap	éch + ind	éch + ind + H num	éch + ind	éch	éch nue
Vecteur vitesse sol	analogique	analogique	analogique	analogique	analogique
Pente potentielle	chevron	chevron	chevron	chevron	analogique
Vent (dir. et force)	flèche + num	flèche + num	flèche + num	flèche + num	∅
Dérapage	flag analo	forme analo	forme analo	flag analo	∅
Vitesse verticale	num VS	num VS	num VS	num VS	∅
Altitude radiosonde	num R	num	num	num (box à DH+100)	num
Ecart ILS excessif	EXCESS DEV	barres clign.	barres clign.	carré	carré
Position sur ILS	éch. glide&loc	barres ILS	barres ILS	écarts bruts	écarts bruts
Passage marqueurs	abréviations	abréviations	abréviations	abréviations	∅
Passage DH	MINIMUMS	DH	DH	DH	DH
Guidage ILS	cercle DV	cercle DV	cercle DV	∅	∅
Accrochage ILS	éch. glide&loc	barres ILS	barres ILS	carré fermé	carré fermé
Source de navigation	ILS num+ fréq	ILS num	LOC num	∅	∅
Mode HUD	abréviations	abréviations	abréviations	abréviations	∅
Mode PA en opération	abréviations	abréviations	abréviations	∅	∅
Mode automanette	abréviations	abréviations	∅	∅	∅
Symbole piste	rwy outline	rwy edlgelines	rwy edlgelines	rwy centerline	∅
Alarme (approche)	NO AIII	APCH WARN	APCH WARN	∅	∅
Indicateur de roulis	éch + index	éch + index	éch + index	éch + index	∅
Distance DME	DME num	DME num	DME num	∅	∅
Ground speed	GS num	GS num	GS num	GS num	∅
Ecart de vitesse	analogique	analogique	analogique	analogique	chevron
Vitesse sélectionnée	Sel num	AS num	forme num	∅	∅
Speed scale & limits	∅ si declutter	∅	∅	∅	∅
Altitude scale & limits	∅ si declutter	∅	∅	∅	∅
Route	VV / éch cap	VV / éch cap	VV / éch cap	VV / éch cap	∅
Route sélectionnée	index éch cap	index éch cap + CRS num <i>trans</i>	index éch cap + CRS num <i>trans</i>	∅	∅
Cap sélectionné	index éch cap	index éch cap + HDG num <i>trans</i>	index éch cap + HDG num <i>trans</i>	index éch cap	∅
Valeur DH	RADIO num	∅	DH num <i>trans</i>	∅	∅
Pente référence ILS	ligne x° glide	ligne x° glide	ligne x° glide	∅	∅
Indicateur d'incidence	éch + num	∅	∅	∅	∅
Arrondi	croix/DV	croix/DV	croix/DV	diamant fixe	FLARE
Message idle	RETARD	IDLE	IDLE	∅	∅
Alarme assiette	TAILSTRIKE	∅	∅	∅	∅

Légende : ∅ : symbole absent num : valeur numérique analo : présentation analogique
trans : symbole présenté de façon transitoire, généralement après une sélection.
 MAJ : caractère alphanumérique tel qu'il apparaît sur le HUD.

c) Classification des symboles selon leur constance d'apparition

	Pilotage manuel		Surveillance du PA	
	Base Commune	Particulier	Base Commune	Particulier
Vitesse air	●		●	
Altitude	●			●
Attitude roulis tangage	●		●	
Cap	●		●	
Vecteur vitesse sol	●		●	
Pente potentielle	●		●	
Vent (dir. et force)	●			●
Dérapiage	●			●
Vitesse verticale	●			●
Altitude radiosonde	●		●	
Ecart ILS excessif	●		●	
Position sur ILS	●		●	
Passage marqueurs	●			●
Passage DH	●		●	
Guidage ILS	●			
Accrochage ILS	●			
Source de navigation	●			
Mode HUD	●			●
Modes PA en ops	●			
Mode automanette		● (*)		
Symbole piste	●			●
Alarme (approche)	●			
Indicateur de roulis	●			●
Distance DME	●			
Vitesse sol	●			●
Ecart de vitesse	●		●	
Vitesse sélectionnée	●			
Speed scale & limits		● (allégeable)		
Altitude scale & limits		● (allégeable)		
Route	●			●
Route sélectionnée	●			
Cap sélectionné	●			●
Valeur DH		●		
Pente référence ILS	●			
Indicateur d'incidence		●		
Arrondi	●		●	
Message idle	●			
Alarme assiette		●		

(*) : les CRJ 100 n'étant pas équipés d'automanette, le symbole « mode automanette » est absent de la symbologie. Donc, en écartant de la comparaison le HGS équipant les CRJ, le « mode automanette » peut être considéré comme appartenant à la base commune.

Annexe 15 : Comparaison des symbologies pour la phase roulage

	Manuel			Automatique / Manuel à l'atterrissage	
	B737 NG BAé systems	B737 NG Flight Dyn.	CRJ Flight Dyn.	MD 82 Sextant	A 320 Sextant
Vitesse air	num + scale	num (+ scale if not AIII)	num (+ scale if not AIII)	num (> 30 kts)	num + box
Altitude	num + scale	num + scale (∅ if AIII)	num + scale (∅ if AIII)	∅	∅
Attitude roulis tangage	a/c symbol + horizon	a/c symbol + horizon	a/c symbol + horizon (+ pitch scale if not AIII)	a/c symbol + horizon + pitch scale at sel. hdg	a/c symbol (+ horizon if TO)
Cap	scale / horizon	scale / horizon	scale / horizon	scale / horizon	scale (no labels) / horizon if TO
Vecteur vitesse sol	analog + legs	analog (if guidance)	∅	∅	∅
Accélération	chevron	chevron	chevron	∅	∅
Dérapiage	∅	forme analo	forme analo	∅	∅
Vitesse verticale	num VS	∅	∅	∅	∅
Position sur ILS	raw loc. line	raw loc. line	raw loc. line	∅	∅
Info. source nav.	ILS num+ freq	ILS num	LOC num	∅	∅
Mode HUD	abréviations	abréviations	abréviations	∅	∅
Modes PA in ops	abréviations	abréviations	abréviations	TOGA/IMC	∅
Mode automanette	abréviations	abréviations	∅	∅	∅
Symbole piste	∅	∅	∅	rwy centerline	∅
Alarme	∅	LOC CMP	flags	rwy centerline disappear	∅
Guidage au roulage	∅	FD circle	∅	∅	FD yaw bar
Indicateur de roulis	scale + index	scale + index	scale + index	∅	∅
Distance DME	DME num	∅	num NM	∅	∅
Vitesse sol	GS num	GS num	∅	num GS	∅
Ecart de vitesse	∅	∅	∅	∅	∅
Vitesse sélectionnée	num	num	forme num trans	∅	∅
Route sélectionnée	index / horizon	index / horizon + CRS num	index / horizon + CRS num trans	∅	∅
Cap sélectionné	∅	index / horizon + HDG num	index / horizon + HDG num trans	index / horizon	∅
Altitude sélectionnée	num	num (if not AIII)	num (if not AIII)	∅	∅
Guidage à la rotation (TO)	pitch line 10°	pitch line FD	pitch line 10 or 15° then FD	∅	∅
Indicateur incidence	scale + num	∅	∅	∅	∅
Runway remaining	RWY REM num	RWY num	∅	∅	∅
Vitesses réf. (LDG)	∅	∅	V1, V2, VR, VT	∅	∅
Deceleration (TO)	∅	scale	∅	∅	scale

∅ : symbole absent

TO : concerne le take-off roll

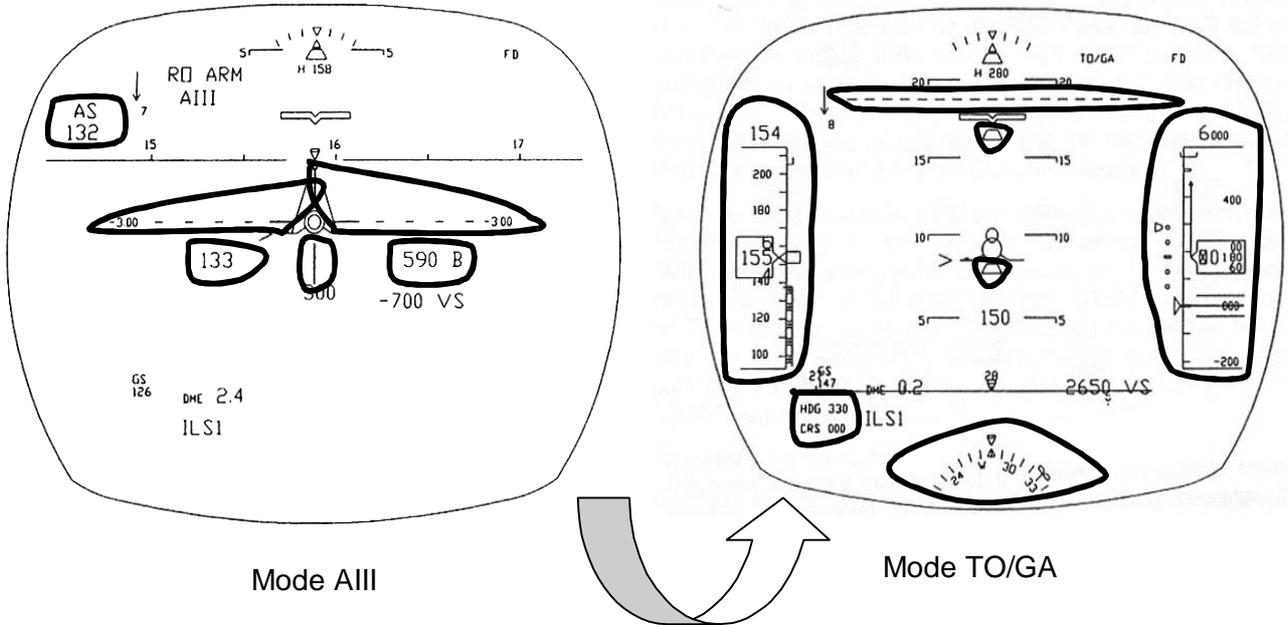
AIII : mode AIII (donc take-off roll)

LDG : concerne le roll out

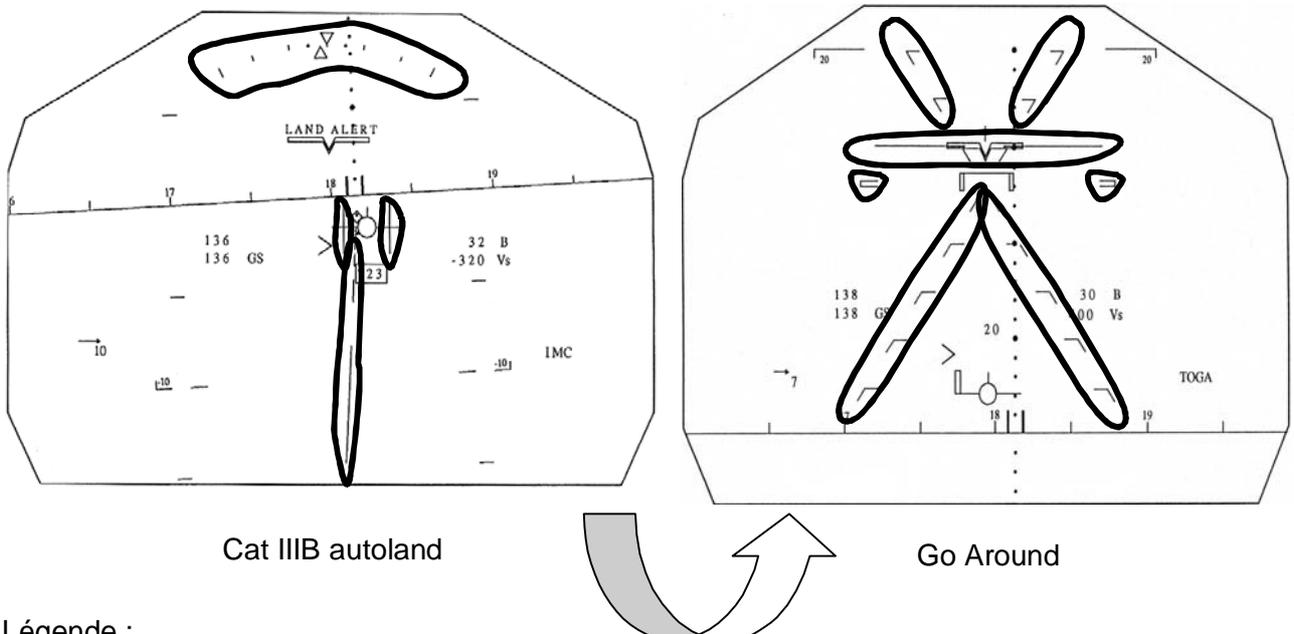
Annexe 16 : Comparaison des symbologies relatives aux transitions (remise de gaz et rotation)

a) Exemples de changements de symbologie correspondants à une approche cat. III interrompue

HGS Flight Dynamics B737 NG



HFDS Sextant MD 82



Légende :

Pour les deux figures de gauche (mode approche cat. III), les symboles entourés d'une ligne grisée sont ceux qui disparaissent lors de la transition.

Pour les deux figures de droite (mode Go around), les symboles entourés d'une ligne grisée sont ceux qui apparaissent lors de la transition.

b) Comparaison des changements de symbologie à la remise de gaz (approche cat. III)

	Pilotage manuel			Surveillance PA
	B737 NG BAé systems	B737 NG Flight Dyn.	CRJ Flight Dyn.	MD 82 Sextant
Loc. deviation	Disparition			Disparition
Glide deviation	Disparition			Disparition
Glide ref. line	Disparition			∅
Symbole piste	Disparition			Disparition
Roll scale + index	Maintien			Disparition
Vent (dir. et force)	Maintien			Maintien
Altitude	num → scale + num			num maintenu
Airspeed	num → scale + num			num maintenu
FD cue	Maintien			∅
HSI et indications associées	APPARITION			∅
Dérage	Maintien + (1)	Maintien + (2)	Maintien + (3)	Maintien
Vertical deviation	∅	APPARITION		∅
TO/GA pitch line	APPARITION		∅	APPARITION
TO/GA pitch scale	∅			APPARITION
One engine pitch reference	∅			APPARITION

c) Comparaison des changements de symbologie au moment de la rotation

	Pilotage manuel			Surveillance PA
	B737 NG BAé systems	B737 NG Flight Dyn.	CRJ Flight Dyn.	MD 82 Sextant
Ground loc. line	Disparition			Disparition
Rwy remaining	Disparition		∅	∅
Pitch scale	APPARITION		Maintien	APPARITION
FPV	Changement de forme		APPARITION	APPARITION
FD cue	APPARITION	Maintien	APPARITION	∅
Altitude	Maintien			APPARITION
Radio altitude	APPARITION			APPARITION
Vertical speed	Maintien	APPARITION		APPARITION
HSI et indications associées	∅	APPARITION		∅
Dérage	APPARITION	Maintien + (2)	Maintien + (3)	APPARITION
Vent (dir. et force)	∅	APPARITION		APPARITION
Distance DME	Maintien	APPARITION	Maintien	∅
Vertical deviation	∅	APPARITION		∅
TO/GA pitch line	Maintien	APPARITION	∅	APPARITION
TO/GA pitch scale	∅			APPARITION
One engine pitch reference	∅			APPARITION

Légende des 2 tableaux :

TO/GA : Take-Off/Go-Around FPV : Flight Path Vector FD : Flight Director ∅ : symbole absent

(1) = apparition d'une nouvelle localisation au-dessus de la référence avion en cas de panne moteur

(2) = apparition de 2 nouvelles localisations (sous FPV et sous la référence avion)

(3) = apparition d'une nouvelle localisation sous le FPV en cas de panne moteur

Annexe 17 : Comparaison des symbologies relatives aux fonctions particulières et élaborées

a) Tableau comparatif

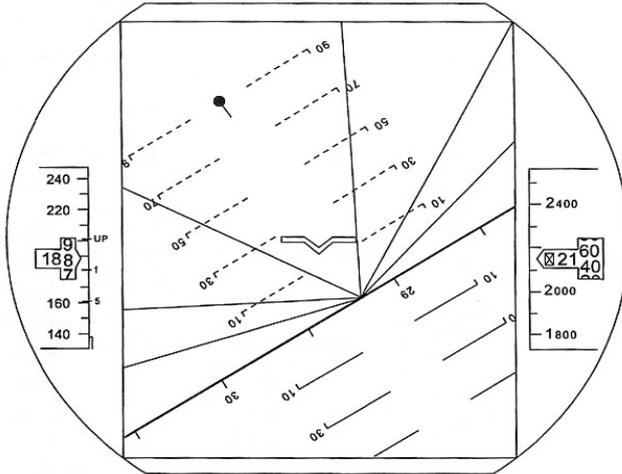
	Pilotage manuel			Surveillance du PA	
	B737 NG BAé systems	B737 NG Flight Dyn.	CRJ Flight Dyn.	MD 82 Sextant	A 320 Sextant
Situations inusuelles	Mode « unusual attitude » sélectionné automatiquement si Pitch > 35° ou < -20° Ou Roll > 55° (voir b)	Unusual attitude symbology sélectionné automatiquement si Pitch > 35° ou < -20° Ou Roll > 55° (voir b)	unusual attitude up arrow + decluttered mode sélectionné automatiquement si Pitch > 30° ou < -20° Ou Roll > 65° (voir b)	∅	∅
Symbologies hors champ	FPV ghosted	Pitch scale compressed + downward or upward pointing chevron + FPV ghosted	Pitch scale compressed + downward or upward pointing chevron + FPV ghosted	Symbol es mités.	FPV clignote lorsqu'il atteint la position maxi autorisée par l'affichage
Situation de Windshear	Message « WINDSHEAR » sous la réf. avion + Windshear guidance cue (if TO/GA mode)	Message « WINDSHEAR » sous la réf. avion + Windshear guidance cue (if TO/GA mode)	Message « WINDSHEAR » sous la réf. avion + Windshear guidance cue (if TO/GA mode)	∅	∅
Fonction TCAS	Indications préventives ou correctives (voir c)	Indications préventives ou correctives (voir c)	∅	∅	∅
Fonction GPWS	Message « TERRAIN » sous la réf. avion	Message « PULL UP » sous la réf. avion	∅	∅	∅

∅ : présentation de la fonction absente dans le HUD

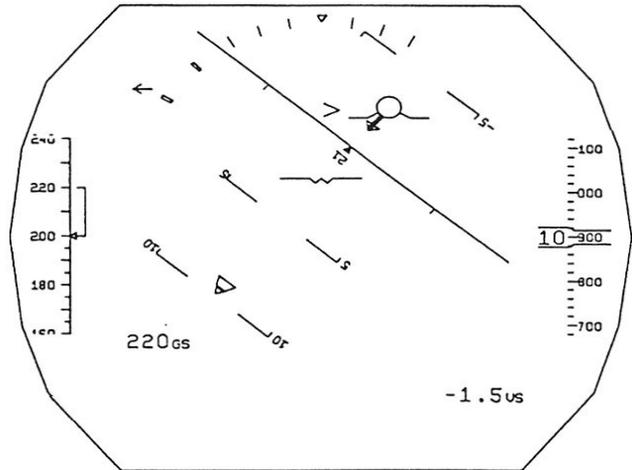
TO/GA : Take-Off/Go-Around

FPV : Flight Path Vector

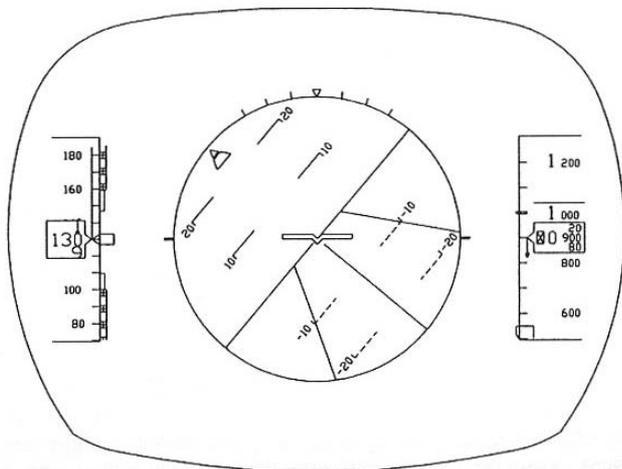
b) Symboliques "situations inusuelles"



VGS Baé B737 NG

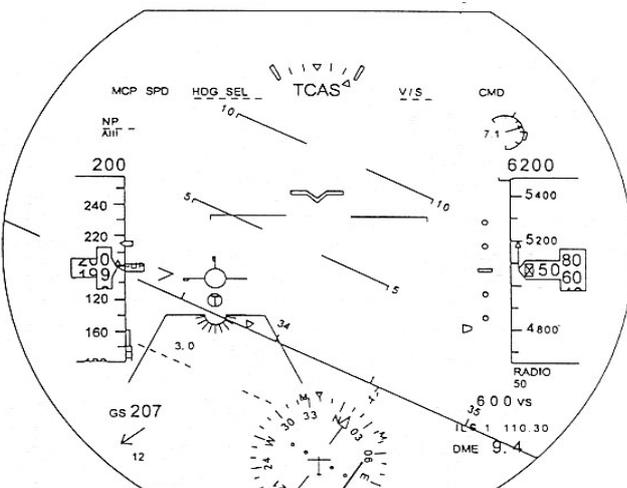


HGS Flight Dyn. CRJ 100

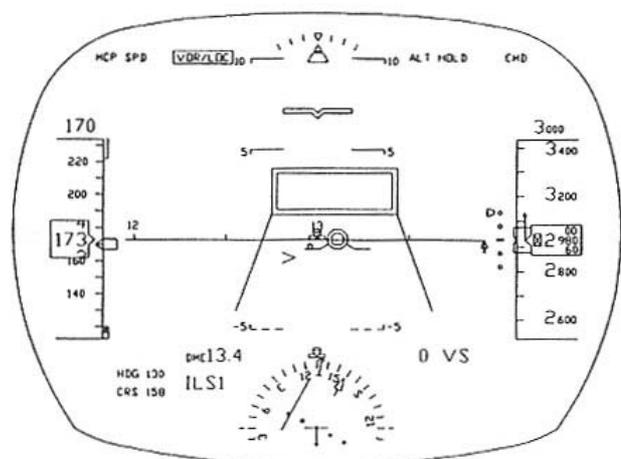


HGS Flight Dyn. B737 NG

c) Symboliques "TCAS"



VGS Baé B737 NG



HGS Flight Dyn. B737 NG

Annexe 18 : Synthèse de la confrontation des symbologies HUD existantes avec les textes réglementaires (approche cat. III)

	Manuel				Surveillance ou hybride			
	Réglementation		Symbologie		Réglementation		Symbologie	
	FAA	JAA	Commun	Particulier	FAA	JAA	Commun	Particulier
Vitesse air	X	X	●		X	X	●	
Altitude	X	X	●		X	X		●
Attitude roulis tangage	X	X	●		X	X	●	
Cap	X	X	●		X	X	●	
Vecteur vitesse sol	X	X	●		X	X	●	
Pente potentielle	r	X	●		r	X	●	
Vent (dir. et force)	X	X	●		X	X		●
Dérapiage	X	X	●		X	X		●
Vitesse verticale	X	X	●		X	X		●
Altitude radiosonde	X	X	●		X	X	●	
Ecart ILS excessif	f	X	●		r	X	●	
Position sur ILS	X		●		X	X	●	
Passage marqueurs	X		●		X			●
Passage DH	X	X	●		X	X	●	
Guidage ILS	X	X	●					
Accrochage ILS	X	X	●					
Source de navigation	X		●					
Mode HUD	X	X	●					●
Modes PA en op.	X	X	●					
Mode automanette		X		●				
Symbole piste		f	●					●
Détection de panne	X	X	●		X	X		
Indicateur de roulis			●					●
Distance DME			●					
Vitesse sol			●					●
Ecart de vitesse			●				●	
Vitesse sélectionnée			●					
Speed scale & limits				● (all.)				
Altitude scale & limits				● (all.)				
Route			●					●
Route sélectionnée			●					
Cap sélectionné			●					●
Valeur DH				●				
Pente référence ILS			●					
Indicateur d'incidence				●				
Arrondi			●				●	
Message idle			●					
Alarme assiette				●				

Légende : X : information requise
f : fonctionnalité optionnelle
r : recommandation

Annexe 19 : Bibliographie commentée

AGARD WG 21 (1999). *Glass cockpit operational effectiveness*. AGARD AR 349 FVP, pp. 25-26,38.

Le développement des collimateurs tête haute a une origine militaire : les collimateurs étaient primitivement des viseurs optico-mécaniques pour les besoins du tir canon. Il faut noter que les collimateurs tête haute constituent aujourd'hui encore les seuls équipements capables d'offrir la précision nécessaire pour l'affichage des informations de tir (typiquement environ 1 mrad).

Sur les collimateurs militaires, la symbologie de conduite de tir est maintenant minoritaire par rapport à la symbologie primaire de pilotage. Celle-ci comprend classiquement l'affichage de l'altitude, de la hauteur, de la vitesse, de la vitesse verticale, du facteur de charge ainsi que des données de navigation.

Les collimateurs les plus modernes permettent la superposition d'une imagerie infra-rouge ou télévision en plus de la symbologie classique.

Les collimateurs actuels utilisent quasiment exclusivement un tube cathodique monochrome et un système optique de collimation. Deux technologies existent maintenant pour le système optique : l'une repose sur des réflecteurs munis de revêtements élaborés (dichroïques) pour améliorer le contraste sans toutefois éviter une certaine coloration de la vision du monde extérieur, l'autre plus récente utilise l'holographie et réduit considérablement le problème de la coloration.

La taille de l'image collimatée comptée en degrés depuis le point de vue du pilote constitue le champ de vision du collimateur (FOV). Le champ de vision lorsque le point de vue est à la position nominale est appelé champ de vision instantané (IFOV), tandis que le champ de vision maximal que peut offrir le collimateur lorsque le pilote bouge la tête est appelé champ de vision total (TFOV).

Sur les collimateurs militaires, le champ de vision instantané atteint 16x16 degrés pour les collimateurs avec réflecteurs et 17x25 degrés pour les collimateurs holographiques, tandis que les champs de vision totaux sont respectivement de l'ordre de 20x20 degrés et 20x30 degrés.

Des améliorations technologiques devraient permettre l'accroissement des champs de vision, toutefois limité par l'encombrement dans les cockpits militaires qui concourt au développement des visuels de casque. Les progrès des technologies d'écrans à cristaux liquides devraient permettre l'apparition prochaine de collimateurs à très grand champ pour un encombrement limité.

Ergonomie des HUD : Des recherches récentes se sont attachées au problème de la représentation des informations de roulis et de tangage notamment pour la récupération de positions inusuelles. Il ressort de ces recherches que la conception de la symbologie des collimateurs devrait suivre les principes de la théorie comportementale (Gestalt), à savoir proximité et similarité des informations. Il semble particulièrement important que le collimateur évite toute distorsion de l'image extérieure et présente des informations rigoureusement conformes au monde extérieur. L'introduction de couleurs dans les collimateurs doit être réalisée avec beaucoup de prudence en raison des difficultés prévisibles de perception de la symbologie superposée à une image extérieure de couleur et luminosité très diverses. Egalement, l'interprétation d'informations identiques mais présentées sous un format différent en tête haute et en tête basse peut être source de difficultés lors des transitions entre ces deux sources d'informations.

Air Line Pilot Association.

Head up display flight guidance steering cues.

Discussion paper, Initial issue, 20 septembre 1999.

Ces recommandations de l'ALPA portent sur la présentation des informations de guidage sur les HUD.

Les instruments conventionnels présentent généralement une référence fixe par rapport à l'avion que le pilote doit amener sur des barres. Les EFIS reproduisent ces instruments en introduisant des retards liés à la génération graphique.

Un des intérêts des HUD est de présenter un vecteur vitesse inertiel. Cette information devient généralement le centre d'attention du pilote ; elle est utilisée comme référence pour le guidage, avec des philosophies différentes selon les équipementiers.

Le problème est que cette information est dépendante de différents facteurs qui ne sont pas directement contrôlés par le pilote, tels que turbulence et vent, ainsi que retard et amortissement lié à la génération du symbole ; ainsi, la tâche du pilote se trouve affectée.

Ainsi, le couplage avion-pilote peut être exacerbé par la dynamique propre du vecteur vitesse et des informations de guidage (exemple du F16 avec EGPWS : la tâche consiste à mettre le vecteur vitesse dans une boîte de guidage).

Ces problèmes n'apparaissent pas forcément en simulation.

Des renforcements de la réglementation (25.1329) sont proposés, tant pour la conception que pour la certification des HUD.

Anderson, M.W. (1996). Flight test certification of multi purpose head-up display for general aviation aircraft (FAA). Journal of aircraft, vol. 33, No. 3.

Le HUD est certifié ici comme instrument secondaire de navigation en conditions VMC ou IMC, en complément des instruments en tête basse.

Ce HUD utilise des informations issues de gyroscopes ; la symbologie est condensée et non conforme, afin de réduire la perception du manque de précision et de conserver la ligne d'horizon dans le champ de vision dans un large domaine d'assiette.

Utilise des questionnaires ainsi qu'une échelle de Cooper Harper modifiée, avec tâches et critères dérivés de ceux utilisés pour la certification des HUD militaires (voir Haworth, 1993).

Performance désirée (e.g. 1/2 point ILS) / acceptable (e.g. 1 point ILS).

Il est essentiel de distinguer selon que le HUD doit être utilisé comme moyen secondaire ou primaire.

Trois types de tests sont utilisés : fonctionnels, interface pilote, opérationnels.

Le supplément au manuel de vol de l'avion (AFMS) doit être certifié parallèlement. L'importance de la clarté des explications relatives à la symbologie est particulièrement soulignée, dans la mesure où la symbologie présentée peut être éloignée de la symbologie présentée en tête basse.

Un risque inhérent aux essais en vol est le « HUD-induced loss of situational awareness ».

Deux types de manœuvres s'avèrent difficiles avec le HUD évalué : le contrôle du dérapage lors de virages avec un moteur en panne et la descente d'urgence sans excéder la vitesse maximale autorisée.

En situation inusuelle, les symboles dédiés à la navigation peuvent être gênants ; il est recommandé de les désactiver dans ce type de situation, au profit des barres de tangage.

Une opinion générale aux utilisateurs et aux certificateurs est que la récupération de situations inusuelles avec le HUD seul peut être une pratique non sûre : les raisons évoquées mais peu documentées à ce jour sont la dynamique du HUD, la symbologie et des facteurs humains. Pour cette raison, la FAA a opté pour une position conservatrice : elle requiert l'utilisation croisée du HUD et de la tête basse pour confirmer la situation puis l'utilisation exclusive des instruments en tête basse.

L'information de hauteur fournie par le radio altimètre nécessite une logique adaptée : pas d'affichage au dessus de 2500 pieds (altitude maximale du capteur ?) et affichage avec arrondi tous les 10 pieds au dessus de 500 pieds.

La focalisation d'attention sur la symbologie du HUD est un problème fréquemment rencontré par les utilisateurs peu habitués au HUD. Des avertissements adéquats doivent figurer dans le supplément au manuel de vol.

Mesures de performances lors des approches : écarts types des écarts de vitesse, de route et de pente ILS et de cap ADF, selon le type d'approche pratiqué. Les écarts de vitesse et de route sont considérés comme de bons indicateurs de la charge de travail du pilote...

Un problème de compatibilité entre les informations tête haute et tête basse a été relevé : lorsque l'approche est réalisée avec le directeur de vol en tête basse, les valeurs de commandes affichées dans le HUD (valeurs cibles de vitesse, route, pente et cap propres à l'approche) ne sont alors plus équivalentes aux commandes du directeur de vol, ce qui peut entraîner confusion ou

surcharge de travail si le pilote cherche à les ajuster. En conséquence, ces informations ne sont plus affichées lorsque le directeur de vol est engagé.

ASRS (2001). Head Up Display Reports. ASRS search request n° 6169, juin 2001.

Ce document est le résultat de la demande de recherche de rapports adressée à l'ASRS pour cette étude. Il contient 16 rapports extraits des 98274 rapports que contenait l'ASRS à la date de la recherche. Les dates de ces rapports s'étendent de 1990 à 1999.

Billingsley, G. O., Kuchar, J. K., & Jacobson, S. W. (2001). Head-up display symbology for ground collision avoidance. The International Journal of Aviation Psychology, 11(1), 33-51.

Cette étude évalue différentes symbologies GCAS possibles pour le vol militaire à basse altitude : break-X, chevron, montagne et autoroute. Le premier type ne donne qu'une alerte statique, les deux seconds donnent une alerte dynamique, et le dernier donne en plus une perception du profil du terrain à survoler. Logiquement, l'efficacité croît avec le niveau d'information fourni. La dernière symbologie aide également à l'évitement car elle est stabilisée en roulis contrairement aux premières. Les problèmes du *clutter* et des interactions éventuelles avec les autres symboles présentés ne sont pas abordés dans cette étude.

Bosman D. (1983). Modern display technologies for airborne applications : Human factors aspects of displays. AGARD LS 126, juin 1983.

Le critère à retenir pour établir la lisibilité ou intelligibilité (*legibility*) d'un affichage n'est pas son contraste ou sa résolution, mais bien la satisfaction de la cognition visuelle. Il s'agit d'une notion complexe, qui résulte de la combinaison dans le contexte opérationnel de différents éléments tels que :

- erreur de lecture d'un symbole,
- erreur de lecture d'un caractère,
- temps de lecture disponible,
- valeurs correctes de facteurs tels que luminance, éclairage, contraste, distance et angle de vue, accommodation de l'œil,...

Les recherches menées pour les besoins de l'imprimerie indiquent que différentes caractéristiques géométriques des symboles présentés influent également sur leur intelligibilité :

- choix des polices pour les caractères alpha-numériques,
- rapport hauteur/largeur d'un symbole,
- espacement des symboles (-> Gestalt)
- diversité des symboles présentés.

Boston, B. N., & Braun, C. C. (1996). Clutter and display conformality : changes in cognitive capture. Proceedings of the human factors and ergonomics society 40th annual meeting,, pp. 57-61.

Les HUD présentent quelques limites en particulier lorsqu'il est nécessaire de basculer son attention d'un objet d'attention à un autre dans le même espace visuel. Dans des études rapportées, seuls 30% des sujets perçoivent un objet surperposé à un HUD. L'étude menée sur un simulateur de navigation maritime indique que le HUD "conforme" permet de meilleures performances de détection en particulier avec le HUD avec le haut degré de *clutter*. Pour le reste des comparaisons, le degré de *clutter* ne semble pas rendre compte des variations observées.

Brosselin, S. (1998, décembre). EVS/SVS Les performances militaires nécessaires aux civils. Le monde de l'aviation, 62-69.

Brosselin, S. (1999). Système de vision artificielle tout-temps. Air et Cosmos, 1689, 22, 5 février 1999.

Chandra, D., & Weintraub, D. J. (1993). Design of head-up display symbology for recovery from unusual attitudes. Proceedings of the seventh international symposium on aviation psychology,, pp. 58-63.

Cronn, F., & Palmer, E.A. (1975). Comparison of two head-up displays in simulated standard and noise abatement night visual approaches. NASA TM X-3264, .

Les deux collimateurs évalués sont l'un avec informations brutes (situation display), l'autre avec informations de guidage (command display).

L'évaluation utilise les écarts types de l'erreur d'altitude sur trois segments de l'approche, ainsi que les écarts types de mouvements longitudinaux du manche, comme mesure de la charge de travail. Ces mesures sont confrontées avec l'opinion subjective des pilotes recueillie au moyen d'un questionnaire.

Les approches sont réalisées sans vent et avec cisaillement du vent, et avec turbulence indépendante du vent moyen.

Une analyse des corrélations indique que la précision est meilleure avec les informations brutes au début de l'approche, et avec les informations de guidage en fin d'approche. Cet effet est encore plus sensible lorsqu'il existe un cisaillement de vent.

Desmond, J. P., & Hansen, R. C. (1990). L'affichage des paramètres de trajectoire peut améliorer le pilotage et la sécurité. Journal de l'OACI, 14-18.

Cet article décrit le système de guidage tête haute HGS de Flight Dynamics et comment il a été certifié pour une utilisation pour les atterrissages en catégorie IIIa. Il rappelle notamment les critères et les conditions de certification en vigueur dans la réglementation FAA.

Dorr, D.W., Moralez E., & Merrick V.K. (1992). Simulation and flight test evaluation of head-up display guidance for Harrier approach transitions. AIAA-92-4233.

Symbologie et lois d'animation dédiées aux phases de stationnaire, de transition et d'avancement du Harrier.

L'évaluation utilise la notation HQR (Cooper-Harper Handling Quality Ratings) telle quelle.

Duley, J. A., Westerman, S., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1997). Effects of display superimposition on monitoring of automation. Proceedings of the ninth international symposium on aviation psychology,, pp. 322-328.

Cet article aborde le sujet délicat de l'efficacité du HUD comme moyen de surveillance sous pilotage automatique. Plusieurs difficultés liées aux automatismes sont évoquées : la détermination de leur mode de fonctionnement (par exemple FMS), la confiance excessive dans leur fonctionnement, la détection des déconnexions,...

Les défaillances dans la surveillance pourraient être liées à la multiplicité des tâches à surveiller, au positionnement des indicateurs destinés à la surveillance, à un rythme de surveillance inadapté.

Le problème serait lié à la fréquence de la surveillance.

Les résultats de ces expérimentations en laboratoire indiquent que la surveillance est peu affectée par la présentation des informations en superposition : la fixation ne garantit pas une surveillance efficace.

Dupont, J. (2000). L'EVS fait son retour. Air et Cosmos, 1770, 18.

Dwier, J.H., & Palmer, E.A. (1975). Three methods of presenting flight vector information in a head-up display during simulated STOL approaches. NASA TM X-3273, .

Les trois présentations évaluées sont sans vecteur vitesse, avec vecteur vitesse air et avec vecteur vitesse sol.

La méthodologie employée est rigoureuse :

- elle distingue les variables indépendantes intervenant dans l'expérimentation (3 symbologies évaluées, 4 vitesses de vent de face, 8 pilotes, 3 segments de l'approche) ;

- elle utilise des critères de performance précis (écart types sur chacun des trois segments de l'approche des erreurs d'altitude et de taux de descente, des mouvements du manche et de la performance sur la tâche secondaire) ;
- elle repose sur une analyse statistique des corrélations entre les différentes variables indépendantes (384 vols exploités).

Il apparaît que l'effet principal qui apparaît est une réduction de l'erreur d'altitude lorsque le vecteur vitesse sol est présenté. Les mesures de charge de travail (mouvements du manche et tâche secondaire) ne font pas apparaître de différences significatives entre les trois présentations.

Fadden, S., & Wickens, C. D. (1997). Improving traffic awareness with a head-up flight path highway display. Proceedings of the ninth international symposium on aviation psychology,, pp. 329-334.

Par rapport au HDD, le HUD permet un suivi de trajectoire plus efficace et une meilleure détection des événements extérieurs attendus. Cet article évalue l'impact de la présentation d'un tunnel sur ces deux points, et en particulier le compromis entre le *clutter* et la réduction du parcours visuel.

Un tunnel avec une indication de l'erreur en vitesse est utilisé ; du trafic est introduit dans le champ visuel de façon aléatoire.

Les résultats indiquent que le tunnel améliore à la fois le suivi de la trajectoire et la détection du trafic, peut-être grâce à une meilleure répartition des informations dans le champ visuel (le tunnel permet le suivi de la trajectoire par la vision périphérique).

Fadden, S., Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (1998). Costs and benefits of head-up display use : a meta-analytic approach. Proceedings of the human factors and ergonomics society 42nd annual meeting,, pp. 16 - 20.

Cet article repose sur l'analyse de résultats de 18 études antérieures, référencées dans l'article. Elle met en évidence la différence de l'efficacité du HUD pour la détection d'événements extérieurs (trafic), selon que ceux-ci sont attendus ou non : dans le premier cas la performance est améliorée, tandis qu'elle se dégrade dans le second cas par rapport à la performance obtenue avec les instruments classiques. Ce résultat conforte l'idée naturelle que la focalisation d'attention est plus forte lorsque aucun événement extérieur n'est attendu...

Fischer, E., Haines, R.F., & Price, T.A. (1980). Cognitive issues in head-up displays. NASA TP 1711.

Une étude plus orientée sur le comportement des équipages est réalisée dans le cadre des simulations décrites dans la référence précédente (TP 1720).

Les réactions aux différentes perturbations introduites dans la simulation sont les suivantes :

- Décalage vertical de l'ensemble de la symbologie (non conforme de $+2^\circ$) : ce décalage qui donne l'impression d'être trop haut n'est généralement pas perçu par les pilotes qui atterrissent tout de même correctement en se fiant soit à la symbologie (vecteur vitesse et piste synthétique) soit à la vision extérieure ; l'absence de détection de ce décalage peut être dangereux si le pilote tente d'atterrir en mettant le vecteur vitesse sur la piste réelle plutôt que sur son image synthétique.
- Décalage horizontal de la symbologie (non conforme de $\pm 3^\circ$) : ce décalage est détecté par les pilotes, mais interprété comme un vent latéral.
- Décalage latéral de l'ILS (biais de 90 ft) : ce décalage peu réaliste est détecté dès la percée (il est indétectable auparavant). Après la percée, les pilotes hésitent entre suivre le guidage du HUD ou faire un atterrissage en visuel...
- Incursion sur la piste : les incursions ne sont pas détectées par deux des pilotes et les délais nécessaires à la détection sont plus longs sans HUD qu'avec. Ceci peut s'expliquer par le fait que sans HUD, les pilotes passent en visuel dès qu'ils l'acquièrent, ainsi que par le fait que les pilotes en simulation ne s'attendent pas à voir apparaître un autre appareil dans le visuel.

De façon générale, la précision du pilotage avec le HUD est meilleure que sans HUD.

L'extrapolation des résultats de cette étude réalisée en simulation n'est pas établie pour les conditions du vol réel.

Foxworth T.G., Newman R.I. (1971). A pilot's look at aircraft instrumentation. AIAA 71-787.

L'histoire des instruments de cockpit a vu de nombreux essais, avant d'aboutir au T basique. Les informations requises peuvent être classifiées selon la phase de vol et les configurations particulières possibles (cas de panne notamment).

« Human factors, or just consideration of the user, should play a role in the design. »

L'article discute des stratégies de parcours visuel.

Il recommande d'éviter le « super instrument » qui monopolise l'attention.

Le directeur de vol a des inconvénients notables. Il réduit le rôle du pilote à suivre l'ordre sans avoir à participer à son élaboration.

Commentaires sur les HUD et proposition d'une disposition conçue par pilotes.

Foyle, D. C., MacCann, R. S., & Shelden, S. G. (1995). Attentional issues with superimposed symbology : formats for scene-linked displays. Proceedings of the eighth international symposium on aviation psychology,, pp. 98-103.

L'étude rapportée dans cet article aborde le partage de l'attention entre la symbologie et l'extérieur : elle teste l'hypothèse selon laquelle la répartition d'attention se ferait plus difficilement lorsque la symbologie et l'extérieur suivent des mouvements différents.

Une représentation alternative aux affichages digitaux fixes sur le HUD est évaluée. Elle consiste en des symboles liés à la scène : ces symboles sont classés en 3 catégories : scene enhancements, scene augmentations et virtual instruments.

Les résultats indiquent que les symboles liés à la scène (affichage de l'altitude) réduisent en effet la focalisation d'attention, et même qu'ils améliorent le suivi de la trajectoire.

Une application inspirée par ces résultats est proposée pour le roulage par mauvaise visibilité.

Foyle, D. C., MacCann, R. S., Sanford, B. D., & Schwirzke, M. F. J. (1993). Attentional effects with superimposed symbology : implications for head-up displays (HUD). Proceedings of the human factors and ergonomics society 37th annual meeting,, pp. 1340-1344.

Cet article complète et renforce les conclusions du précédent (Sanford, 1993) : la focalisation d'attention est rompue lorsque la symbologie requiert un parcours visuel (*scanning*) ; il semble donc préférable d'éviter des symbologies trop concentrées.

General Visual Display Considerations

Cet article fait la synthèse de travaux de recherche sur les affichages visuels pour l'automobile. Il aborde l'utilisation des HUD. Les avantages sont décrits, et une liste d'inconvénients possibles qui restent à explorer est fournie.

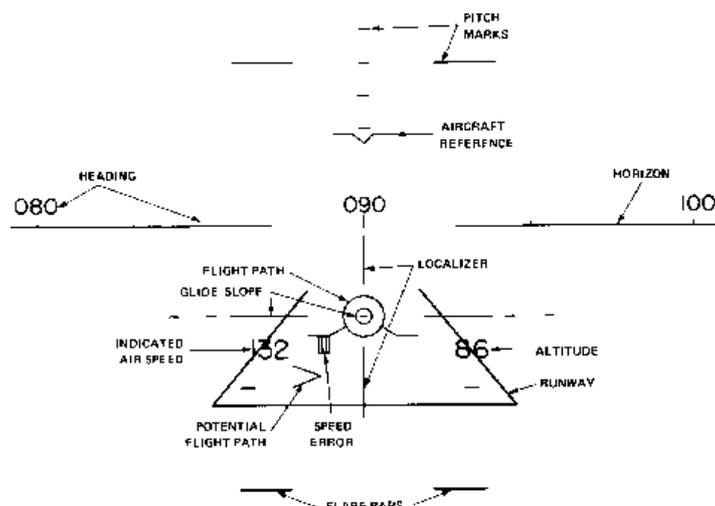
Haines, R.F., Fischer, E., & Price, T.A. (1980). Head-up transition behaviour of pilots with and without head-up display in simulated low visibility approaches. NASA TP 1720.

Des études en laboratoire donnent des ordres de grandeur des temps nécessaires pour la perception et la compréhension d'informations présentées dans le champ visuel (~25 ms) ou en tête haute (~100 ms). Ces temps sont faibles par rapport au temps requis si une accommodation est nécessaire : ce temps est estimé entre 0,4 et 1,9 secondes.

Le protocole de l'étude décrite dans l'article utilise des simulations d'approches, avec ou sans HUD, avec les combinaisons de :

- 7 conditions d'environnement différentes,
- 5 variations « cognitives », portant sur les scénarios (nominal, incursion de piste, désalignement vertical ou horizontal du HUD, désalignement latéral de l'ILS)
- et 3 modes de contrôle (manuel, sous PA jusqu'à l'arrondi ou à la remise de gaz, et sous PA avec déconnexion aléatoire juste avant l'altitude de décision).

La symbologie évaluée comporte vecteur vitesse sol et chevron de pente totale, ainsi qu'une indication de la hauteur de décision qui flashe 100 pieds au dessus de sa valeur et une barre d'écart de la vitesse air par rapport à la vitesse d'approche. Les valeurs de la hauteur de décision et de la vitesse d'approche sont entrées par l'équipage avant chaque approche au moyen de boutons potentiomètres disposés sur le panneau de contrôle de la tête haute.



Les procédures et conditions de l'expérimentation sont complètement détaillées dans cet article. Il apparaît que la moitié des pilotes participants ne font pas de vérification croisée de la tête haute avec les informations en tête basse (et s'il le font c'est en IMC). Cette tendance devrait être prise en compte pour l'élaboration des procédures d'utilisation des têtes hautes. Le questionnaire après expérimentation porte en particulier sur les conditions de l'expérimentation qui sont jugées peu réalistes, sur les biais éventuels de la simulation, et sur les cas de fixation abusive sur les symboles de la tête haute. Les résultats à ce questionnaire sont consignés dans une table synthétique.

Hansen R. C. (1999). *Operational and Safety Benefits of Head-up Displays*. Flight Dynamics, World Aviation Congress, USA, octobre 1999.

Harris D. (1997). Human Factors Certification for Civil Flight Decks. Aerogram, vol. 8 number 4.

Le problème de la certification des cockpits modernes (glass cockpits hautement intégrés) nécessite des méthodes et des critères prenant en compte les facteurs humains. La mesure de la performance humaine est clairement insuffisante ; elle doit s'accompagner d'une mesure de la charge de travail, qui aujourd'hui est encore sujette à recherche. La certification FH pose aussi le choix de la population participant à l'évaluation, qui devrait comporter les « moins bons » pilotes susceptibles d'utiliser l'interface... La certification FH devrait porter sur les points suivants :

- nécessité d'un processus de conception prenant en compte les FH et clairement identifié,
- conception itérative impliquant des pilotes d'essais et des pilotes opérationnels,
- évaluation non seulement des éléments du cockpit, mais surtout du cockpit en tant qu'ensemble, avec les procédures d'utilisation opérationnelles,
- accompagnement par des mesures de retour d'expérience après la mise en service.

Harris, R.L. & all (1978, septembre). Simulation and flight evaluation of a head up landing aid for general aviation. NASA TP 1276.

La symbologie évaluée consiste en un vecteur vitesse conforme avec la valeur de la vitesse air. L'évaluation utilise plusieurs mesures de performance (altitude au palier, taux de descente, vitesse et position au toucher des roues) ainsi que des mesures de l'activité de pilotage (mouvements des commandes). On note que les écarts constatés selon que la symbologie est utilisée ou non sont plus importants en simulation qu'en vol.

Haworth, L.A. & Newman, R.L. (1993, février). Test techniques for evaluating flight displays. NASA TM-103947.

Ce rapport concerne l'évaluation des HUD et HMD militaires. Il plaide pour le développement d'une méthodologie d'évaluation basée sur une mesure objective de la performance plutôt qu'uniquement sur des évaluations subjectives par des pilotes.

Ce rapport propose essentiellement deux échelles inspirées de l'échelle de Cooper Harper : l'une pour évaluer la lisibilité d'un symbole, l'autre pour évaluer sa contrôlabilité.

Il contient également une revue des spécifications portant sur les HUD et une discussion sur différents aspects de l'évaluation. Il en ressort que :

- les spécifications apparaissent peu nombreuses et présentent des lacunes (pas de critères sur la dynamique, manque de standardisation, spécifications basées essentiellement sur des opinions).
- la standardisation n'est pas souhaitable en elle-même ; elle doit seulement fixer des limites tout en permettant la flexibilité nécessaire en fonction de l'utilisation prévue ;
- différentes tâches doivent faire partie des essais d'évaluation, choisies en rapport avec la mission prévue et comportant des manœuvres dynamiques (arrondis sur avion civils,..).
- le choix de pilotes d'essais ou de pilotes opérationnels penche plutôt en faveur des pilotes d'essais, notamment parce qu'ils connaissent les échelles d'évaluation et qu'ils ne sont pas attachés à un système en particulier.
- sur la symbologie proprement dite, la présentation d'échelle de tangage compressées améliorerait la précision des tâches de poursuite ; les avantages d'un vecteur vitesse air par rapport à un vecteur vitesse sol sont aussi abordés.

Hoey B.L., Gore B.F. (1998). Advanced Traveler Information Systems and Commercial Vehicle Operations Components of the Intelligent Transportation Systems: Head-Up Displays and Driver Attention for Navigation Information. Federal Highway Administration, Publication NO. FHWA-RD-96-153.

Ce rapport décrit une recherche menée pour le domaine automobile sur l'intérêt du HUD pour l'affichage d'informations de navigation.

Jurion H. (2000). Aux commandes du Falcon 900EX. Air et Cosmos, supplément Special Falcon n°1765 du 6 octobre 2000, pp. 19-20.

p 19 : L'affichage du Gx au décollage est une aide à la décision précieuse pour l'interruption ou la poursuite du décollage, qui n'est pas encore certifiée sur avion civil. Problème possible à la lecture du HGS à la rotation car monochrome et chargé de beaucoup d'informations.

p 20 : Illustration de l'intérêt du HGS en cas de panne moteur au décollage: affichage de la pente de montée et contrôle direct de la position du vecteur vitesse au dessus du relief.

NB dans le même supplément, p 13 : Commentaires sur intérêt du HGS : économique (évite les détournements par capacité cat. III au lieu de cat. II, atterrissage en cat. II sur piste cat. I) et sécurité (*windshear*, simplicité en cas de panne de moteur au décollage).

Lauber, J.K., & Bray R.S. (1982). An operational evaluation of head-up displays for civil transport operations. NASA/FAA Phase III final report. NASA TP 1815.

Ce rapport décrit une étude approfondie de 2 concepts de symbologies parentes de celles des HUD actuels, pour des approches manuelles de cat. I. Ces symbologies comportent notamment vecteur vitesse inertiel, échelle de tangage, échelle de cap graduée sur l'horizon, chevron de pente potentielle, écart de vitesse et valeurs de vitesse et d'altitude. Le concept 1 est une symbologie non conforme, mais avec directeur de vol. Le concept 2 est une symbologie conforme avec informations de trajectoire. Le concept 2 donne la meilleure performance, le concept 1 donnant déjà meilleure performance que les instruments conventionnels. Le rapport discute également un et de questions importantes pour rendre ces concepts opérationnels, dont le programme d'entraînement et les procédures d'utilisation.

Léger A., Aymeric B (1999, octobre). Human Factor Issues Associated with HUD-based Hybrid Landing Systems: Sextant's Experience. World Aviation Congress, USA.

Leitner, E.F., & Haines R.F. (1981). Magnitude of visual accommodation to a Head up display. NASA TP 1796.

Cet article concerne une étude sur des difficultés d'accommodation suspectées en présence du HUD. En effet, la vision au repos s'accommode naturellement à une distance relativement courte (de l'ordre de 2 à 3 mètres, allongée avec l'âge). L'étude indique que la symbologie tête haute collimatée à l'infini suffit à maintenir l'accommodation à grande distance : la symbologie apparaît donc nette malgré la tendance naturelle de l'œil à s'accommoder plus près.

Levy, J. L., Foyle, D. C., & McCann, R. S. (1998). Performance benefits with scene-linked HUD symbology : an attentional phenomenon? Proceedings of the human factors and ergonomics society 42nd annual meeting,, pp. 11-15.

Cette étude vise à vérifier l'hypothèse que l'intérêt des symboles conformes à l'extérieur est liée aux limitations de l'attention spatiale et visuelle. Elle confirme l'explication de l'allocation d'attention par objet, plutôt que par proximité. Une explication alternative qui reste à tester serait que la présentation d'information d'altitude le long de la trajectoire encouragerait la transformation des deux tâches de maintien de l'altitude et de la trajectoire en une tâche unique.

Ligett, K. K., Reising, J. M., & Hartsock, D. C. (1993). Failure indications on a head-up display. Proceedings of the seventh international symposium on aviation psychology,, pp. 64-69.

Loh J.M., Lusty A.H. (1974). Display of energy-maneuverability performance information for fighter aircraft. AIAA 74-814.

Cet article rappelle les éléments fondamentaux qui gouvernent le compromis entre l'énergie et la manœuvrabilité.

Des règles sont suivies pour la conception d'une symbologie particulière, notamment :

- symbologie simple et principalement analogique,
- informations de guidage constamment à jour et lentement variables,
- prise en compte de tous les paramètres influents,
- compatibilité avec la totalité des modes d'affichage.

Mac Kenna, J.T. (1999). Carriers seek greater HUD availability. Aviation Week & Space Technology.

Intérêt du HUD pour la précision de tenue de vitesse (3 kt sans HGS, 1 kt avec d'après le chef pilote de Delta).

MacCann, R. S., Foyle, D. C., & Johnston, J. C. (1993). Attentional limitations with head-up displays. Proceedings of the seventh international symposium on aviation psychology,, pp. 70-75.

MacCann, R. S., Foyle, D. C., Andre, A. D., Begault, D., & Wenzel, E. (1997). Enhancing taxi performance under low visibility : are moving maps enough ? Proceedings of the human factors and ergonomics society 41st annual meeting,, pp. 37-41.

Une expérimentation est décrite, concernant l'intérêt pour le roulage par mauvaise visibilité d'une carte numérique 3D en tête basse associée à une symbologie adaptée en tête haute. La symbologie est une présentation conforme des bords du taxiway avec indication de la vitesse et panneaux virtuels.

Il apparaît que la symbologie en tête haute apporte un gain substantiel (en vitesse et en nombre d'erreurs) par rapport à la carte numérique utilisée seule. En conclusion, la carte et la tête haute se complètent : la carte apporte conscience globale de la navigation (utilisée avec champ large) tandis que le HUD apporte les informations pertinentes pour la conduite.

MacCann, R. S., Lynch, J., Foyle, D. C., & Johnston, J. C. (1993). Modelling attentional effects with head-up displays. Proceedings of the human factors and ergonomics society 37th annual meeting,, pp. 1345-1349.

Martin-Emerson, R., & Wickens, C. D. (1997). Superimposition, symbology, visual attention and the head-up display. Human Factors, 39(4), 581-601.

Cet article rapporte deux expérimentations sur les rapports entre *clutter* et surveillance du trafic.

L'article discute la notion de focalisation (cognitive tunneling or fixation) et les théories d'allocation de l'attention (object or space based).

Il rappelle la conclusion d'autres études qui indiquent que la focalisation peut-être plus importante avec le HUD qu'avec les instruments en tête basse, en particulier lorsque la densité des symboles présentés est forte.

Les résultats soutiennent l'hypothèse que le HUD améliore le suivi de la trajectoire par rapport au HDD, mais qu'il n'améliore pas nécessairement la détection d'événements imprévus. Ils renforcent également la conviction que l'utilisation de symboles conformes au visuel extérieur (ici : horizon, symbole de piste, écarts ILS) améliore le suivi de la trajectoire et qu'il est également susceptible de diminuer la focalisation. L'allocation d'attention et donc le résultat pratique restent fonction de l'objectif prédominant dans la tâche.

May, P. A., & Wickens, C. D. (1995). The role of visual attention in head-up displays : design implications for varying symbology intensity. Proceedings of the human factors and ergonomics society 39th annual meeting,, pp. 50-54.

Middleton, D.B., Srivastan R., Person L.H. (1992, décembre). Simulator evaluation of displays for a revised takeoff performance monitoring system. NASA TP 3270.

Le système évalué est connu sous le nom de TOPMS. Il s'agit d'une combinaison d'affichage tête haute et tête basse présentant les informations au décollage. Les symboles utilisés sont très spécifiques.

La méthodologie d'évaluation est présentée : information préalable des pilotes, échelle de notation (principe CHS), questionnaires détaillés...

Mulder, M., Pleijsant, J.-M., VanderVaart, H., & VanWieringen, P. (2000). The effects of pictorial detail on the timing of the landing flare : results of a visual simulation experiment. The International Journal of Aviation Psychology, 10(3), 291-315.

Naish, J.M., Miller D.L. (1980). An experimental evaluation of head up display formats. NASA TP 1550.

Cette étude aborde le choix du référentiel et de la conformité de la présentation des informations.

L'évaluation porte sur trois types de formats : référentiel avion, référentiel extérieur non conforme et référentiel extérieur conforme.

La présentation du symbole de piste en approche est sujette à interrogation : il existe un risque évident dans le cas où le symbole ne coïncide pas avec la piste réel, mais plus grave, un risque que le symbole masque une éventuelle intrusion sur la piste réelle...

Une interrogation existe également à propos de la conformité de l'horizon : la position de l'horizon réel dépend de l'altitude, de la visibilité,...

Newman, R.L. (1995). Head-Up Displays: Designing the Way Ahead. Pub. Ashgate.

Cet ouvrage de base est particulièrement intéressant pour comprendre l'histoire et les problèmes spécifiques aux HUD. Il contient notamment une revue des symbologies existantes, des recommandations sur l'ensemble des sujets et une bibliographie de plus de 500 références.

Newman, R. L. (1987). Improvement of Head-Up display standards. Volume I : Head-up display design guide. US Air Force Wright Aeronautical Lab., TR-87-3055, Dayton, OH.

Ce rapport vise essentiellement la conception des HUD militaires ; il semble largement inspiré des idées de l'auteur et aboutit à des recommandations que ne suivent pas les HUD civils actuels.

Les nombreux aspects intervenant dans la conception des HUD sont abordés : définitions, technologie, critères d'affichage (compatibilité avec la tête basse, *clutter*, informations de base), critères sur la symbologie (précision, dynamique, conformité, taille).

Des spécifications plus précises sont données pour le cas où le HUD est utilisé comme instrument primaire (PFD).

L'appendice A décrit les symboles recommandés.

L'appendice B donne les symbologies recommandées par phase de vol.

L'appendice E est une bibliographie contenant 586 références...

Newman, R.L., & Haworth, L.A. (1995, février). Tristar 1 : evaluation methods for testing Head-Up Display (HUD) flight symbology. NASA TM 4665,.

Cet article porte sur une évaluation de symbologies militaires américaines, et plus particulièrement sur le format des barres de tangage.

Les lois d'animation des symboles comportent des filtres contre la turbulence :

- retard pur de 0,04 secondes sur l'incidence,
- addition d'un terme d'accélération (*quickener*) sur la position du vecteur vitesse et de l'échelle de tangage, en fonction de la vitesse de tangage.

Les symboles ILS consistent en deux barres croisées.

Les données subjectives recueillies sont :

- un questionnaire préalable sur l'expérience générale et avec HUD,
- un questionnaire sur les symboles et n questionnaire TLX par vol,
- un questionnaire général et débriefing pour chaque pilote après son dernier vol.

Une discussion intéressante porte sur les échelles de notation utilisables. Deux types d'échelles sont disponibles historiquement :

- les échelles de cotation de la difficulté en 7 niveaux de « très difficile » à « très facile » ; l'avantage est que ces échelles ne demandent pas d'apprentissage ; l'inconvénient est que les pilotes renâclent à utiliser les niveaux extrêmes et la cotation difficile ; ainsi l'échelle est généralement utilisée seulement sur trois niveaux.
- les arbres de décision de type HQR ; ces arbres sont efficaces mais doivent être expliqués ; il est recommandé de fournir un exemplaire de l'arbre aux pilotes évaluateurs.

L'évaluation d'une symbologie comporte deux aspects :

- la lisibilité : la symbologie permet-elle d'accéder à la valeur des paramètres ?
- la contrôlabilité : la symbologie permet-elle de contrôler ces paramètres ?

Deux arbres de décision ont été élaborés pour évaluer ces deux aspects. Ces arbres et les différents questionnaires sont reproduits dans l'article.

Les arbres doivent être appliqués pour chaque information pertinente (vitesse air, altitude,...) dans le cadre d'une tâche précise (phase de vol). L'évaluateur doit ainsi avoir une notion exacte du critère de performance retenu pour cette tâche.

L'évaluation porte sur 4 types de tâches : poursuite air-air (cible sur trajectoire prédéfinie, disparaissant à des instants inconnus correspondant à des situations inusuelles), attaque air-sol, approche ILS et récupération d'attitude inusuelle. Des améliorations possibles sont détaillées pour chaque tâche.

Pilé A. (1974). Le système d'atterrissage tous temps du Mercure. Avions Marcel Dassault – Bréguet Aviation. AGARD Conference Proceedings n°160.

Cet article décrit le système d'atterrissage du Mercure. Trois versions sont proposées, dont une version opérationnelle après panne avec références visuelles apportées par un collimateur tête haute dont la symbologie est très simple.

L'article détaille les algorithmes de surveillance et l'utilisation selon les différentes pannes possibles.

Previc, F. H., & Ercoline, W. R. (1999). The "Outside-In" attitude display concept revisited. The International Journal of Aviation Psychology, 9(4), 377-401.

Proctor, P. (1994). HGS offers airlines safety, economic edge. Aviation Week & Space Technology, 12 décembre 1994.

Intérêt économique de réduire les minima sur aéroports peu équipés (atterrissage en catégorie IIIb en automatique avec surveillance au HUD).

Intérêt pour la sécurité en cas de déconnexion du pilote automatique au dernier moment et également pour le roulage sur la piste.

Proctor, P. (1997). Economic, safety gains ignite HUD sales. Aviation Week & Space Technology, 19 décembre 1997.

Le HGS est certifié par autorités américaines et européennes pour atterrissage manuel en Cat. 3a et réduit les minima en Cat. 1, ainsi qu'au décollage.

L'article détaille l'intérêt du HUD pour plusieurs compagnies (Luftansa Citlines, Southwest, Alaska).

L'Aéropostale utilise des HUD de Sextant (HFDS holographique FOV 40x26 deg) sur B 737-300, en transport de fret la nuit et en transport de passagers pour Air France le jour.

Proctor, P. (1999). Enhanced head-up symbology builds situational awareness. Aviation Week & Space Technology, 19 avril 1999.

Cet article concerne une version améliorée du collimateur HGS de Flight Dynamics. Ce collimateur présente certaines améliorations de symbologie :

- un indicateur analogique d'incidence avec des repères de valeur optimale pour l'approche et de limite de vibreur de manche, utile pour exploiter au mieux les capacités de l'avion et détecter des incohérences entre vitesse d'approche et masse estimée de l'appareil.
- au sol, un allègement de la symbologie et des aides au guidage sur la ligne centrale de la piste avec affichage de la longueur de piste restante,
- au décollage, barre de tangage limite pour éviter toucher avec la queue et symbologie particulière si le décollage est avorté, avec indication du niveau de freinage et de la décélération.
- lors de situations inusuelles, symbologie simplifiée de type sphère d'attitude non conforme avec indications de vitesse avec ses limites et d'altitude, avec vecteur de tendance.
- en cas d'alerte TCAS, indications de guidage.

L'HGS est certifié pour les atterrissages en catégorie 3a.

Reising, J. M., Hartsock, D. C., Ligett, K. K., & Soltz, T. J. (1995). A comparison of two head up display formats used to fly curved instrument approaches. Proceedings of the human factors and ergonomics society 39th annual meeting,, pp. 1-5.

Deux HUD sont comparés : l'un avec une symbologie classique et l'autre avec une symbologie destinée à présenter une trajectoire d'approche complexe. Dans ce cas, le pilotage consiste à suivre la maquette d'un avion de référence (*follow-me aircraft*). Les résultats montrent une plus grande efficacité de l'affichage de la trajectoire par rapport au HUD standard. La raison invoquée et la présentation à la fois de la situation présente et de l'évolution à venir qui est très utile pour une approche courbe. Cette symbologie est également préférée par les pilotes.

Reising, J. M., Liggett, K. K., Kustra, T. W., Snow, M. P., Hartsock, D.C., & Barry, T. P. (1998). Evaluation of pathway symbology used to land from curved approaches with varying visibility conditions. Proceedings of the human factors and ergonomics society 42nd annual meeting,, pp. 1 - 5.

Cette étude évalue l'intérêt d'une représentation de type route dans le ciel pour le suivi manuel de trajectoires d'approches courbes, quelles que soient les conditions de visibilité. Elle est réalisée dans des conditions de simulation assez réalistes.

Les résultats sont exploités par la méthode dite d'« analyse de l'équivalence », qui repose sur la détermination par des experts de la tolérance sur les paramètres clefs de la performance attendue du système en évaluation.

Ils indiquent que cette représentation permet le pilotage des approches avec une bonne précision, tant en écart à la trajectoire qu'en tenue de vitesse. La question du *clutter* propre à ce type de représentation n'est pas abordée.

Sanford, B. D., Foyle, D. C., MacCann, R. S., & Jordan, K. (1993). Head-up displays effect of information location on the processing of superimposed symbology. Proceedings of the seventh international symposium on aviation psychology,, pp. 81-87.

Suite à des difficultés constatées avec des HUD en opérations (détection d'intrusion de piste, contrôle simultané d'altitude et de cap), l'article décrit une expérimentation en laboratoire visant à valider l'un de deux modèles d'attention :

- soit par proximité (*location-based*)
- soit par nature des informations (*object-based*; Duncan, 1984) : par exemple affichages digitaux par rapport au terrain...

Les résultats supportent partiellement le second modèle. On constate cependant que la proximité de 2 informations (altitude et trajectoire) peut renforcer l'effet de tunnel sur le HUD : espacées, la perception de l'extérieur est améliorée.

L'article justifie donc la représentation d'informations conformes, afin d'éviter la séparation en objets, source potentielle de focalisation d'attention. La complexité de la symbologie pourrait affecter la ségrégation de l'attention : cette hypothèse reste à investiguer.

Sicre, J.-L. (1998, septembre). Implication d'un équipementier dans la conception machine. Sextant Avionique, 7^{ème} forum Relation Homme Machine, ANAE, Toulouse.

Cet exposé décrit notamment l'implication de l'équipementier dans l'installation de HUD dans les compagnies, avec l'exemple du HFDS sur B737-300 de L'AÉROPOSTALE.

Ce HUD est utilisé pour augmenter les capacités opérationnelles de la compagnie : passage des catégories IIIa à IIIb (minima : RVR 125 m, DH 35 ft). Il est utilisé comme moyen secondaire : surveillance de l'approche automatique et reprise en manuel en cas de déconnexion PA pour remise de gaz ou poursuite de l'atterrissage (sous la DH). Ce HUD présente des informations de situation, non de contrôle.

Un cas d'utilisation critique est décrit : il s'agit de la remise de gaz sur un moteur avec déconnexion PA sous la DH. Des modifications de la symbologie ont été apportées pour pallier à ce cas.

L'exposé pose un certain nombre de questions sur le rôle de l'équipementier et sur la pertinence des choix de symbologie.

Snow, M. P., Reising, J. M., Ligett, K. K., & Barry, T. P. (1999). Flying complex approaches using a head-up display : effects of visibility and display type. Proceedings of the Tenth international symposium on aviation psychology,, pp. 1-7.

Les futures approches complexes comporteront des virages et des variations de taux de descente ; des trajectoires complexes sont également suivies par les avions militaires à basse altitude.

Les symbologies habituelles sont peu adaptées au guidage sur ces approches ; 3 études sont décrites qui visent à évaluer l'intérêt d'une présentation d'une route virtuelle et de terrain synthétique, pour des avions militaires. La 3^{ème} étude utilise la méthode SAGAT pour l'évaluation de la conscience de la situation, et en particulier des événements autres que le suivi de la trajectoire (attaque air-sol).

Ces études préliminaires indiquent l'intérêt potentiel des présentations évaluées ; les conclusions demandent à être étendues pour des conditions de visibilité diverses et des contextes plus réalistes.

USAF (1996). Aircraft Display Symbology. Norme MIL-STD-1787B.

Cette norme décrit précisément les constituants d'une symbologie HUD préconisée pour les avions militaires. Cette symbologie est sensiblement différente des symbologies civiles actuelles : elle comporte notamment des indicateurs de vitesse et d'altitude sous forme de cadrans à aiguille circulaires.

Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (1996). The effect of clutter and lowlighting symbology on pilot performance with head-up displays. Proceedings of the human factors and ergonomics society 40th annual meeting,, pp. 62-66.

Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (1998). Head-Up Displays: effects of clutter, display intensity, and display location on pilot performance. The International Journal of Aviation Psychology, 8(4), 377-403.

Cet article aborde les effets du *clutter* et de la position tête haute ou tête basse d'un affichage sur avion léger, en vol de croisière, sur les performances de pilotage et de détection de trafic.

L'article rapporte des problèmes rencontrés avec les HUD :

- focalisation d'attention sous forte charge de travail, qui conduit à ne pas détecter des événements imprévus, tels qu'un cisaillement de vent (Larish & Wickens, 1991).
- difficulté liée au *clutter*, dans la recherche d'informations visuelles, tels que des obstacles sur la piste (Weintraub & Ening, 1992). Un cas d'incident sur avion militaire n'ayant pas vu une barrière sur la piste en raison d'une surcharge d'informations en tête haute est mentionné.

Avec un HUD, 4 catégories de sources d'informations peuvent être distinguées :

- les objets dans l'environnement réel ;
- les symboles superposés de façon intentionnelle sur le monde extérieur et destinés à renforcer la perception du monde extérieur ;
- les informations superposées mais qui n'ont pas de relation directe avec le monde extérieur ;
- les informations fournies par les autres instruments en tête basse.

L'attention doit être répartie de façon appropriée en fonction de la tâche entre l'environnement extérieur et les instruments : en croisière, la répartition devrait être équilibrée, tandis qu'en approche VMC sur avion léger, l'attention devrait être principalement consacrée à l'environnement. Il est suggéré que le niveau d'attention requis par le HUD est fortement dépendant de la présentation des informations adoptée (pertinence des informations, *clutter*, intensité lumineuse).

Deux expérimentations en simulation sont décrites. Ces expérimentations concernent des vols de croisière avec des points tournants commandés (vitesse, cap, altitude) et l'apparition de trafic en route de collision, avec HUD ou HDD. Le niveau de luminosité et de *clutter* du HUD sont variés.

Les expérimentations confirment la supériorité du HUD sur le HDD pour la détection du trafic et elles révèlent que le *clutter* par des informations non directement liées à la tâche et présentées en périphérie du champ du HUD affecte la détection à la fois du trafic et des changements sur le HUD.

Wanner, J.-C. (1974). Présentation des informations nécessaires pour le décollage et l'atterrissage. AGARD Conference Proceedings n°160.

Cet article justifie l'intérêt du collimateur tête haute en s'appuyant sur des considérations ergonomiques. Le collimateur proposé comporte pour seules informations un vecteur vitesse, un horizon, une piste synthétique et des repères d'incidences et de pente, ainsi qu'un chevron de pente totale, l'ensemble étant conforme et collimaté à l'infini.

La forme des symboles semble maintenant obsolète, mais les principes proposés semblent toujours pertinents. En particulier, l'article plaide pour l'utilisation du collimateur tête haute pour le pilotage manuel à vue et comme moyen de surveillance lors des approches automatiques.

Weinstein, L. F., & Ercoline, W. R. (1991). The standardization of military head-up display symbology. Proceedings of the Sixth international symposium on aviation psychology,, pp. 210-215.

Cet article donne l'état des recherches et la position de l'USAF pour la conception et l'emploi des HUD : l'USAF considère que les recherches doivent viser à définir une symbologie standard avant de pouvoir accepter le HUD en tant qu'instrument de pilotage primaire.

L'article discute en particulier les caractéristiques suivantes :

- une représentation de type cadran à aiguilles pour les informations de vitesse et d'altitude;
- l'asymétrie des barres de tangage à piquer et à cabrer, sans barres articulées à piquer ;
- la forme et la nature des consignes du directeur de vol ;
- la présentation du vecteur vitesse air ou sol...

Différentes questions encore en suspens à la date de l'article sont évoquées.

Weinstein, L. F., & Ercoline, W. R. (1992). The standardization of USAF head-up display symbology. Proceedings of the 30th annual symposium of SAFE association,, pp. 106-108.

Weinstein, L. F., & Ercoline, W. R. (1993). Procedures and metrics for aircraft cockpit display evaluations. Proceedings of the human factors and ergonomics society 37th annual meeting,, pp. 1201-1205.

Weinstein, L. F., Gillingham, K. K., & Ercoline, W. R. (1994). United States Air Force Head-Up Display control and performance symbology evaluations. Aviation, Space, and Environmental Medicine, A 20 - A 30.

Ce rapport décrit les études entreprises par l'USAF pour la définition d'une symbologie HUD standard pour l'utilisation comme instrument primaire en IMC sur avion de combat. Ces études portent spécifiquement sur la représentation de 5 éléments d'information :

- altitude et vitesse : valeur numérique au milieu d'un cadran à aiguille ;
- échelle de tangage : asymétrie et quickening ; résultats peu significatifs ;
- horizon : tireté lorsque hors champ, il aide au rétablissement d'attitude inusuelle ;
- vitesse verticale : arc autour de l'altimètre et valeur numérique en dessous* ;
- gestion d'énergie : chevron d'énergie avec barre d'écart de vitesse ou incidence.

* cette présentation est évaluée sans affichage du symbole de vecteur vitesse...

La symbologie a été évaluée en vol et certifiée pour l'USAF en 1992.

Weinstein, L. F., Ercoline, W. R., Evans, R. H., & Bitton, D. F. (1992). Head-Up Display standardization and the utility of analog vertical velocity information during instrument flight. The International Journal of Aviation Psychology, 2(4), 245-260.

Cet article rapporte une expérience conduite par les laboratoires de l'US Air Force dans le cadre de la standardisation de ses HUD.

L'article rapporte des cas d'incidents dans lesquels le HUD aurait été identifié comme un facteur contributif, notamment des rotations excessives au décollage (avec toucher de la queue de l'appareil).

L'article mentionne des sujets qui restent à préciser concernant la symbologie des HUD :

- les symboles pour le vecteur vitesse ;
- le format de présentation de l'information de cap ;
- le format des informations d'énergie (écart de vitesse, écart d'incidence, accélération,...) ;
- la pertinence des lois de contrôle des symboles (quickening, compression, caging) ;
- la présentation des indications relatives à une panne (oter le symbole pourrait être insuffisant) ;
- et enfin, la présentation de la vitesse verticale qui est le sujet de cette étude.

L'étude est réalisée dans l'hypothèse de la disparition du vecteur vitesse (cas des grandes incidences notamment), ce qui en limite l'intérêt pour le cas général. La conclusion est que la présentation avec un arc autour de l'altimètre (cadran à aiguille sur le HUD standard de l'USAF) est supérieure aux présentations digitales, sur cadran à aiguille ou par ruban.

Weintraub D.J., Ensing M. (1992). Human Factors Issues in Head-Up Display Design : The Book of HUD. Pub. CSERIAC.

Ce livre constitue un état de l'art (SOAR) des HUD conformes et collimatés (2 caractéristiques essentielles d'un HUD). L'évaluation des HUD est abordée : d'emblée les auteurs précisent qu'il ne s'agit pas d'une question aisée, et qu'il y manque des preuves ; souvent des décisions se prennent sur des règles de « bon sens » qui peuvent se révéler erronées à l'utilisation : des bases expérimentales solides sont indispensables.

Le HUD doit être apprécié non seulement en statique mais aussi en dynamique : les lois d'animation des symboles peuvent être aussi déterminantes que les symboles eux mêmes.

Une symbologie est utilisée comme référence ; il s'agit d'une symbologie développée par NASA-FAA par R. Bray en 1980. Elle est amplement décrite dans la littérature et elle a été reprise sous différentes formes et avec différentes lois d'animation (Boeing, Flight Dynamics). Il s'agit d'une symbologie certifiée pour atterrissages manuels en cat. IIIa sur B-727 d'Alaska Airlines.

Le livre est divisé en plusieurs sections :

- hardware : une caractéristique essentielle est le champ de vision (problème de présentation de la symbologie hors champ) ;
- lisibilité de la symbologie : taille des symboles (p 34), épaisseur, fonte, couleur (recommandation du monochrome)

Wickens, C. D. (?). Attentional issues in head-up displays. ?

Wickens, C. D., & Long, J. (1994). Conformal symbology, attention shifts and the head-up display. Proceedings of the human factors and ergonomics society 38th annual meeting,, pp. 6-10.

Wickens, C. D., Martin-Emerson, R., & Larish, I. (1993). Attentional tunneling and the head-up display. Proceedings of the seventh international symposium on aviation psychology,, pp. 865-870.

Wurfel, H.-G. (1984). F-16 and A-10 diffraction optics head up display (HUD) flight test evaluation. AGARD CP 373 FMP.

L'évaluation porte sur trois domaines :

- optique (FOV, perception distance, coloration, tolérance aux mouvements de la tête, brillance, réflexions, soleil)
- mécanique (visibilité, obstruction du visuel, commandes)
- symbologie (génération des symboles, animation).

Elle utilise des notations subjectives en 4 niveaux : excellent, satisfaisant, marginal et inacceptable, ainsi que sur une échelle de notation (*head up rating scale*) adaptée de l'échelle de Cooper Harper, et sur les avis recueillis par débriefings et questionnaires.

Des difficultés proviennent de l'intégration du HUD sur avion : distorsion introduite par la visière, non conformité des symboles, réflexions gênantes,...

Zenyuh, J. P., Reising, J. M., McClain, J. E., Barbato, D. J., & Hartsock, D. C. (1987). Advanced Head-Up Display (HUD) symbology : aiding unusual attitude recovery. Proceedings of the human factors society - 31st annual meeting,, pp. 1067 - 1071.

L'étude menée sur l'intérêt de barres asymétriques ou colorées pour le rétablissement de situations inusuelles indique une légère amélioration des performances lorsque ces caractéristiques sont cumulées.

-o-O-o-