

Point sur les détecteurs d'hypovigilance et d'incapacité des pilotes de lignes

Par **Jean-Jacques Speyer -Membre de l'AAE**
(Commission CAC « Groupe Automatisation – Compétences »)

(Pour le glossaire se reporter en dernière page)

1. Préambule

Cette note rappelle les travaux effectués jusqu'en 2009 par l'auteur dans le cadre de réflexions d'application aux avions Airbus et propose des voies de réalisation restant à développer, en tenant compte des résultats des dernières recherches sur le sujet.

Une approche réellement ergonomique des IHM doit nécessairement inclure tout type d'échange interactif entre l'homme et la machine.

Doivent obligatoirement y figurer la prise en compte des conséquences de l'effet de l'automatisation, notamment sur la vigilance, sur l'attention et sur l'implication de l'équipage allant des opérations de routine jusqu'à l'incapacité de(s) pilotes(s).

Dans ce cas il n'y aurait donc pas uniquement les pannes de l'avion qui importent mais idéalement des signes - aussi faibles qu'ils puissent être - de comportements inadéquats avec des opérateurs sujets à des aléas aussi difficiles à cerner et aussi divers que :

- l'excès de charge de travail en situations dégradées,
- l'incompréhension face à certaines situations,
- la baisse de concentration et l'attention diffuse,
- la baisse de focalisation et le manque de discernement,
- les comportements erratiques affectant l'implication,
- la diminution des capacités cognitives et décisionnelles,
- l'effet de sidération et la condition "gelée".

En pratique nous avons opté pour les aléas suivants :

- incapacité à effectuer le travail au poste de pilotage,
- baisse de vigilance, pression du sommeil, relâchement,
- la difficulté à prendre les bonnes décisions, même avec des suggestions émanant de la situation ou d'une IHM.

L'objectif de cette note est de rappeler le cheminement permettant de spécifier un système de détection de perte partielle ou totale de capacité.

Nous commencerons par donner un très bref aperçu des études d'Airbus sur la fatigue et la vigilance qui débouchèrent sur des évaluations de dispositifs dédiés destinées à développer un système capable de détecter la perte de vigilance et d'implication des pilotes.

2. EPAM : activité et/ou vigilance ?

2.1 Contexte initial

En préparation aux opérations en A340 la DGAC avait dès 1990 passé un marché d'Etat avec Airbus et le Laboratoire d'Anthropologie Appliquée (LAA) de l'Université René Descartes à Paris pour étudier la fatigue et la vigilance des pilotes de long-courriers et ce avec le concours de 7

compagnies aériennes volontaires sur plusieurs types d'avions. A l'issue de quoi nous avons développé un guide de recommandations pour gérer les repos avant, pendant et après vols.



Ce guide avait ensuite été adapté et transformé en cours pour les autorités Singapouriennes afin de lancer les opérations en ultra-long courrier avec l'A340-500 chez la compagnie Singapore Airlines sur des vols trans-Pacifique New-York - et Los Angeles - Singapore dont les amplitudes pouvaient dépasser les 18 heures.

Aussi les compagnies Emirates, Cathay et Qantas se concertèrent-elles sur un projet similaire avant les années covid. Peut-être un tel système verra-t-il le jour pour le projet « Sunrise » dont les opérations en A350 augurent de vols sans escale entre Sidney et Londres et entre Sidney et New York courant 2025. Enfin, certaines opérations en cargo A330 et A350 pourraient s'effectuer en SPO et divers dispositifs décrits dans cette note seraient à l'étude pour aider à les mettre en application.

De nombreuses recommandations figuraient dans le guide, et entre autres comment gérer le repos en fonction du décalage horaire. Et notamment le repos à bord.

Une de ces recommandations était de faciliter l'alternance de phases de veilles actives et passives permettant aux pilotes d'effectuer des siestes pour réduire la pression du sommeil.

Des enregistrements EEG avaient confirmé de fréquentes réductions de la vigilance des pilotes en vol, notamment lors de la phase de descente. L'efficacité de siestes avait également été confirmée par des études de la NASA mais pas en équipage à deux. Les JAA avaient marqué leur accord pour permettre à des équipages à deux d'effectuer ces siestes en alternance et au poste de pilotage lors de phases de croisière quand le vol serait stable (sans changement de trajectoire, d'altitude, ni de pannes etc...). Les siestes pouvaient contribuer à une certaine monotonie liée au manque d'échanges, aux communications réduites, à la faible intensité lumineuse et ainsi mener à une vigilance amoindrie du pilote resté seul aux commandes en veille active par rapport à l'autre pilote en sieste. La sieste ne devait pas dépasser les 45 minutes afin d'éviter l'inertie du sommeil au réveil.

A la demande spécifique de Bernard Ziegler et avec le soutien indéfectible de Pierre Baud nous allions adapter une interface dédiée pour faciliter la gestion de ces repos.

2.2 Les différentes Interfaces CAM, PGS et EPAM

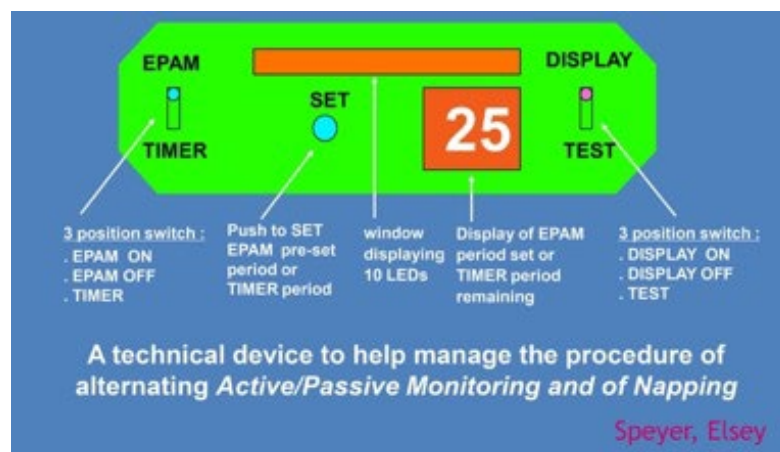
Boeing avait introduit le « **Crew Activity Monitor** » qui est uniquement lié aux interactions avec le FMS (Flight Management System) et est installé sur les avions long-courrier B747, B767, B777,

B787 et leurs dérivés. Ce système s'était inspiré du « **Pilot Guard System** » de Page Aerospace offert à Airbus par le Captain Adrian Elsey (British Airways) suite à une conférence à la RAeS. Un seul vol en A310 avait dès 1994 permis de conclure que le PGS devait étendre ses mesures du seul FMS aux autres panneaux de sélections. Pour l'évaluation en A340 nous avons choisi de tenir compte des interactions avec:

- les systèmes/équipements individuels Pilote/ Copilote :
 - RMP,
 - ACP,
 - MCDU,
 - ECP,
 - EPAM,
 - DCDU,
- les panneaux/systèmes/équipements collectifs :
 - Commandes du FCU,
 - Micros-manche communications ATC,
 - le panneau de contrôle ECAM,
 - Boîtier de commande "Transpondeur/TCAS",
 - Boutons-Poussoirs " Engine Anti-Ice ",
 - Sélecteur "Radar Météo",
 - Sélecteur " Engine Start ",
 - Sélecteur " Seat Belts ",
 - RMP 3,
 - Sélecteur "Cabin Attendant Call",

2.3 Le fonctionnement de l'EPAM

Ce concept plus étendu fût appelé **Electronic Pilot Activity Monitor** et fonctionnait comme suit :



Lorsque l'EPAM était en mode activité le manque d'interactions pendant un laps de temps à spécifier activait une alarme visuelle. Avant chaque action le temps résiduel avant une quelconque alarme était visible au moyen d'un ruban doté de cinq diodes LED.

Ce retour d'information visuelle étant censé rendre les pilotes conscients de leurs activités désormais décroissantes. Ce temps résiduel était réglable au moyen d'un bouton (SET) introduisant le choix entre 2, 5, 10, 25, 45 minutes. Si une autre minute restait sans suite, une alarme auditive se déclencherait.

Comme cette évaluation allait être exécutée lors de vols commerciaux - en l'occurrence à la Sabena - l'EPAM de base n'était pas connecté aux systèmes de l'avion car cela aurait exigé un exercice de certification inapproprié.

Un opérationnel d'Airbus en tant qu'observateur consacré effectuait pendant l'entièreté du vol une réinitialisation manuelle à chaque fois qu'un des pilotes sollicitait physiquement un des systèmes précités. De plus, cet observateur annotait méticuleusement sur un ordinateur les scènes de vol au moyen d'un logiciel dédié muni d'un système de codage spécialement adapté et permettant en outre d'effectuer ces réinitialisations en fonction de la fenêtre de temps sélectionnée.

Enfin le mode « Minuteur » peut être considéré comme une alarme qui doit être activée par le pilote qui va effectuer une sieste. Son temps était limité à 45 minutes afin d'éviter l'inertie du sommeil au réveil qui est susceptible d'apparaître après un sommeil profond.

2.4 Les vols d'évaluations Sabena

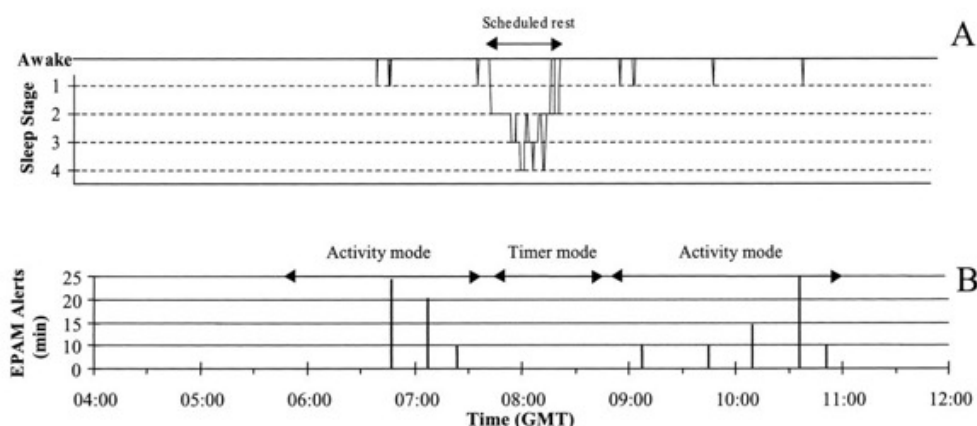
Les vols effectués concernaient la ligne Bruxelles-New York en A340 chez feu Sabena, vols réputés fatiguant puisqu'ils partaient le soir, arrivaient très tard à New York et requittaient le lendemain vers 4h du matin pour rentrer à Bruxelles à midi. Des enregistrements continus furent effectués d'EEG (électro-encéphalogrammes), d'EOG (électro-oculogrammes) et d'électrocardiogramme (EKG) afin d'évaluer l'EPAM en termes de sensibilité à la fatigue et au maintien de la vigilance. Cette expérimentation fut effectuée avec le LAA. Les mesures physiologiques furent enregistrées numériquement sur un système ambulateur dont les données extraites étaient analysées au moyen d'un logiciel d'analyse des stades du sommeil.

Deux types d'informations retenaient l'attention :

- Les stades de sommeil pendant les siestes au poste (du stade 1 au Stade 4 comme il n'y eut pas de REM (Rapid Eye Movement) observé pendant cette étude,
- Les brefs épisodes (dits micro-sommeils) alors que l'équipage était supposé être vigilant,

De façon concomitante les activités de l'équipage étaient annotées tout le long pour établir une relation éventuelle avec les changements physiologiques. Les réinitialisations s'effectuaient en fonction des observations quand l'EPAM était en mode « activité » celui-ci étant relancé en fonction de l'emploi des systèmes. Les expérimentateurs au poste avaient respectivement la charge du suivi des paramètres physiologiques et des observations à bord. Bien que cette présence ait pu influencer le comportement et la vigilance des pilotes les observations indiquent que cet effet était plutôt prédominant lors de la première partie du vol et qu'ultérieurement la fatigue prenait le dessus.

FATIGUE COUNTERMEASURES—CABON ET AL.



Deux types de données sont ainsi présentées :

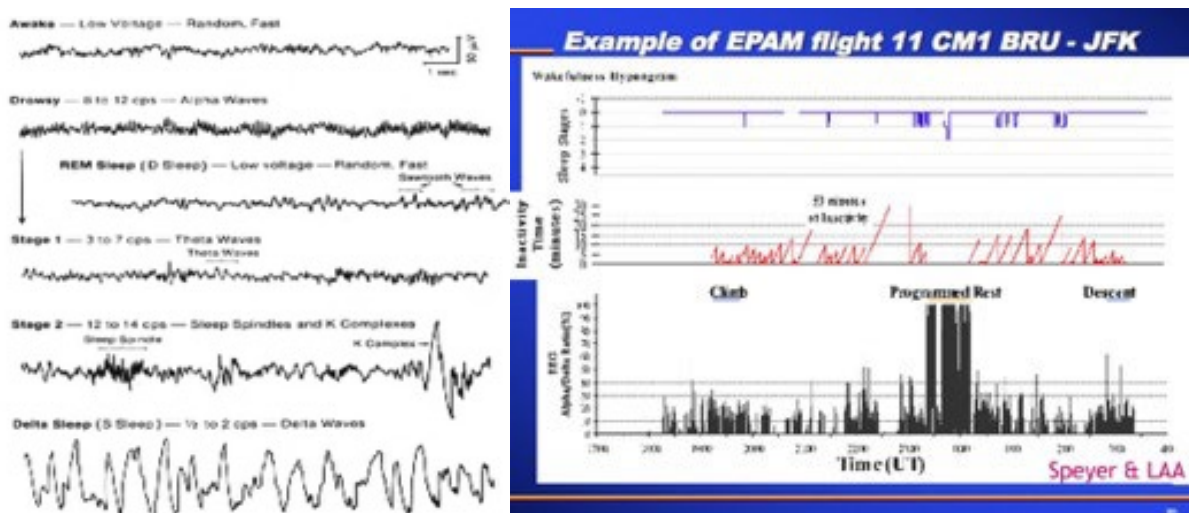
- Hypnogrammes des siestes en **mode « timer » (A)** : stades de sommeil et micro-sommeils,
- Alarmes potentielles en **mode « activité » (B)** se manifestant pour des sélections de périodes de 10, 15, 20 ou 25 minutes, ou après 45 minutes pour sélection de 45' dans le mode « timer »

- Des micro-sommeils pas nécessairement corrélés à des temps d'inactivité augmentés ⁽¹⁾
- La réduction de l'activité accompagnant une augmentation du rapport alpha/delta (voir page suivante) indiquant de la monotonie, pas forcément ni la somnolence ni le sommeil profond.¹

Dans l'exemple de la figure ci-dessus, les alertes à 25 et 20 minutes, respectivement avant et après 07h00. De plus des micro-sommeils sont détectés juste avant 07h00. Des micro-sommeils peuvent également se manifester sans alarmes EPAM comme noté avant 07h30 indiquant que le pilote peut être somnolent tout en restant bien sûr actif. Et après la sieste 4 micro-sommeils apparaissent : pour les deux premiers épisodes une alarme serait survenue pour une séquence d'inactivité de 10 minutes si seulement les pilotes l'avaient sélectionnée à l'EPAM. Pour les deux derniers micro-sommeils 3 alarmes furent notées pour des séquences d'inactivité de 15, 25 et 10 minutes. Pendant le repos programmé le pilote décide d'effectuer une sieste en enclenchant le mode « minuteur » avec un déclenchement de l'alarme après 45 minutes. L'hypnogramme indique des épisodes au stade 3 et 4 après seulement 20 minutes probablement consécutif à la privation de sommeil liée à l'horaire du vol et à la courte escale à New York. Ces facteurs tendent à précipiter l'arrivée du sommeil profond qui met généralement 45 minutes à survenir.

Il apparut ainsi que l'apparition de micro-sommeils n'était pas indubitablement corrélée à une augmentation du temps d'inactivité.²

La réduction de l'activité accompagnerait une augmentation du rapport alpha/delta ce qui pointe vers de la monotonie et pas qu'exclusivement vers la pression du sommeil.

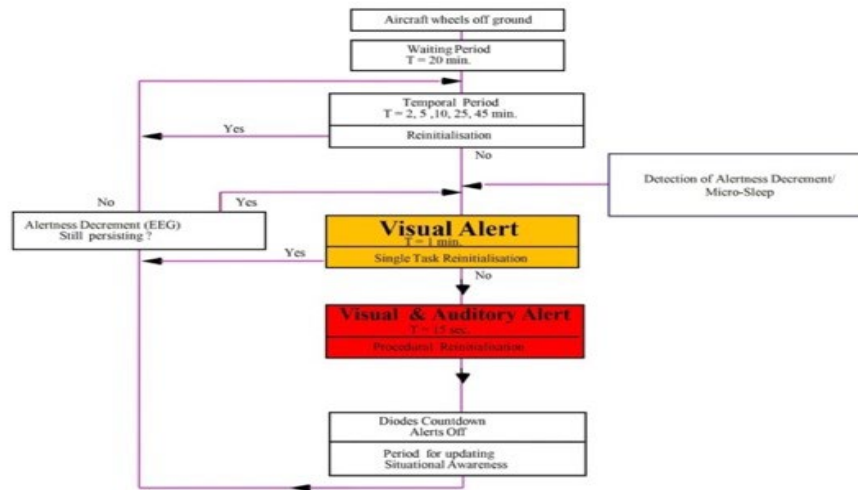


¹ Cabon P, Bourgeois-Bougrine S, Mollard R, Coblentz A, Speyer JJ (2003) Electronic Pilot Activity Monitor : a countermeasure against fatigue on Long-Haul Flights Aviation, Space and Environmental medicine, 74 (6 Part 1) : 679-682.

² Mémoire de DU, JJ Speyer « Spécification, Conception et Mise au Point d'un système de support pour le maintien de l'attention, de l'activité et de la vigilance en vol » Université René Descartes, LAA, 1999

2.5 De l'activité au physiologique avec l'EPAM

Au départ le PGS était basé sur la présomption qu'un pilote en hypovigilance interagirait moins avec ses interfaces. S'il n'y a pas d'activité pendant un certain intervalle de temps une alarme invite le pilote à interagir.



Le principal avantage de cette interface réside dans sa simplicité. Mais il y a quelques désavantages aussi. Le sujet pourrait être pénalisé s'il était pleinement conscient mais resterait cependant non-actif s'il ne touchait à rien. Et s'il était actif mais pas en état d'éveil complet il serait à tort jugé vigilant. N'importe quelle tâche suffirait à opérer la réinitialisation du système même si cela n'aurait rien à faire avec ce que le pilote serait censé effectuer. Ce que pourrait induire un comportement automatique et ainsi le système serait détourné de son but originel. Pensons à la pédale de l'homme mort de la SNCF...

La réduction de la vigilance est certes liée à une réduction des interactions des pilotes avec leurs équipements. Mais les résultats indiquent clairement que la mesure de ces interactions ne suffit pas à la prédiction de cette réduction de vigilance. Et que pour être fiable le système doit impérativement être complété par des mesures physiologiques tels que les mouvements oculaires.

Plusieurs technologies sont actuellement disponibles pour la mesure en temps réel du temps de fermetures des paupières et celles-ci fournissent en fait la meilleure corrélation avec les pertes de vigilance. Certaines de ces technologies ont recours à l'utilisation de sources à infrarouges, d'autres utilisent des techniques de traitement de l'image.

Nous avons donc fait l'évaluation opérationnelle du concept sous-jacent ce qui allait jeter les bases d'un système qui s'appellerait l'**Electronic Pilot Alertness Monitor**. Ceci fût également accompli en coopération entre Airbus et le LAA. La somnolence était mesurée au moyen d'une technique vidéo développée par la société Pharos. Quatre caméras IR étaient placées dans le poste de pilotage (2 par pilote) capables de couvrir un certain volume. Les images vidéo étaient scannées afin de localiser les paupières. Les enregistrements EEG de chaque pilote étaient corrélés avec les mouvements oculaires dont les images étaient traitées en direct lors des séquences avec hypovigilance.

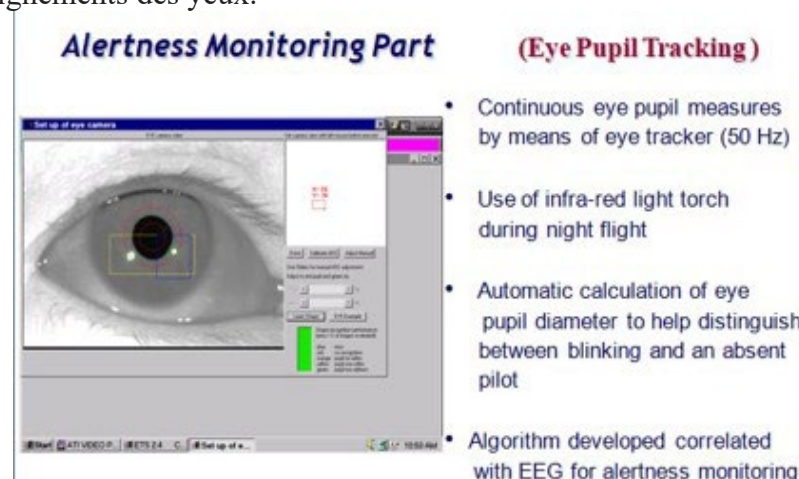
Celles-ci firent l'objet de traitements particuliers tels que :

- Saccades de clignements courts,
- Demi-fermetures de paupières,
- Fermetures complètes,

- Strabisme, témoin de fatigue musculaire,
- Fixité du regard, témoin d'hypovigilance,
- le « perclos » (pourcentage fermetures des yeux).



- Les paupières servaient comme entrée pour un algorithme de détection des clignements. L'algorithme subdivisait l'état du pilote en trois niveaux : vert (bon état d'éveil), orange (état intermédiaire) et rouge (état dégradé de somnolence) et donc en fonction de la fréquence et de la durée des clignements des yeux.



Les études du LAA avec l'algorithme de Pharos (disparue en 2001 comme la Sabena) firent apparaître :

- des corrélations à 85% avec des fermetures oculaires à longue durée, allant de pair avec les ondes thêta, (sommeil léger, ondes de 4 à 7 Hz),
- des corrélations à 70% avec clignement répété et demi-fermetures allant de pair avec des ondes alpha, (hypovigilance, ondes de 8 à 12 Hz),

Il s'avéra en plus que l'état d'éveil du pilote resté en veille active pouvait se rétablir s'il effectuait une procédure de scrutation intensive de ses diverses IHM (suite à une absence en cabine). Procédure qui invitait à un balayage des principaux paramètres avec une vigoureuse activité cognitive et qui figure d'ailleurs au manuel de vol. Ayant évalué ce dispositif lors de quelques vols transatlantiques Sabena pour effectuer un mémoire de Facteurs Humains au LAA de l'Université René Descartes, nous avons ensuite été invités par le groupe HF-Operational Group d'Airbus (**HFOG**) à faire évoluer le concept avec d'autres vols en A340-300 pendant les vols FANS-Airbus, lors de vols d'endurance en A340-600 et avec d'autres vols transatlantiques Sabena jusqu'à sa faillite en 2001.



2.6 *Suppression de la mesure d'activité sur l'EPAM*

La mesure de l'activité humaine doit cependant être remise en question et ce pour plusieurs raisons. Une première parce que les travaux préliminaires avaient déjà indiqué le manque de corrélation entre l'occurrence des micro-sommeils et l'inactivité. Une seconde raison concerne la connexion pour déduire les actions des pilotes. La connexion directe du monde ouvert à l'avionique induirait trop de lourdeurs. L'introduction de nouveaux logiciels dans la multitude d'avions différents imposerait leur re-certification. Omettre l'activité pour se focaliser uniquement sur les paramètres physiologiques transformerait le système en un détecteur de somnolence plutôt qu'en un détecteur d'activité.

Le suivi du regard peut même aider à déterminer à quel point une personne se dédie à sa tâche et s'implique avec cohérence.

Le pilote actif est sensé scruter ses instruments suivant une certaine logique pour maintenir une bonne conscience de la situation. Les fixations des yeux en dehors du périmètre pertinent au vol seraient indicatives d'une certaine absence tandis que les saccades témoigneraient d'une conscience de la situation défaillante. Une séquence de courtes fixations sur certains points du poste de pilotage peut être comprise comme un signe d'une activité cognitive. Nous avons ainsi eu quelques échantillons indiquant un retour d'état d'hypovigilance vers un état vigilant pendant les vols d'expérimentation EPAM. Mais le logiciel (de Pharos) avait indubitablement raté nombres d'instances précieuses car il plantait régulièrement. En fonction du degré de somnolence ou d'une absence cognitive le pilote pouvait même recevoir un signal l'informant de son état déficient voire d'une potentielle incapacité.

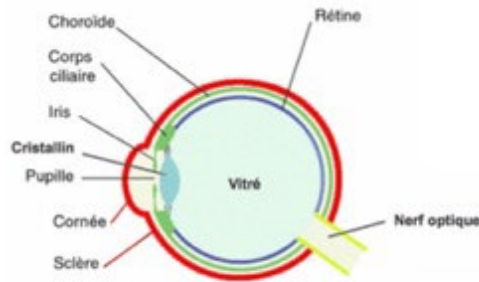
Concluons donc qu'un certain nombre de difficultés pratiques évoquées dans ce qui précède (le monde ouvert vis-à-vis du monde avionique) nous ont amenées à ne pas continuer dans cette direction et à nous concentrer sur la partie physiologique et sur la pupillométrie en particulier.

3. La Pupillométrie : Thèse en ERASMUS à Airbus

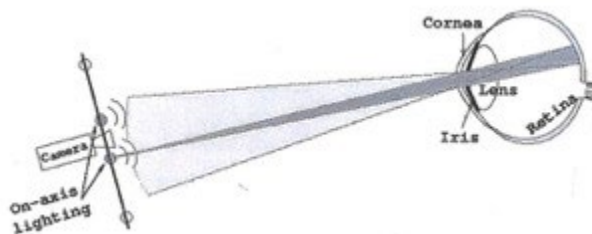
Afin de poursuivre le projet, après les faillites successives de Pharos et de Sabena, Airbus accueille dès 2001 un binôme d'étudiants belges pour leur thèse de Master. Ces derniers effectuaient leur dernière année d'études d'ingénieur dans le cadre d'un échange ERASMUS avec l'ENSICA. Entamé avec le LAA et la Sabena le travail sur la pupillométrie pure allait être expérimenté mais au sol.

3.1 *Techniques de mesures de la pupille*

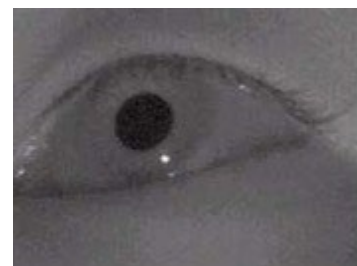
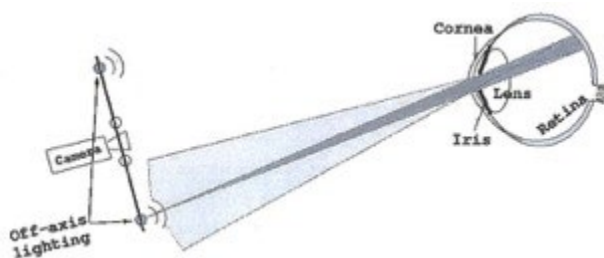
Cette section va d'abord revoir les bases élémentaires pour introduire le sujet. Sujet pour lequel une expérimentation fût envisagée au moyen de plusieurs équipements préexistants. Nous nous reposerons sur les propriétés de rétro-réflexivité de la rétine dont la lumière aux infra-rouges fournit le meilleur reflet. Invisible à l'œil nu, elle ne dérange pas le pilote et ne cause pas un réflexe protecteur. Les rayons infra-rouges à bas contenu énergétique ne sont pas nocifs et n'altèrent pas les cellules de l'œil comme le fait le rayonnement ultraviolet. L'ouverture au centre de l'œil qu'est l'iris contrôle l'accès de la lumière telle que l'ouverture d'une caméra. L'iris est tapissée de petits muscles qui se dilatent ou réduisent la taille de la pupille.



Une source de lumière pointée dans l'axe optique ou à proximité, fera qu'une caméra pourra capter une tache brillante liée à la rétro-réflexivité de la pupille, d'où le nom technique « **Pupille Brillante** ». Les rayons entrants sont en effet réémis par la rétine vers la source de la lumière, en l'occurrence la caméra émettrice. A comparer à l'effet « yeux rouges » de certaines photos faites avec un flash.



Si l'illumination ne s'effectue pas dans l'axe les rayons réfléchis par la rétine n'atteindront pas la caméra et l'on parlera de la technique « **Pupille Noire** ». Notons que le terme de réflexion de la pupille n'est pas approprié car la pupille ne reflète pas vraiment mais plutôt la rétine après réfraction successive par la cornée et le cristallin. La pupille n'intervient que pour l'ouverture de l'iris.



Concernant l'utilisation de la technique dite « **Pupille Noire** » basée sur un décalage de l'illumination co-axiale celle-ci peut être obtenue de différentes façons. La principale étant

d'utiliser des illuminations symétriques de part et d'autre de la caméra, gauche/droite ou dessus/dessous. L'utilisation de sources désaxées est bénéfique à une illumination uniforme du sujet et à une réduction des artefacts d'ombres. Cela augmente également le champ et l'étendue dans laquelle le sujet peut bouger.

Les approches « Bright Pupil » ou « Dark Pupil » ne mènent qu'à des seuils insuffisants pour obtenir des images traitables. Ce qui peut être amélioré grâce à la « **technique des différences** ». En bref, il s'agit d'une méthode basée sur une illumination différenciée utilisant deux sources de lumières différentes générant deux images différant uniquement par la brillance de la pupille. L'une contenant une image de pupille brillante, l'autre montrant une image de pupille foncée. L'intensité des sources lumineuses sera réglée de telle façon que la clarté de l'arrière-plan ne sera pas altérée entre les deux images. Par la suite l'image de la pupille sombre est soustraite de la pupille claire résultant en une image différenciée montrant uniquement la pupille avec pratiquement aucune brillance sur l'arrière-plan. C'est cette technique qui est retenue pour le système EPAM.



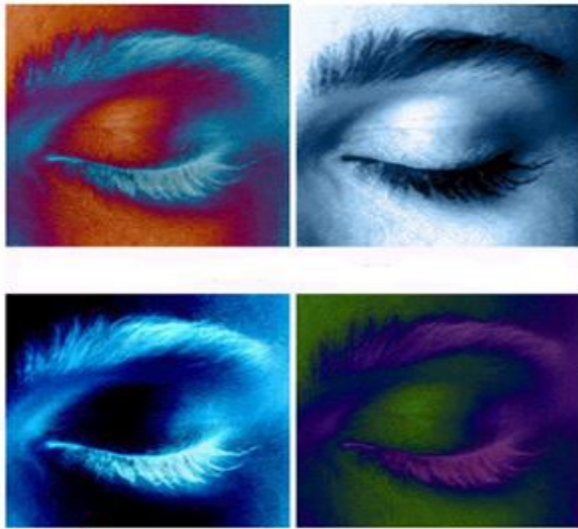
Le tableau suivant revoit ces différentes techniques IR.

Technique	Avantages	Désavantages
Bright Pupil	Meilleure performance quand la distance caméra - sujet augmente	Difficulté avec effet de seuil, Reflets parasites, Mouvements limités de la tête Difficulté de détection PI,
Dark Pupil	Augmentation du champ d'illumination Meilleur fonctionnement à lumière plus intense Détection PI aisée Mouvements plus amples de la tête	Difficulté avec effet de seuil, Moins bon fonctionnement quand la distance caméra- sujet augmente Reflets parasites,
Différence	Arrière plan devient insignifiant Fenêtres entrelacées possibles	Besoin de synchronisation pour les sources lumineuses Détection des contours horizontaux Artéfacts de Mouvements

Les méthodes de détection faciale et oculaires pointent vers le besoin de modèles nécessitant de nombreuses données opérationnelles sur un grand nombre de sujets. Ces techniques de détection se fondent sur des couleurs, des formes, des textures ou des modèles dont certains sont basés sur la couleur de peau pour localiser le visage. Dès que détecté il est assez aisé de localiser les yeux au moyen de techniques de seuil et de morphologie afin de se rapprocher d'un modèle type

détectant les caractéristiques des yeux et mesurant leur forme afin de comparer à un objet type et de suivre leurs clignements.

Alertness Monitoring Part (Pattern Recognition Software)



- Continuous eye recordings by means of video recorders
- Use of infra-red light torch during night flight
- Automatic detection of eye movements, blinks with closings and prolonged eyelid closures
- Algorithm developed correlated with EEG for alertness monitoring

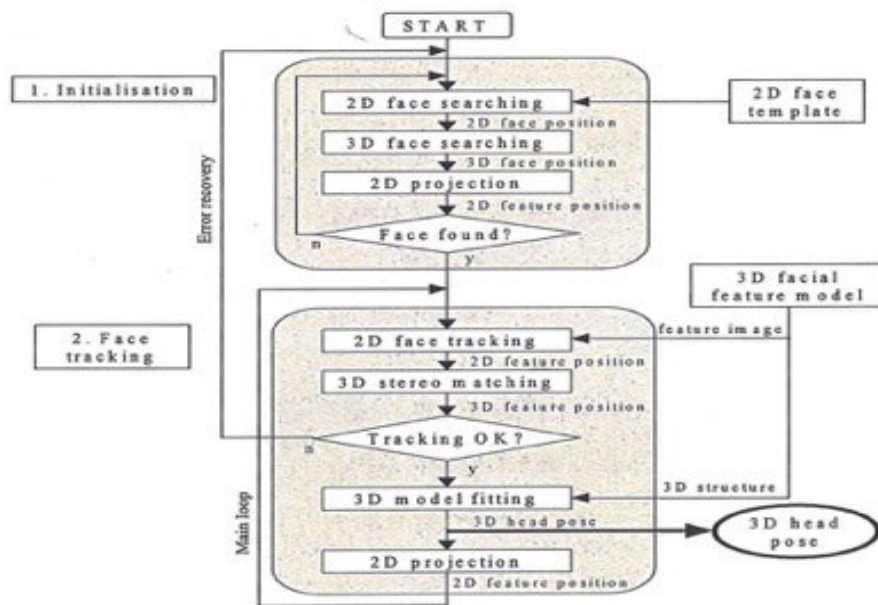
Ce qui est du domaine de la mise en correspondance d'une image originelle avec des images subséquentes (**template matching**).

Une autre approche consiste à avoir recours à des **modèles stéréo 3D**. Pouvoir traiter les mouvements angulaires et de translations de la tête des sujets, constitue un réel défi. Le passage de deux dimensions à trois génère des modèles inévitablement complexes qui requièrent une bonne correspondance à l'initialisation.

L'application faceLAB de la société Seeing Machines se prête à la capture d'images grâce à la combinaison de techniques de détection et de suivi avec des caméras stéréo.

Ce qui s'accomplit en deux étapes :

- La première consiste à capter la face d'une nouvelle image provenant d'une des deux caméras au moyen d'un modèle 2D du visage complet,
- La seconde consiste à suivre ce visage au moyen du modèle 3D d'un visage caractéristique. Dès qu'une position est établie pour laquelle la corrélation entre les deux visages est forte, l'image qui matche est recherchée avec l'autre caméra. Ce qui s'appelle le 3D stéréo Matching au moyen d'un algorithme dédié. Et illustré par le schéma suivant :



Les modèles 3D permettent de fonctionner en plein soleil sans aucune interférence. L'application nocturne demande cependant de petites sources IR pour illuminer les visages des pilotes. Le tableau suivant présenté en vertical revoit les différentes techniques qui sont basées sur des modèles. Dans ce qui précède nous avons traité les modèles Template Matching et 3D Stéréo.

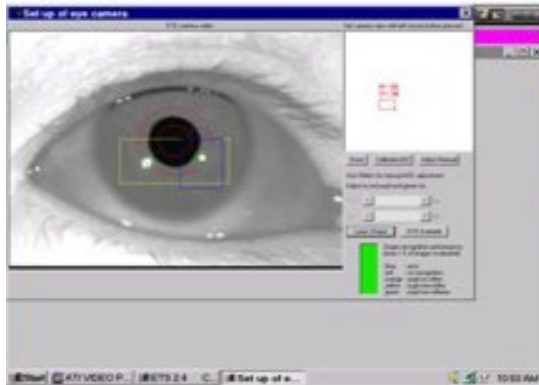
Technique	Avantage	Désavantage
Couleur de Peau	Traitement rapide en temps réel Sous illumination uniforme pas d'influence néfaste des occlusions Capable de déterminer l'absence de pilote Aucun d'impact de l'origine ethnique Adaptation à différentes conditions d'illumination	Sensible à des changements d'environnement de visualisation Besoin d'une caméra couleurs Pas de prise directe des yeux Besoin d'une instruction assistée Non robuste aux occlusions aux mains
Mise en correspondance basique avec des modèles-exemples	Traitement en temps réel	Les modèles sont rigides Vue de face indispensable
PCA	Bonne reconnaissance de forme Pas de besoin d'illumination particulière	Traitement Informatique lourd Besoin de données pour l'instruction Clignements indétectables car forme des yeux change Vue de face indispensable
Modèles variables	Peut s'accomoder de modèles variables	Traitement Informatique lourd Traitement en temps réel difficile
Double Etat	Détection des clignements	Traitement Informatique lourd Traitement en temps réel difficile Vue de face indispensable
Filtre du masque de contours	Détection des clignements	Traitement Informatique lourd Pas de mouvements en profondeur permis Vue de face indispensable
3D Stéréo	Information 3D disponible Peut déterminer absence de pilote	Besoin de deux caméras Modèles rigides Algorithmes complexes et onéreux en temps

Il apparait donc que plusieurs pistes existent mais qu'il est avant tout nécessaire de préciser les précautions à prendre :

Ce qui distingue un bon système vidéo de suivi d'un autre est sa capacité à trouver les yeux sans les perdre ensuite. C'est ce qu'on appelle le suivi ou le « tracking ».

Alertness Monitoring Part

(Eye Pupil Tracking)

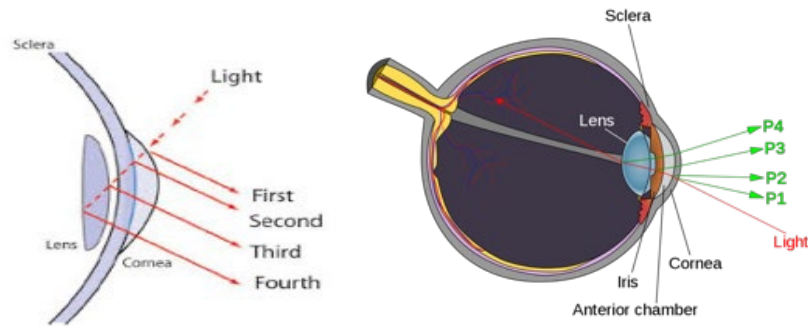


- Continuous eye pupil measures by means of eye tracker (50 Hz)
- Use of infra-red light torch during night flight
- Automatic calculation of eye pupil diameter to help distinguish between blinking and an absent pilot
- Algorithm developed correlated with EEG for alertness monitoring

Comme déjà mentionné la localisation initiale doit tout d'abord être effectuée au moyen des méthodes qui viennent d'être décrites. Nous supposons que le taux de cadrage de ces images sera suffisamment élevé pour n'avoir que des petits mouvements autour de la position du visage à suivre. Cette approche ne suffit cependant pas car les mouvements de la tête sont aléatoires. Sans aller dans les détails mathématiques deux méthodes avancées de suivi doivent s'adjoindre, l'une étant une prédiction du mouvement, l'autre un filtre de Kalman.

- Il y a toute une série de techniques pour effectuer le suivi du regard en utilisant la lumière réfléchie par l'œil.
 - **Le Suivi du Limbus** : le limbus étant la frontière entre la sclère blanche et l'iris foncée, aisé à détecter et à suivre avec de la lumière naturelle,
 - **Le Suivi de la Pupille** : au lieu de la frontière entre le sclère et l'iris, l'on pourrait suivre celle entre la pupille et l'iris. En incluant le suivi de mouvements verticaux ainsi qu'une meilleure résolution puisque le bord de la pupille est plus fin que le limbus. Le désavantage étant que le contraste est plutôt faible rendant les bords moins détectables.
 - **La Reflet Pupillaire Central de la Cornée dit (Pupil Center Corneal Reflection) PCCR** qui comporte la variation de distance entre le PI et le centre de la pupille quand l'œil est suivi verticalement et horizontalement. Sans détailler, mathématiquement le suivi du regard est obtenu en effectuant la cartographie des coordonnées de l'œil au moyen de ce suivi. La difficulté résidant en une calibration laborieuse.
 - L'image de l'œil peut également être considérée comme un **réseau neuronal artificiel**. Une caméra grand angle est déployée de telle façon que la tête entière soit captée. Une source de lumière IR est placée en face du sujet et le système cherche le point de reflet. Après l'avoir déterminé il extrait la partie de l'image vidéo qui représente l'œil. La partie recadrée de l'image est sujette à un réseau neuronal qui en fournit les coordonnées. Sans aller dans les développements mathématiques l'ANN (Artificial Neural Network) permet une plus grande mobilité de la tête mais va de pair avec une calibration longue et laborieuse et néanmoins de précision limitée.
 - Le **suivi des images Purkinje** de la cornée et du cristallin utilisée pour calculer le point de regard (gaze point). Une partie seulement de la lumière projetée sur l'œil atteindra la

rétilne. Une autre est réfléchiée en diverses parties, les refléts de la pupille que sont les refléts Purkinje, refléts miroir propre à l'accommodation de l'œil.



3.2 Evaluation des Systèmes Vidéo sur le marché

L'objectif avec l'Université Libre de Bruxelles était de spécifier un système aérien basé uniquement sur la pupillométrie pour mesurer la vigilance. Ceci fut accompli en évaluant plusieurs dispositifs de pupillométrie.³

Trois sociétés nous avaient légué en prêt des systèmes vidéo préexistants destinés à suivre les pupilles :

- SensoMotoric Instruments,
- Seeing Machines,
- Applied Science Laboratories,

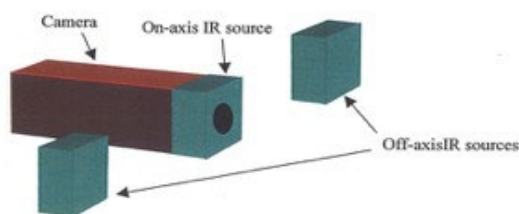
Une évaluation fût effectuée au moyen de simulations de situations concernant :

- L'atteinte : liberté de mouvements, mouvements brusques, rotations,
- L'illumination : très variable, soleil de face, ambiance nocturne,
- La reprise : départ du poste de pilotage, perte de suivi, changement de personne au siège,
- La détection de clignements des yeux : conditions diverses,

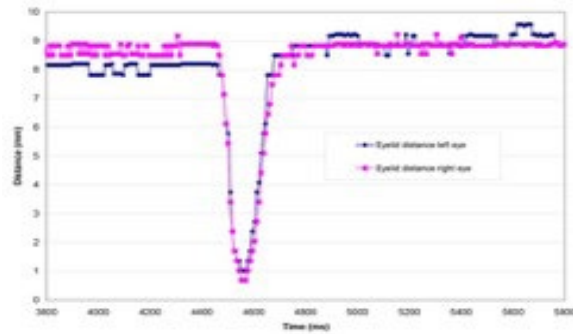
Une attention toute particulière fût consacrée au clignement des yeux, à la durée de ces clignements, à la vitesse de fermeture des yeux. La majorité des systèmes est prévue pour le suivi du regard.

3.2.1 Sensomotoric Instruments version "Wake-Up"

Il s'agit d'un système expérimental destiné à surveiller le niveau d'éveil des chauffeurs de route. Le système consiste en une caméra qui surveille la tête humaine, 3 sources de lumière à infrarouges et un PC.



³ « Specification and Evaluation of a System to Maintain Pilot Alertness in Flight », S. Denuit & L. Caboor, promoted by Prof. Ir. JJ Speyer, VUB with ENSICA, Sept. 2002

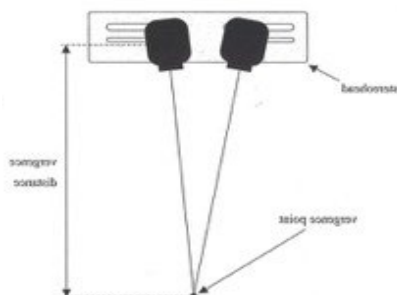


- Technique différentielle,
- Détection des bords,
- Mono-caméra,
- Mesure de la distance entre les paupières,
- Image Large,
- Fréquence de 120 Hz,
- Suivi basé sur filtre de Kalman,

Le clignement des yeux est indirectement disponible par les distances entre les paupières. D'autres paramètres disponibles étant le diamètre de la pupille, la position de la pupille et les périmètres de pupille. L'avantage principal de cette technique est sa simplicité. Peu de fausses détections de pupilles. Le taux d'échantillonnage élevé rend la détection des clignements oculaires précise et fiable. Le désavantage est lié à l'utilisation des rayons infra-rouges. Quand un sujet porte des lunettes (de vue ou solaires) le reflet de celles-ci sur les pupilles amène des difficultés. Le mouvement de la tête doit rester dans certaines limites, en particulier pour des rotations de plus de 40 degrés. La meilleure disposition est d'avoir la tête bien de face pour avoir l'image de la pupille la mieux perceptible. L'absence de calibration est un bien, bien que le système ait recours à des données statistiques au lieu de valeurs calculées lors de changements de sujets.

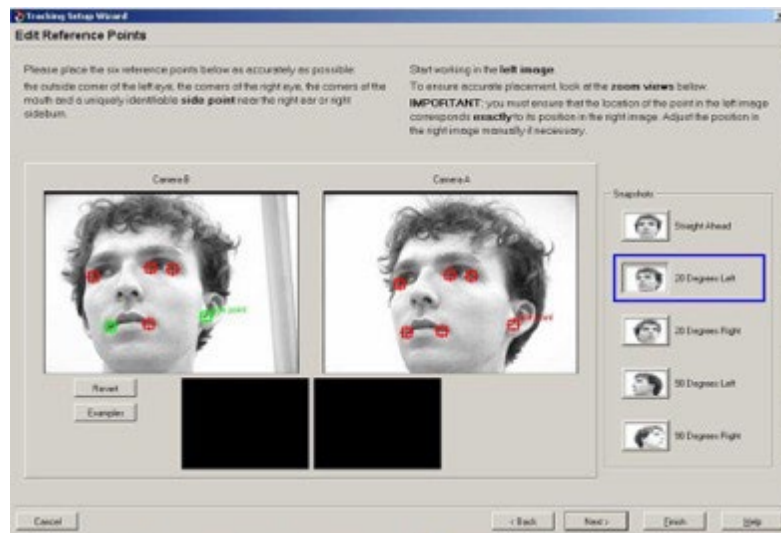
3.2.2 Seeing Machines de FaceLab

Ce système consiste en 2 caméras stéréo avec 2 sources à infra-rouges pour la vision nocturne et un PC. L'utilisation de 2 caméras est nécessaire afin de pouvoir calculer la position précise de l'information de position tri-dimensionnelle de la tête. Les caméras doivent être positionnées de telle façon que les axes des caméras se croisent à la distance la plus probable de la tête du sujet. Ce point est associé à la distance de vergence.

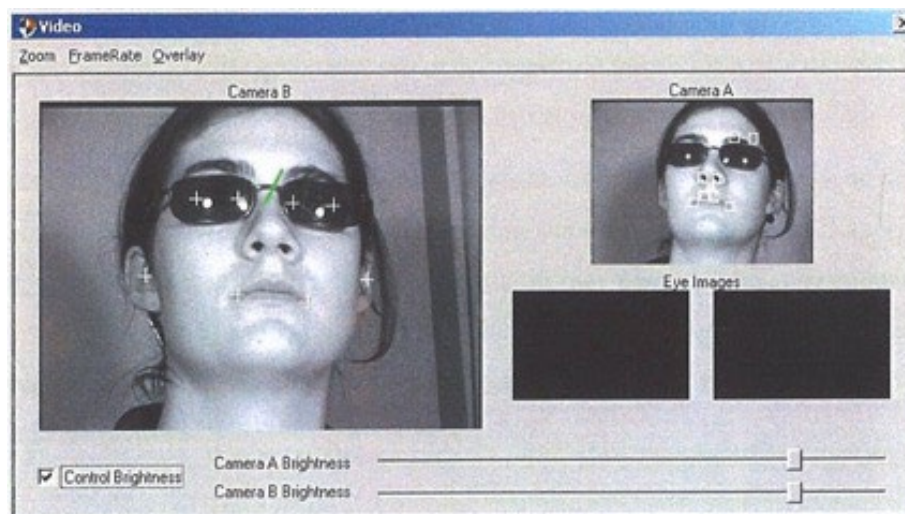


Ces 2 sources sont uniquement utilisées pendant la nuit pour illuminer les sujets situés en face. FaceLab n'utilise pas les reflets IR mais se sert exclusivement de modèles 3D et de techniques de suivi d'images faciales. D'où le besoin d'initialisations avant de démarrer le suivi.

L'approche de FaceLAB consiste à mémoriser le visage d'un sujet et à établir comment les différentes facettes faciales sont corrélées. Un modèle du sujet en question est toujours réalisé en prenant des clichés instantanés. Un modèle contient plusieurs points de références, images caractéristiques et informations sur le regard. Les points de référence concernent les coins de la bouche, des yeux et un point latéral (l'oreille). Le système a beau tenter de déterminer ces points automatiquement, un opérateur devra cependant intervenir manuellement à maintes reprises. Le sujet doit fixer son regard successivement sur les 2 caméras en une courte procédure de calibration afin de fixer les points du regard. Les changements du champ lumineux imposeront cependant de créer régulièrement un nouveau modèle.



Les produits de SM FaceLAB sont divers : la pose 3D de la tête, la détection des clignements, la fréquence des clignements, la détection de saccades, la position de l'œil, la position de la pupille, la direction du regard. Le port de lunettes solaires est soutenu par FaceLAB de façon telle que la position de la tête est toujours calculée même si les informations oculaires ne sont plus disponibles (clignements, saccades). Les points de référence des yeux restent néanmoins disponibles.



FaceLAB est surtout un système de suivi de la position de la tête et de sa posture, capable de détecter la présence du pilote. Il n'y a pas besoin d'illumination IR. Ainsi les reflets parasites ne posent pas de problème, ni la lumière du soleil. Cette approche peut être renforcée pour les grands mouvements de rotation ce qui dépend de la qualité de la calibration qui doit être

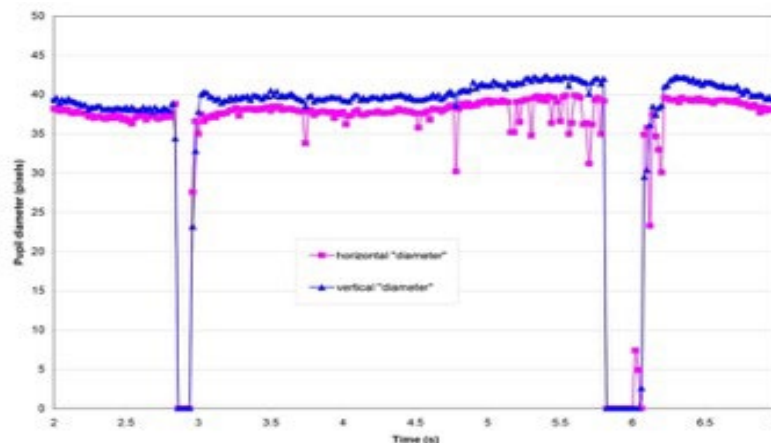
méticuleuse pour être fiable. Les grands changements d'illumination imposent cependant une nouvelle modélisation ce qui est un vrai désavantage.

3.2.3 Applied Science Laboratories

ASL créa le ETS-PC comme système de suivi du regard destiné à l'industrie automobile. Le système est voué à mesurer le diamètre de la pupille et le point du regard sur une scène stationnaire. Muni d'un logiciel dédié et d'une unité d'acquisition avec caméra oculaire pour zoomer, d'un système de suivi à miroirs et de 2 sources de lumière à infrarouges (IR). Le module optique qui est le cœur du système consiste en 2 parties : le capteur de la caméra oculaire avec sa lentille et le miroir de suivi muni de 2 petits moteurs électriques. La caméra oculaire est dotée d'un filtre à IR, coupant toutes longueurs d'onde autres que celle émanant des sources IR dédiées. La fonction autofocus de la caméra oculaire et les sources de lumière sont positionnées de telle façon que le mouvement des miroirs de suivi en azimut ou en site permettront de suivre la position de la tête du sujet.



Les 2 sources IR sont placées de façon désaxée pour induire l'effet de pupille sombre. Le système a recours à la technique PCCR afin de déterminer la direction du regard. Les paramètres fournis sont le diamètre de la pupille, les positions des reflets de la pupille et de la cornée et les temps de fixations. Les clignements des yeux peuvent être dérivés à partir des diamètres de pupilles. Le système ETS-PC ne saisit pas l'image du visage complet mais prend un gros plan de l'œil droit uniquement. Le système requiert une calibration laborieuse pour saisir les différentes caractéristiques des yeux du sujet. Pendant la calibration certaines limites propres aux reflets de la cornée et de la pupille sont ainsi calculées afin d'en déterminer les limites de validité. Ceci pour exfiltrer les artefacts ce qui en fait un des meilleurs systèmes de suivi sur le marché. La technique de la pupille sombre requiert une image de la région de l'œil uniquement. En conséquence sa résolution en sera d'autant plus grande avec une caméra grand angle. La détection des clignements des yeux au moyen de l'occlusion de la pupille est dès lors très précise.



Elle n'est cependant pas capable de détecter des occlusions partielles de la pupille et amène le système à arrêter tout suivi dès que celle-ci est partiellement couverte. Comme l'image est très petite la principale difficulté réside en la capacité à suivre des mouvements rapides de la tête. Le système à miroirs est très sensible aux moindres mouvements de la tête. Le port de lunettes de vue ou solaires porte préjudice au suivi du système avec l'apparition de reflets qui amène à perdre le suivi. Même si la calibration était effectuée sans lunettes, leur port ne cause pas de problèmes. Des conditions d'illumination ambiante n'amènent pas à perdre le fil du suivi. Comme la caméra est sensible aux IR le système n'est pas dérangé par d'autres sources lumineuses que les LED à infrarouges (IR).

3.2.4 *Pharos*

Le système Pharos fût testé par Airbus avec le LAA en vol commercial chez Sabena pendant les années 1999-2001. Il consistait en 2 caméras par pilote (d'abord une seule) et 2 petites sources à IR (1 principale et 1 auxiliaire). Les IR étaient uniquement destinés à illuminer la face de chaque pilote et permettait ainsi de fonctionner la nuit. Les enregistrements vidéo effectués par ces caméras étaient minutieusement analysés en temps réel au moyen d'un programme de reconnaissance des formes (pattern recognition). Ce programme tentait de reconnaître les paupières supérieures et inférieures et d'ainsi déduire les degrés d'ouverture des yeux de chaque pilote. La caméra prenait l'image côté face devant. Le système mis en place dans les postes de pilotage d'Airbus A340/A330 réunissant la mesure de l'hypovigilance liée à la pression du sommeil et à la mesure d'activité.

L'algorithme de reconnaissance des formes de Pharos ne put cependant détecter les paupières pour un nombre considérable de cas. Cependant la mesure des EEG permet de déclencher des alarmes quand ces mesures indiquaient des signes d'hypovigilance en temps réel ce qui permit d'activer les systèmes EPAM avec les séquences d'alarmes indiquées à la section 2.5.

Vinrent ensuite les faillites successives de Pharos et Sabena qui sonnèrent le glas prématurément du projet.



3.2.5 LC Technologies

LC Technologies développa le « Eyegaze Development System » pour des recherches Facteurs Humains. Le système fut créé pour déterminer ce qu'un opérateur humain regarde sur un écran d'ordinateur. La direction du regard est déterminée au moyen de la technique PCCR. Une caméra vidéo située en dessous de l'ordinateur observe l'œil du sujet de façon non-intrusive. Une petite source lumineuse à IR est située au centre de la lentille de la caméra pour éclairer l'œil, provoquant le reflet de la cornée et l'effet de la pupille brillante. LC Technologies utilise en effet cette technique pour obtenir un cadrage clair de l'ensemble pupille-iris sur base de techniques de traitement de l'image basée sur la détection des bords. Au moyen de ces algorithmes, le centre de la pupille et de la réflexion de la cornée sont déterminés utilisant également leurs positions relatives pour que le point de regard de la personne observée puisse être obtenu. De plus le système est capable d'identifier les saccades et les fixations. Cependant le champ des mouvements est très limité et ainsi la distance caméra-sujet doit rester à peu près constante, peu propice à une application aéroportée. La mesure de la fatigue et de la somnolence ou de la vigilance et de l'attention n'est guère possible car les clignements des yeux ne sont pas disponibles. Les dimensions des différents composants sont modestes et le système est surtout destiné à l'assistance par ordinateur pour les personnes moins valides.



3.2.6 Techno-Works

Ce système utilise une caméra et une source IR pour éclairer la pupille. Le suivi du regard est effectué au moyen de la technique PCCR. Un algorithme de traitement de l'image détermine les positions centrales de la pupille et de la réflexion de cornée. Le système est très sensible aux conditions lumineuses. Idéalement l'œil n'est pas du tout couvert et la tête doit rester en position figée. Les paramètres de sortie sont d'une part la position de l'œil cible en coordonnées et de l'autre l'information sur le clignement oculaire. Cette application n'est pas du tout adaptée à un poste de pilotage. Les mouvements de la tête ne pourraient de toute façon être décelés. Le système livre des informations de clignements mais la fréquence de détection de 60 Hz est trop conservative pour pouvoir correctement détecter ceux-ci.

3.2.7 EyeTech Detection Systems Inc

Cette société a développé le Eye Science Gaze Tracking System. Celui-ci dispose d'un Quick Glance Eyetracker dédié spécialement aux handicapés. L'appareil est monté sur l'écran d'un ordinateur pour déterminer ce qu'une personne regarde. Par conséquent seuls de petits mouvements sont permis. Le système a recours à la technique PCCR avec une illumination IR. La source IR est positionnée en travers de l'axe ce qui cause l'effet pupille sombre évoqué plus haut. La technique de détection des bords est utilisée pour mettre la pupille dans l'image. Comme la précédente cette application n'est pas du tout adaptée à un poste de pilotage.

3.3 Synthèse sur ces systèmes de détection

Une synthèse générale clôt cette revue pour mettre en tableau les principales caractéristiques de ces systèmes.

Synthèse Générale	SensoMotoric Instruments	Seeing Machines	Applied Science Laboratories	LC Technologies	Techno-Works	Pharos	Eyeteck Digital Systems
Technique PCCR	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Reconnaissance Faciale	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
Disponibilité du Diamètre de Pupille	Oui	Oui	Oui	Oui	?	Non	Non
PERCLOS	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Possibilité de Larges Mouvements de la Tête	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non
Port de Lunettes Supporté	Oui (*)	Oui	Oui (*)	Oui (*)	Oui (*)	Non	Pas spécifié
Lunettes Solaires Supportées	Oui (*)	Non	Oui (*)	Pas spécifié	Pas spécifié	Non	Pas spécifié
Forte Lumière Solaire supportée	Non	Oui	Non	Non	Pas spécifié	Non	Pas spécifié
(*) sous certaines conditions	Les autres systèmes sur le marché ne sont pas mentionnés car leur stratégie et leur orientation commerciale ne sont pas adaptées au besoin						
Sans reflet sur les lunettes	Les systèmes qui ne fournissent que la direction du regard sans permettre les mouvements de la tête et qui ne fournissent pas d'information sur le						
(**) besoin d'améliorations	clignement des yeux sont des exemples de systèmes non retenus dans ce sommaire.						

Retenons quelques retours d'expérience de ces diverses évaluations :

- l'algorithme « perclos » indique une grande corrélation entre la somnolence et la réductions des performances des pilotes ; il n'existe cependant pas de technique idéale capable de traiter tous les cas,
- les techniques basées sur le « suivi de la pupille » sont sujettes à leur lot de limitations (mouvements de la tête, perte d'acquisition, calibration personnelle etc...),

Retenons aussi quelques suggestions :

- L'utilisation coordonnée et conjointe de deux caméras,
- Soit plutôt l'utilisation d'une seule caméra à grand angle basée sur la technique de différence IR pour détecter les pupilles (et évitant les fausses détections et les artefacts) et un algorithme basé sur la technique de détection des bords (détection des paupières et de leurs inter-distances (permettant une calibration aisée).

Les organisations syndicales furent tenues au courant lors de nos symposia Facteurs Humains (du SNPL à l'IFALPA) et nous ont dit qu'au point où ils en étaient (suivi de tous vols au moyen des FDM comme requis par l'OACI) ils n'étaient pas franchement opposés à l'EPAM mais à condition que:

- les survenues de siestes, de baisses de vigilance ou de baisses d'activités resteraient confidentielles, conformes à une culture de sécurité non culpabilisante),
- le système ne serait pas destiné à réduire les effectifs et nombre de membres d'équipage requis pour effectuer des vols long-courrier,

L'EPAM ne fut finalement pas poursuivi malgré les recommandations du HFOG car le Support ne jugeait pas le sujet d'importance stratégique pour son service. Et ce malgré la politique de délégation progressive des activités HF vers les divers départements opérationnels, directive

émanant de l'Engineering. A terme l'activité fût reprise par le BE et il semble (source EASA) qu'elle reçoive désormais l'attention des équipementiers tel que Thales et Honeywell. Déjà en 1999 Don Bateman de Honeywell nous encourageait à poursuivre ce projet à la suite d'une présentation à un de ses symposiums. Ainsi la thèse MS en Erasmus VUB à Airbus prit le relais en 2002 et reçut le « Prix d'innovation » de la société belge **Barco** sans pour autant avoir été considérée par après.

4. Spécification d'un Système EPAM Futur

Au vu de ce qui précède nous formulons avec le binôme les exigences fonctionnelles, de mesures in situ, d'algorithmes, de performance, d'installation, de matériel, de logiciel, de sécurité, de durée de vie et de développement pour aboutir à un système de détection.

4.1 Exigences fonctionnelles

Le système doit pouvoir mesurer les paramètres oculaires puisque ceux-ci se sont avérés les mieux adaptés au suivi de l'état de veille d'une personne.

- Ce choix est motivé par le caractère non-intrusif et par le fait qu'un système vidéo doit permettre un certain degré de liberté de mouvement aux pilotes.
- Des algorithmes tels que « Perclos » devraient analyser les paramètres oculaires mesurés. Et les résultats correspondants doivent servir d'entrée pour la logique du module de traitement qui gère les alarmes.
- Ces alertes constituent un troisième besoin fonctionnel. Basées sur les algorithmes de somnolence les alertes doivent tenir informés le ou les pilotes pour les avertir d'un éventuel état déficient.
- Le système doit pouvoir être déconnecté et mis en mode « minuteur » quand un tour de vigilance passive est entamé lors d'une prise de sieste.
- Ainsi trois modes de fonctionnement prévalent :
 - o EPAM,
 - o TIMER et
 - o Déconnecté,

4.2 Exigences de mesures

Les exigences en matière de mesures spécifient ce qu'il y a lieu de mesurer et de quelle manière effectuer celles-ci. Ceci concerne les paramètres à mesurer, la vitesse à laquelle ceci doit s'effectuer ainsi que l'impact que ces mesures peuvent avoir sur l'équipage tels que causés par les procédures de calibration qui ne peuvent pas être trop lourdes.

4.2.1 Exigences en matière de mesures

La sensibilité des corrélations aux changements des niveaux de somnolence a été évoquée dans ce qui précède concernant les rythmes des ondes EEG. Le mérite des vols en conditions opérationnelles est d'en avoir reconnu les différents cas de figure confirmant la bonne adéquation des paramètres oculaires. Ainsi le futur système doit :

- Fournir la fréquence de clignement des paupières et leurs durées respectives,
- Au cas où ces mesures oculaires n'étaient pas possibles la position de la tête et la posture générale (affalé, sur le côté, droit etc...) pourraient être utiles,
- Toutes ces mesures doivent s'effectuer en temps réel afin de permettre des réactions rapides,

4.2.2 Fréquence d'échantillonnage

La vitesse à laquelle ces mesures doivent être effectuées est d'importance cruciale. La vitesse dépend de la technique déployée. L'échantillonnage doit être suffisant pour détecter les clignements des yeux quel que soit leur vitesse de fermeture. La durée de fermeture est définie comme le temps entre le début de la fermeture de la paupière supérieure jusqu'à sa réouverture ultérieure. Trois classes de fermetures émergent :

- Clignements rapides (normaux) : 120 à 250 ms,
- Clignements intermédiaires : 250 à 500 ms,
- Clignements lents : > 500 ms,

Il y a deux méthodes pour détecter des clignements :

- Les mesures de diamètres de pupilles
- Les mesures de la distance entre les paupières.

Ce choix impactera de plus le taux d'échantillonnage.

Sans aller dans les détails, les calculs indiquent des valeurs minimales pour le taux d'échantillonnage afin de pouvoir distinguer les clignements de façon fiable.

Taux d'échantillonnage	Diamètre de Pupille	Distance entre paupières
50 Hz	200 Hz	100 Hz
60 Hz	240 Hz	120 Hz

4.2.3 Calibration et charge de travail

Pour toutes les méthodes décrites la calibration représente le plus grand souci. Comme évoqué précédemment la calibration du système rend les mesures plus fiables et moins dépendantes des sujets.

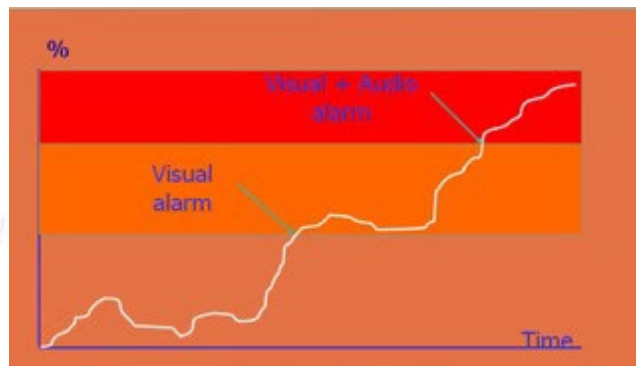
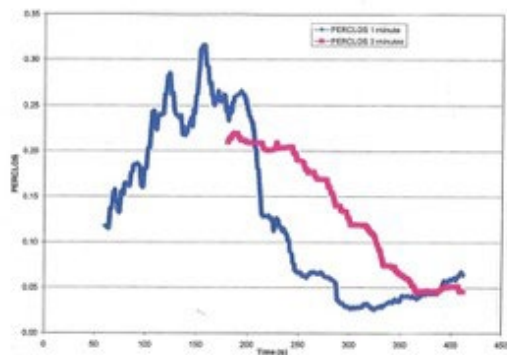
Mais il faut bien s'imaginer que les pilotes n'accepteront pas des calibrations dont la durée excéderait plusieurs minutes avant le vol. Un compromis est donc indispensable : une calibration courte et efficace pour garantir une bonne performance du système, maintenant une probabilité élevée d'avoir des calibrations correctes.

Avant le décollage les pilotes alignent leurs sièges de telle façon que leurs yeux soient toujours dans le même plan de référence quelle que soit leur taille corporelle. Ce point est idéal pour une calibration rapide à ce stade de préparation au vol. En utilisant ce point précis nous obtenons ainsi le volume de couverture qui donnent aux pilotes une plage de mouvements possibles au poste. Le principe des mesures ne devrait pas non plus induire une charge de travail excessive. Le système doit être totalement transparent aux pilotes et ne pas requérir d'intervention de tiers. La seule interaction avec le système consisterait en une courte calibration. Une seule calibration devrait suffire, une recalibration en vol étant exclue. Ce qui n'exclut pas la possibilité de pouvoir tout arrêter.

4.3 Exigences en matière d'algorithmes

Le traitement des données est au moins aussi important que leur obtention. Une pléthore d'algorithmes existent avec leurs divers avantages et désavantages. En général un nouvel algorithme est développé pour chaque application. Le LAA avait développé un algorithme basé sur la fermeture et la durée de fermeture des paupières. Seuls étaient retenus les clignements de plus de 500 ms, les clignements courts n'ayant pas d'influence. Cet algorithme fût développé pour faire une première ébauche de la performance du système et sans être la solution définitive.

Un algorithme existait qui promettait de bons résultats : la mesure PERCLOS qui mesure la durée totale des fermetures des paupières (> 80%) endéans un certain intervalle de temps à définir. Le choix de cet intervalle dépend de l'application. En ayant recours à un intervalle d'une minute le graphique PERCLOS va comporter de nombreux pics et creux. Le croquis suivant montre le tracé PERCLOS plus atténué pour un test à 3 minutes pour lequel le temps de rebond est plus lent pour un sujet qui récupère de son endormissement. Ceci nous oblige à un compromis adéquat entre alarmes et rebonds rapides.



4.4 Exigences de performance du système

Le système doit être capable de bien fonctionner dans une variété de situations. Il doit être capable d'opérer à l'intérieur d'un certain volume à l'intérieur duquel le pilote pourrait s'assoupir ou se révéler déficient.

4.4.1 Volume de couverture

Notons qu'il faut bien noter la différence entre le comportement d'un pilote d'avion et celui d'un conducteur automobile. Ce dernier déploie des mouvements bien plus limités et regarde la route droit devant lui avec de temps en temps des regards latéraux et dans le rétroviseur qui diffèrent tout au plus de la position tête haute. Quand il prend la route le chauffeur d'une voiture reste dans un volume assez restreint.

Les pilotes d'avion en revanche bougent amplement. Pendant la croisière ils bougent moins mais ceci n'exclut pas la possibilité de reculer le dos de leur siège ou de se mettre de côté lors de phases plutôt orientées sur le suivi et le monitoring. Il y a lieu de prescrire ces positions sans retenir des cas de positions plus extrêmes comme l'atteinte du panneau supérieur ou des positions où il ne risque certainement pas de s'assoupir. Ce qui implique des positions normales ou relâchées. De plus le système doit être capable de couvrir le champ entier des mouvements des sièges pilotes. La mesure du volume de couverture fut effectuée au simulateur en positionnant les sièges dans leurs positions les plus extrêmes et en imitant les positions les plus plausibles en cas de somnolences. Toutes furent rapportées par rapport au point de référence du poste de pilotage.

Le système doit être capable de continuer son travail de suivi à l'intérieur du volume de couverture pour autant qu'au moins un œil y soit visible. De plus si le pilote s'en éloignait le système doit

pouvoir reprendre dès lors qu'il y retournerait. Ceci devrait se faire sans aucune intervention c'est-à-dire automatiquement dès le retour dans ce volume.

4.4.2 Conditions d'environnement

Le système est supposé fonctionner dans une gamme élargie de situations allant des conditions de luminosité à celles ayant trait à des origines ethniques différentes.

Les conditions de luminosité peuvent rapidement changer dans un poste de pilotage, variant de l'intense lumière de face notamment au lever du jour au coucher du soleil, voire de nuit sans aucune lumière de l'extérieur. Il y a également des situations où une partie du visage du pilote est exposée à la lumière d'un soleil intense tandis que l'autre partie est obscurcie et dans l'ombre. Ces conditions ne pourraient causer de dysfonctionnements du système. Le système doit permettre le port de lunettes de vue et de lunettes solaires.

4.5 Exigences d'Installation

Il s'agira ici d'identifier des espaces d'implantation au poste avec tout ce que cela comporte de restrictions matérielles (taille, interface IHM, interchangeabilité).

4.5.1 Espace disponible

L'espace disponible au sein d'un poste de pilotage est très limité. L'implantation d'une ou deux caméras n'étant pas prévue au départ, la taille de celles-ci doit être limitée.

Et surtout ne pas gêner ou obstruer la vue par le pare-brise de la piste ou en vol ni l'atteinte d'aucun panneau, équipement ou levier.

Aussi ;

- ne peut-il pas restreindre les mouvements au sein du volume de couverture,
- ne doit-il pas limiter l'atteinte de quoi que ce soit,
- ne doit-il pas limiter les mouvements du pilote pour rester dans l'enveloppe dévolue à la capture des yeux en vol normal.

Les appareils déjà en service devraient pouvoir être pourvus. En conclusion, les dimensions suivantes basées sur l'espace disponible devraient aider à choisir les caméras disponibles sur le marché ou à concevoir.

- Largeur : < 5 cm
- Profondeur : < 4 cm
- Hauteur : < 5 cm

4.5.2 Agencement de l'interface

L'agencement de l'interface doit se conformer à la philosophie générale de la conception du poste de pilotage. L'interface doit procurer la possibilité à l'équipage de déconnecter le système intégralement et à sa guise. Il doit permettre à l'équipage de sélectionner une certaine sensibilité - basse ou élevée – afin de réguler l'apparition rapide ou plus lente d'alertes à la somnolence, augurant d'hypovigilances. Le pilote ne devrait pas avoir à introduire de temps lui-même l'activité des pilotes n'étant plus suivie par les data bus.

4.5.3 Interchangeabilité

Souhaitable entre avions différents et au sein du même appareil.

4.6 Exigences matérielles

4.6.1 Caméra(s)

Mis à part les spécifications concernant la taille des caméras, celles-ci doivent être digitales. En fonction de la technique utilisée, elles devraient disposer d'une focale-lentille zoom. Et permettre une netteté de l'image depuis la distance minimale entre la caméra et le volume de couverture. Les caméras doivent être certifiées concernant les aspects bruit, fumée, radiation. Disposer d'une bonne capacité aux infrarouges pour permettre les opérations de nuit. Sans besoin de caméras spécifiques aux IR un filtre de lumière IR est requis. La vitesse d'obturation doit être adaptée à la fréquence d'échantillonnage. Cette vitesse d'obturation indique le temps que l'image est exposée. Les caméras disponibles ont des vitesses qui vont généralement de 30 à 40 ms. Une vitesse de 5 à 10 ms serait nécessaire et des vitesses de 500 ns ou moins sont disponibles sur le marché. Le taux de lecture de la caméra est le taux auquel les données sont lues avec la puce du capteur. Et qui dépendent des paramètres de l'agrippement des images ainsi que de la caméra. Le taux de lecture de la caméra est exprimé en pixels/ seconde. Plus le taux de lecture de la caméra est élevé, plus le temps nécessaire à digitaliser un seul pixel sera petit. Les caméras doivent également avoir une capacité à résister aux chocs et aux vibrations de l'avion. Ces recommandations sont plutôt générales nécessitant de toute façon des échanges avec les fabricants de caméras qui auront à prouver leurs aptitudes à être installées lors de tests préliminaires comme les tests effectués avec les systèmes de pupillométrie décrits et grâce aux systèmes vidéo mis à disposition par leurs concepteurs.

4.6.2 Lumière à Infrarouges

Même si les techniques finalement recommandées ne requièrent pas l'utilisation de lumière à infrarouges (IR) pour éclairer les visages des pilotes, celles-ci devraient être disponibles de nuit. Les tailles des sources IR devraient être très menues, leur surface ne devrait être supérieure à 40x40 mm². Leur nombre dépend de la technique utilisée. Puisqu'il s'agit de lumière IR, une question importante concerne la sécurité pour les yeux. Les exigences européennes distinguent toutefois les limites pour les LEDs de celles (très sévères) des lasers.

4.6.3 Ordinateur portable

L'ordinateur portable doit être autonome. L'algorithme de somnolence, le traitement de la vidéo et la logique de traitement doivent être effectués sur cet ordinateur. Celui-ci doit disposer d'autant de cartes vidéo qu'il y a de caméras nécessaires. Les caractéristiques spécifiques des PC dépendent des techniques utilisées et des exigences liées aux algorithmes de traitement.

4.6.4 Alimentation électrique

L'alimentation électrique suivante est requise au poste de pilotage :

- 115 V, 400 Hz,
- 26V, 400 Hz,
- 28V DC,

Le système doit être capable d'utiliser au moins une de ces sources de puissance, les seules disponibles à bord.

4.6.5 Interférences Électromagnétiques

Les règlements en la matière ne qualifient pas la puissance du champ magnétique permis par les systèmes. Ils spécifient uniquement que tout système qui génère un champ électromagnétique aussi faible qu'il soit doit être testé afin de certifier que le champ magnétique induit est suffisamment faible pour ne pas interférer avec le compas d'urgence installé sur la console du milieu.

4.7 Exigences concernant les logiciels

Une exigence absolue est que le système doit pouvoir fonctionner en temps réel. Aucune donnée ne peut être stockée pour être utilisée à posteriori. Ceci irait à l'encontre de la confidentialité et le système serait alors considéré à tort comme un « gendarme » pour parler le langage contemporain conforme à la culture de sécurité qui prévaut en cette époque. Le système est prévu pour être une assistance in situ, rien de plus, ni de moins.

Tout système qui fournirait des informations fausses, incomplètes ou non existantes devrait être déconnecté temporairement ou définitivement. Le logiciel installé doit pouvoir être modifié au moyen de SB (Service Bulletin) permettant des mises à jour faciles. Tout logiciel du système doit pouvoir être installé sur le même pc. Le constructeur en imposera le langage.

4.8 Exigences de Sécurité

Le système doit pouvoir fonctionner de façon fiable et éviter toutes fausses alarmes et omissions. Les règlements (ARP 4754/ED-79, DO-297, DO-254, DO-178) seront appliqués si requis par l'EASA ou la FAA.

4.9 Exigences de durée de vie

Les composants du système doivent avoir une durée de vie d'au moins 3000 heures. Une valeur idéale pour un système de bord peut atteindre 10000 heures. Le critère de 3000 heures est une valeur moyenne. Au plus onéreux les composants au plus long doit être le MTBF (Mean Time Between Failures) pour limiter les coûts de maintenance. Les composants moins onéreux (telle que les LED IR) peuvent avoir une durée de vie plus limitée car peu onéreux à remplacer.

4.10 Processus de développement

Le développement d'un futur système de détection de somnolence ou d'incapacité doit passer par deux étapes.

4.10.1 Phase prototype

1. Développement Système
Le constructeur du système doit travailler avec le constructeur avion pour définir les exigences en matière de besoin électriques et mécaniques et définir les besoins en matière de performance,
2. Développement d'un prototype
Un prototype doit être développé et testé en laboratoire,

3. Prototype Simulateur

Un prototype doit être développé et testé en environnement simulé,

4. Prototype de poste de Pilotage

Comme dernière étape seulement un prototype opérationnel serait livré pour des tests en temps réel et en environnement opérationnel.

Ces 4 étapes, seraient aux mieux tracés au moyen de l'échelle de maturité technique de la NASA (TRL) afin de progresser pas à pas. Ceci pour éviter de brûler les étapes comme ce fut le cas avec le PGS et les différents stades liées au développement de l'EPAM. Et ne s'embarquer dans l'application finale qui s'affranchit définitivement de toute mesure d'activité.

4.10.2 Phase de finale de développement

Cette phase comprend la miniaturisation du prototype, l'ajustement du système pour satisfaire à toutes les exigences et pour la mise au point concernant l'implémentation dans un poste de pilotage. Et finalement, le constructeur du système livrerait le système complet au constructeur avion qui se chargerait des tests concernant l'intégration et les conditions d'environnement.

4.10.3 Commercialisation

Cette phase est évidemment essentielle mais dépend surtout de l'engagement authentique de compagnies aériennes à s'attaquer au sujet de la fatigue et de la détection par le biais des phénomènes de somnolence et de détection de l'hypovigilance en vol et de la gestion de ceux-ci avec l'alternance des périodes de repos au poste de pilotage. L'observation d'incapacité partielle ou totale restant incluse étant donné son signalement accru.

4.10.4 Production

Cette phase comprend la fabrication en quantités industrielles du produit final si le marché suit. Pour cela il faudra le développer au moyen du retour d'expérience comme évoqué dans le préambule de la directive récente de l'EASA avec la SIB 2023-08 du 7/7/23 qui mentionne la liste SHIELD. Même si les progrès les plus importants furent le fruit de l'ambition de constructeurs créatifs ayant eu le talent de convaincre les certificateurs, de nombreux thèmes sécuritaires liés à la navigabilité n'ont pu avancer que grâce à la pression de ces mêmes autorités qui ont beaucoup fait évoluer la sécurité ces dernières années.

5. Conclusions

Nous venons de suggérer les pistes d'un futur système qui assisterait les pilotes à rester vigilants lors de prises de quart. Les pauses où les pilotes alternent entre veille active et veille passive seraient assistées par un système de surveillance qui faciliterait les siestes au siège. Ou qui faciliterait le suivi de somnolences en général, de relâchement ou de réduction d'implication en dehors du travail dit posté.

L'idée originelle était de les doter d'un système qui les avertirait - pour le cas particulier de la veille active - alerterait le pilote resté seul aux commandes si celui-ci se retrouvait à son tour en flagrante hypovigilance. Au départ le système était basé sur la seule mesure de l'activité par le biais des interactions avec les équipements de bord. Il est rapidement apparu qu'il nous fallait un paramètre endogène aux pilotes nous indiquant leur état d'éveil effectif au sens physiologique.

5.1 Discussion

Alors que pour des raisons techniques et économiques nous avons décidé d'abandonner le volet exogène lié à l'activité, il nous restait les mesures physiologiques de la somnolence par le biais très bien corrélé avec les mouvements oculaires. Ce qui pointa vers les meilleurs témoins de la pression du sommeil que sont les clignements des yeux ou de leurs paupières, leur durée, leur amplitude et leur fréquence. L'analyse des données brutes par le biais de l'algorithme PERCLOS se révéla pertinente car il permet le calcul en direct de la proportion de temps qu'un certain pourcentage de fermetures des yeux est dépassé. Cette méthode se révèle très bien corrélée à la somnolence et aux déficits de performance. Les essais de plusieurs dispositifs de systèmes de suivi des yeux généreusement mis à disposition par leurs fabricants nous ont convaincu qu'il n'y avait pas de produit miracle et que comme toujours le bon jugement impose des compromis entre plusieurs possibilités.

- Il s'avère que l'utilisation de petites sources à infrarouges (IR) est préférable. L'utilisation de ces sources garantit une identification fiable des pupilles avec un faible taux d'omissions ou de faux signaux.
- Les IR sont la seule solution pour faire face au blocage inévitable occasionné par les lunettes solaires. Sachant que les pilotes les portent souvent en vol de jour il serait regrettable que cela bloque toute information sur les paramètres oculaires. Les méthodes basées sur des modèles ne peuvent se passer des IR. Les lunettes bloquant les IR peuvent donc poser des problèmes. Ne serait-il dès lors pas judicieux de doter le système de lunettes solaires dédiées ?
- L'adoption d'un système basé sur le suivi d'un œil unique n'apparaît pas adaptée : le suivi de la pupille n'est déjà pas évident d'autant plus que s'il y a perte de suivi il est illusoire de retrouver l'œil si l'image n'est plus disponible.

La plupart des méthodes nécessitent une procédure de calibration afin d'assurer une détection rapide et le recueil de paramètres fiables pour un individu spécifique.

- La calibration en elle-même ne pose pas de problème et garantit de recueillir de bons signaux. Et plus particulièrement la performance de systèmes basés sur des modèles qui n'utilisent pas les IR mais nécessitant une calibration correcte.
- Le mieux serait de disposer d'une haute résolution en pixel pour les images oculaires mais sans subir de fréquentes pertes de suivi liées aux mouvements de la caméra ou des miroirs associés.
- De là l'idée originelle de disposer de deux caméras : l'une chargée de détecter avec précision les mouvements 3D de la tête, l'autre munie d'un miroir asservi et d'une lentille à zoom optique pour ajuster la distance focale, pour grossir la région recherchée de l'œil et localiser la pupille au moyen de la technique IR de la pupille sombre.
- La première caméra servirait à déterminer la position de la tête, la seconde serait dédiée à la position de l'œil. Afin de capter l'œil et sa pupille et de permettre d'analyser les paramètres oculaires grâce à la bonne résolution de son image.

- Comme la première caméra fournit également la posture de la tête du pilote, il y aurait la possibilité supplémentaire de capter l'image du sujet quand il pique du nez pour le dire d'une façon imagée. Et de le signaler par une alarme.
- Étant donné les vibrations et l'encombrement au poste cette solution n'est cependant pas idéale. De plus des mouvements rapides de la tête ne seraient pas aisément suivis dû à la latence temporelle et l'inertie dans la détermination de la position de la tête et dans le mouvement de la caméra et de son miroir. Mais cet inconvénient n'est que mineur parce que nous sommes avant tout intéressés par le sujet en position tranquille à son siège quand il est susceptible de subir des épisodes d'hypovigilance.
- Les caméras mobiles auront tendance à avoir une durée de vie plus courte et des coûts plus élevés de maintenance. Ce qui nous amène au coût d'un tel système : 2 caméras avec 2 technologies différentes et non-interchangeables se révéleront onéreuses. D'un coût informatique et économique exorbitant, compliqué algorithmiquement. A moins que le projet n'aille de pair avec un système de reconnaissance de l'identité du pilote, déjà évoqué dans le monde sécuritaire, cette solution certes astucieuse n'a pratiquement pas d'avenir.

Comme la simplicité est toujours bonne conseillère l'autre solution s'impose dès lors comme un compromis.

Une seule caméra doit pouvoir suffire avec un algorithme de détection basé sur la technique de différence IR et un algorithme de traitement des mesures basé sur la détection des bords oculaires.

- La technique des différences s'est révélée simple et fiable car elle minimise les fausses détections. Cette technique devrait être appliquée avec des images non entrelacées afin de réduire les artefacts liés aux mouvements. Un numériseur d'images rapide permettrait d'assurer un bon échantillonnage.
- Dès lors que les positions exactes des pupilles seraient connues une technique de reconnaissance des bords oculaires peut être appliquée pour détecter les paupières des yeux et mesurer leur inter-distance (variable). Cette mesure se substitue au diamètre des pupilles permettant ainsi de poursuivre les mesures même si celles-ci seraient en occlusion comme c'est le cas lors des clignements.
- Un filtre de Kalman permettrait de prédire la position de la pupille pendant un bref laps de temps pendant que le système mesure une fermeture oculaire. Un œil fermé arrêterait aussitôt le fonctionnement du système. L'avantage de cette méthode réside dans la calibration limitée liée à la technique de différence IR. Une calibration du système est néanmoins indispensable et davantage pour la robustesse de l'algorithme que pour le fonctionnement correct de la détection de la pupille. Un désavantage de cette solution est que la rotation de la tête n'est soutenable qu'à un certain degré mais qu'elle est indispensable à la détection des reflets de la pupille.
- Ayant envisagé l'utilisation de 2 caméras et de plusieurs sources d'IR il a fallu y renoncer car cela nuirait à la méthode de différences puisque l'illumination sur axe d'une caméra causerait l'illumination hors axe de l'autre. Mais comme le système doit impérativement être capable de poursuivre les mesures pour autant qu'au moins un seul œil reste visible, les rotations de la tête ne devraient pas poser trop de problèmes.
- Un autre avantage important de cette technique réside dans la facilité à retrouver la pupille en cas de perte. Si le pilote bouge en dehors de la zone de couverture du système, le système

perdra le suivi et passera en mode de détection pour chercher l'image complète de la tête en quête des pupilles. Dès que celle-ci est à nouveau dans l'image elle sera récupérée et le processus de suivi recommencera. L'autre avantage est l'absence de parties amovibles et l'espace limité occupé par la caméra.

Finalement, cette solution combine la simplicité avec une détection correcte de la pupille sur une plage étendue de mouvements avec une correspondance des modèles adéquate et appliquée à des zones bien délimitées.

5.2 Conclusion sur les suggestions pour le détecteur de somnolence et d'incapacité

Il s'agit d'être réaliste et de se rendre compte qu'un système de détection de la somnolence ne pourra pas prendre en compte tous les mouvements du pilote et tenir compte de toutes les conditions environnantes telle que la luminosité.

Cette note est certes exhaustive pour initier à tous les aspects du sujet et en rendre compte des évaluations Retenons les besoins suivants pour un futur système de détection de l'hypovigilance et de l'incapacité de pilotes.

Le système devra disposer de :

- Sources de lumière IR pour localiser les pupilles,
- D'une caméra grand angle pour les grands mouvements du corps,
- Une calibration facile et courte pour être acceptée par les pilotes,
- A moins qu'un système de reconnaissance ne soit combiné pour connaître l'identité des pilotes il ne serait pas raisonnable d'en demander plus car cela mènerait à un système trop onéreux tant du point de vue informatique que du point de vue économique,

Une des premières questions à résoudre dans le futur concerne l'implémentation d'un algorithme général concernant l'état de somnolence et d'hypovigilance basé sur les données brutes de clignement des yeux et fournies par un système vidéo.

- Des essais au simulateur et des expérimentations en vol devraient prouver la bonne performance de cet algorithme ainsi que du système de vidéo associé.
- Un autre aspect encore plus ambitieux qui s'impose serait de pouvoir déterminer l'implication effective du pilote quant à la reconnaissance des scrutations du regard sur les instruments de vol pour en saisir la stratégie de balayage et la cohérence cognitive.
- Un défi majeur pour incorporer cela concrètement dans le cadre élargi de la sécurité aérienne. Et d'envisager aussi comme évoqué par le passé lors des campagnes EPAM : la capacité de la reconnaissance faciale avec un système à caméras.

Le développement de l'**intelligence artificielle** ouvre une voie pour la mise au point du détecteur d'hypovigilance avec :

- Les possibilités du « **Machine Learning** » traitant en **parallèle** et à grande vitesse des masses de données concernant les enregistrements de tâches, de procédures, les activations physiologiques, les performances des pilotes et leurs comportements,
- Les affinements progressifs d'**algorithmes IA** envisageables sur des systèmes de nature aussi différentes que ceux ayant trait à l'activité ou à la pupillométrie pour les traiter en « **big data** » et au moyen de **simulations** et **modélisations HSI** "

6. Epilogue

L'incapacité devrait rester un sujet de préoccupation sensée pendant un certain temps. Cette note rédigée solitairement sera revue et adaptée en fonction des diverses contributions éventuelles.

Le suivi des yeux, des pupilles et du regard des pilotes au moyen de caméras pourrait être complété avec des caméras enregistrant les scènes de cockpit tel que ce fut d'ailleurs le cas pendant les campagnes de certification de l'équipage à deux de l'A300FF à l'A310, l'A320, l'A340/330 et l'A380

- La suggestion de pourvoir les postes de pilotage de CIR (Cockpit Image Recorder) a longtemps été préconisée par le NTSB et escamotée par la FAA.
- Nombre de protections de confidentialité pourraient être prises pour éviter des manipulations malveillantes hors accidents. Ce qui va d'ailleurs dans le sens de la « Just Culture » qui entend faire la part des choses.
- Il ne sera certes pas évident de pouvoir réunir les 2 types de caméras en un seul système dédié, encore moins de le faire accepter par les pilotes de ligne alors que ces dispositifs ont démontré leur contribution dans les contextes sécuritaires actuels.

Glossaire

ACP : audio control panel
ASL : Applied Science Laboratories
ATC : air traffic control
BE : bureau d'études
CAM : Crew Activity Monitor
DGAC : Direction de l'Aviation Civile
EEG : Électro-encéphalogramme
EOG : Electro-oculographie
EPAM version 1.0 : Electronic Pilot Activity Monitor
EPAM version 2.0 : Electronic Pilot Alertness Monitor
EKG: Electocardiogramme
FANS : future air navigation system
FCU : flight control unit
FH : Facteurs Humains
FANS : Future Air Navigation System
FMS : Flight Management System
HF : human factors
HFOG : human factors operational group
IHM : Interface Homme machine
IA : Intelligence Artificielle
IR : Infrarouges
IS : Ingénierie Systèmes
JAA : joint airworthiness authorities

LAA : Laboratoire d'Anthropologie Appliquée
MCDU : multipurpose data unit
MCP : mode control panel
MS : master of science
NTSB : national transportation safety board
PI : Indice de Performance
PC : Ordinateur portable
PCCR : Pupil Center Corneal Reflection
PCA : Analyse en Composantes Principales
PGS : pilot guard system
Perclos : Pourcentage de temps yeux fermés
RMP : radio management panel
SIA : Singapore Airlines
SPO : single pilot operations
TCAS : terrain collision avoidance system
TI : Technologies de l'Information
ULB : Université Libre de Bruxelles
VUB : Vrije Universiteit Brussel