



HAL
open science

Vision augmentée par HUD : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques

Bernard Claverie, Alain Léger

► **To cite this version:**

Bernard Claverie, Alain Léger. Vision augmentée par HUD : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques. *Revue des Interactions Humaines Médiatisées (RIHM) = Journal of Human Mediated Interactions*, 2009. hal-01672711

HAL Id: hal-01672711

<https://hal.science/hal-01672711v1>

Submitted on 4 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Vision augmentée par HUD : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques

HUD augmented vision: for a consideration of psychophysiological constraints

Bernard CLAVERIE (1), Alain LEGER (2)

(1) Ecole Nationale Supérieure de Cognitique – Institut Polytechnique de Bordeaux
– Université de Bordeaux
bernard.claverie@ensc.fr

(2) KTD “Sciences de l’information et de la cognition” – Thales Group – Centre de recherche Le Haillan
alain.leger@thalesgroup.com

Résumé. La métaphore de « l’Homme augmenté » définit un des enjeux des interfaces homme-machine. Elle réside notamment dans l’enrichissement des informations complexes présentées dans des dispositifs intégrés à l’utilisateur, et directement utilisables. Cette approche cognitive permet aux « technologies de la connaissance » centrées sur l’utilisateur d’enrichir l’environnement perçu pour synthétiser de nouveaux environnements directement compréhensibles, sans difficulté d’interprétation, en valorisant l’aide et la suppléance cognitives, en facilitant le confort d’usage et en minimisant le risque d’erreurs. La « vision tête haute » est un exemple des techniques d’aide cognitive, augmentant les capacités naturelles de l’usager. Elle permet à un opérateur de bénéficier directement dans le champ de vision utile d’un affichage de symboles ou d’informations prétraitées. Cet article présente les principes de cette méthode d’augmentation, et propose une prise en compte du facteur humain dans la conception de futures interfaces communicationnelles pour une « vision tête haute » naturellement facilitée.

Mots-clés. Cognition augmentée, communication homme-système, connaissances, homme augmenté, psychophysiologie, HUD, Interface Homme-Machine, réalité augmentée, systèmes embarqués, vision tête haute.

Abstract. The metaphor of an "augmented man" is today a challenge for the human-machine interfaces domain. This metaphor is based on the enrichment of particularly complex informations directly usable and presented to the user in embedded technical supplies. The cognitive approach allows "knowledge technologies" to be focused on the user. An exemple consist to enrich the perceived environment with synthesized information directly understandable without interpretation difficulty, valuing cognitive substitutions, facilitating ease of use, and minimizing the risk of errors. The "head-up vision" is an example of using new devices with cognitive technics, and increasing the natural capacity of the user. It

allows an operator to benefit directly in the field of useful vision of a display of symbols or pretreated informations.

This article presents the principles of this method, and proposes taking into account the human factor in the design of future communicative interfaces for a "head-up vision" naturally facilitated.

Keywords. Augmented cognition, Human-Machine Communication, Increased man, Psychophysiology, HUD, HMI, Increased reality, Knowledge, Augmented Reality, Embedded systems, Head-up vision.

1 Introduction

Les cockpits d'avion proposent des dispositifs technologiques d'aide au pilote pour des tâches multiples, en fonction d'objectifs évolutifs mis en oeuvre dans un environnement dangereux et toujours changeant. La prise d'information, son intégration et son traitement rapide et robuste, sont depuis quelques années une priorité des grands équipementiers. Leur intérêt se porte notamment sur les afficheurs (displays en anglais) et sur le mode de présentation des informations.

Les limites de la technologie sont cependant repoussées moins vite que ne l'exigent les nouvelles charges mentales imposées aux pilotes dans un environnement de plus en plus complexe. Parallèlement, l'enjeu économique consiste à rendre accessible le pilotage à un plus grand nombre de clients potentiels, tout en diminuant les coûts de formation.

Une option consiste à augmenter directement les capacités perceptives de l'homme et de l'aider dans la décision et la compréhension des informations qui lui sont données par les afficheurs du cockpit. C'est le cas de la « vision tête haute » (HUD en anglais¹), ainsi nommée par opposition à l'affichage des informations de vol sur la planche de bord classiquement accessible en vision « tête basse » (HDD²). Un dispositif optique, appelé « collimateur tête haute » (CTH) permet de superposer dans le champ de vision de la scène environnementale observée « tête haute » (scène de surveillance, extérieur du cockpit, etc.), des informations que l'opérateur aurait dû chercher en bougeant l'axe de son regard ou même le plus souvent en bougeant la tête (Le Blaye *et al.*, 2002).

Ce projet d'aide visuelle est relativement ancien. Il a été initialement développé au milieu du siècle dernier pour les viseurs de tir au canon des avions de chasse. Son intérêt a ensuite été rapidement montré pour la fiabilisation des phases d'approche et d'atterrissage des avions civils (Naish, 1963). En 1969, l'introduction d'une iconographie et l'affichage de paramètres physiques ont ainsi facilité le contrôle plus précis de la trajectoire (Klopfstein, 1977). Ce dispositif a alors été adopté et généralisé aux Etats-Unis (Debiesse, Marzuoli & Tourdjman, 2005), où il a même équipé la navette spatiale. Il n'a connu en France qu'un développement limité dans l'aviation commerciale (Steenblick, 1992) ou dans les hélicoptères (Leger, 1994).

Les progrès de l'électronique permettent aujourd'hui des enrichissements performants, mais ils dépassent parfois les limites d'usage (Clavier & Fouillat, 2009). Ils imposent donc une conception prenant en compte la connaissance des aptitudes et des contraintes psychophysiologiques des utilisateurs. Ils nécessitent également une adaptation à des conditions d'utilisation variées, en favorisant performance,

¹ HUD pour « Head-Up Display » (dispositif d'affichage électronique tête haute).

² HDD pour « Head Down Display », par opposition à HUD.

sécurité et confort, tout en simplifiant les tâches à effectuer, dans une véritable perspective d'augmentation des capacités humaines spontanées.

Certaines applications novatrices sont aujourd'hui envisagées dans d'autres domaines que l'aéronautique, pour augmenter l'efficacité et diminuer la complexité d'un tâche précise ou difficile. C'est le cas dans la conduite automobile (Tonnis *et al.*, 2005), dans les tâches industrielles de maintenance (Haritos & Macchiarella, 2005) ou d'ajustage de précision (Tang *et al.*, 2003), ainsi que pour certaines opérations chirurgicales (Fuchs *et al.*, 1998).

2 Principe de la vision tête haute (HUD)

Le principe consiste à projeter directement dans le champ de vision de l'opérateur, par un jeu de lentilles et de surfaces réfléchissantes, des informations enrichissant une scène vue à travers un dispositif optique. Ces informations surajoutées sont, pour le pilotage aérien, relatives aux paramètres de vol, à la trajectoire ou à ses conditions. La nature de ces informations peut être modifiée en fonction des phases de vol ou des tâches à accomplir, et le système peut être maintenu ou désactivé en fonction de besoins de l'utilisateur. Les informations peuvent être numériques, textuelles, ou symboliques (horizon artificiel, reconstructions 3D de la piste, etc.). Elles apparaissent directement incrustées dans l'environnement et donnent une impression d'unité avec l'extérieur.

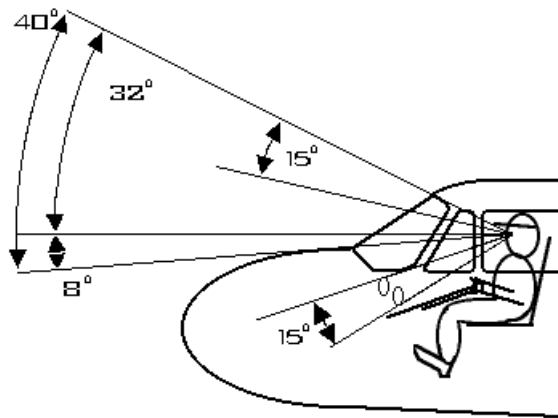


Figure 1. *Les champs de vision utile du pilote*

Afin d'assurer une représentation géométrique, conforme par rapport au paysage, de certaines informations, en particulier celles de trajectoire, il est nécessaire de renvoyer optiquement « à l'infini » l'image générée par un « imageur » de type CRT³ ou LCD⁴. La technique, dite de « collimatage⁵ à l'infini », permet alors « d'unifier » géométriquement les informations surajoutées et le champ de la

³ CRT pour « écran à tube cathodique ».

⁴ LCD pour « écran à cristaux liquides ».

⁵ Les termes « collimater » pour l'action, « collimateur » pour l'objet, « collimatage » ou parfois « collimation » (collimation at infinity) pour la procédure ou la méthode, sont issus du verbe latin « collimatio » signifiant « viser en ligne droite » ou « orienter vers la cible un instrument de visée ».

scène opérationnelle. Les images ou informations ainsi incrustées sur les scènes cibles éloignées (piste d'atterrissage, trajectoires dans le relief, taxiway, etc.) participent d'une réalité « augmentée ». Par exemple, la matérialisation de la trajectoire au moyen d'un symbole appelé « vecteur vitesse » permet de prévoir avec précision, à tel instant donné, où mènera la trajectoire courante dans le paysage si aucune manœuvre n'est effectuée. Des options permettent également de prévoir cette trajectoire en fonction d'action que le pilote pourra alors choisir dans un répertoire dont il peut directement évaluer les conséquences « virtuelles » dans le paysage « réel » ; on parle de « réalité augmentée ».

Les dernières technologies consistent à fixer le dispositif non plus sur la verrière du cockpit, mais directement sur la tête du pilote. On rend alors le dispositif solidaire de l'opérateur. Ce concept, dit « viseur visuel de casque » (VVC ou HMD⁶ des anglo-saxons) permet d'augmenter le déplacement possible du champ de vision en bougeant la tête. On parle alors de « système embarqué sur l'usager ». Les informations sont ici directement projetées dans des lunettes ou sur la visière du casque de vol, ou même intégrées dans les jumelles de vision nocturnes (JVN) (Aymeric *et al.*, 1998). Grâce à la miniaturisation des composants et au progrès de leur alimentation électrique, on envisage aujourd'hui de présenter ces informations sur de simples lunettes de vue ou même directement sur des lentilles de contact dans lesquelles sont insérés des microcircuits électroniques (Ho *et al.*, 2008).

Le dispositif permet de libérer l'utilisateur de deux facteurs d'alternance active. Le premier est celui du changement de champ visuel entre d'une part l'environnement extérieur, nécessaire à la gestion de la trajectoire et à l'anticollision, et d'autre part les instruments du cockpit. Le second est l'alternance d'accommodation de la vision extérieure (à l'infini), dans des conditions d'éclairage diurne ou nocturne naturel, à une vision proche dans des conditions d'éclairage artificiel de la planche de bord. Parmi les autres avantages ergonomiques, on a noté la diminution de la charge mentale, la facilitation de la perception de la situation spatiale, et une meilleure aptitude à la décision (Roumes *et al.*, 2002 ; Crawford & Neal, 2006).

3 Contraintes techniques

Trois points méritent d'être développés pour la conception ou l'usage de ces systèmes de réalité augmentée. Le premier concerne la fusion des données respectant la perception de la profondeur, le second, la symbolique des informations surajoutées, dite « symbolique HUD », le troisième, la position d'affichage permettant d'élargir le champ de vision et sécuriser la perception et la compréhension.

3.1 Réalité augmentée par fusion de données

Une forme placée devant l'observateur apparaît d'autant plus grande qu'elle est proche et qu'elle se situe dans un plan perpendiculaire à l'axe du regard. Elle apparaît d'autant plus courbe qu'elle est proche, et qu'elle est excentrée par rapport à l'axe du regard (Rock, 2001). Néanmoins, un processus cognitif inconscient permet de reconstruire mentalement dans l'espace, à partir de la signification attribuée au contexte visuel, les formes des objets perçus sur la surface de la rétine.

Ce processus est une source d'erreurs d'interprétation (Wickens & Holland, 2000), notamment dans la perception du parallélisme ou dans l'évaluation de la

⁶ HMD pour « helmet mounted display » (afficheur monté sur casque).

verticalité et de la pente (Leger & Aymeric, 1999 ; Stuart *et al.*, 2007). Le problème posé à la vision tête haute est alors celui de la fusion, dans un même espace perceptif, d'informations issues de différentes distances, tout en préservant l'usager des erreurs naturelles. Certaines informations ont des caractéristiques d'une perception à l'infini (le domaine lointain - the far domain), alors que d'autres sont des reconstructions projetées sur des écrans proches de l'œil du pilote (le domaine proche - the near domain) (Wickens & Ververs, 1998). Afin de donner l'impression d'un seul espace visuel extérieur lointain dans lequel sont réellement incrustées les informations surajoutées, comme si elles faisaient partie du paysage, on simplifie les informations issues de sources artificielles après les avoir enrichies selon un code standardisé. Cette fusion sur l'afficheur « combineur » nécessite un traitement spécifique par le dispositif de collimation, qui permet de rendre parallèles à l'axe optique tous les rayons issus d'une source lumineuse ponctuelle. Le collimateur est en fait réalisé en intercalant une lentille convergente entre l'œil et la cible à voir. L'image, bien que provenant d'une source proche de l'œil, est perçue comme étant à l'infini. Ceci restera vrai tant qu'aucun objet matériel ne s'interposera (phénomène d'interposition) dans le champ ainsi collimaté.

3.2 Symbologie et projection d'images

Les informations projetées ont donc deux origines distinctes. Les unes concernent l'environnement, les autres l'aéronef.

Le premier type dépend uniquement de la scène qu'il convient d'enrichir par des images surajoutées issues par exemple de bases de données de terrain embarquées, ou de capteurs infrarouges (Aymeric *et al.*, 1998). Les conditions météorologiques d'utilisation peuvent alors être dégradées, et le vol rendu possible par brouillard, neige ou pluie (Tilloy, 2005), de jour comme de nuit. Des capteurs sont susceptibles d'aider à la détection d'autres aéronefs en vol ou de véhicules sur la piste, par augmentation de lumière, ou en fonction de leurs caractéristiques thermiques pour les équipements infrarouges (Le Blaye & Valot, 2005). Les images synthétiques surajoutées enrichissent alors la vision naturelle par des reconstructions (Foxlin, Altshuler, Naimark & Harrington, 2004 ; Frahm, 2006). Ce type d'information augmente le réel avec des indices permettant une meilleure perception visuelle du paysage et surtout une meilleure compréhension de la scène. Elle aide à la prise de décision, facilite la sécurité et favorise le confort. Ces informations indépendantes nécessitent cependant de grandes puissances et vitesses de traitement et recourent à des techniques de synthèse d'image demandant d'importantes capacités de mémoire informatique.

Le second type d'informations est plus généralisé et moins coûteux en calcul. Il concerne directement les paramètres de l'aéronef, habituellement donnés par les multiples indicateurs du cockpit. Il s'agit ici de données codifiées, élaborées par le calculateur à partir de la synthèse de plusieurs informations primaires issues des instruments de la planche de bord. Ces informations, dites « externalisées », sont simplement renvoyées dans le champ de vision du pilote centré sur l'environnement, sans avoir besoin d'y être perceptivement intégrée. Il existe ici une sorte de « grammaire » d'affichage des HUD. Celle-ci provient plus de l'habitude d'usage que de la rationalité expérimentale ou de la logique sémantique. Elle est d'ailleurs regrettamment fixée par la réglementation sans tenir compte de la réalité psychophysiologique ou linguistique. Cette présentation des icônes concernant les paramètres de base du pilotage se fait sous forme d'échelles, avec une disposition en « T basique ». Les symboles y sont affichés en s'affranchissant des effets d'utilité des

champs visuels, de performance d'une présentation latéralisée, et de la spontanéité cognitive des pilotes.

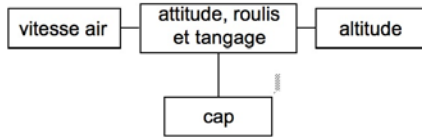


Figure 2. T basique dans la symbologie d'affichage standardisée

Cette pseudo grammaire prend le nom de « symbologie ». Ce néologisme désigne l'ensemble des symboles utiles à l'enrichissement de la compréhension d'une carte, d'un afficheur ou d'un écran de contrôle. Dans un HUD, la symbologie concerne trois types d'éléments : les premiers concernent la trajectoire de l'aéronef ; les seconds apportent d'autres informations concernant le pilotage ; les derniers sont relatifs à des tâches spécifiques, souvent réservés aux utilisateurs militaires ou au travail aérien. On voit cependant des nouvelles informations pour les pilotes d'hélicoptère, notamment pour les phases de sauvetage où des renvois d'images sol/mer sont intégrés dans les HUD.

Selon Klopstein (1977), la symbologie doit rester la plus simple possible. Elle ne comporte donc que ce qui est utile au pilote dans la phase de vol concernée. En fait, les paramètres incontournables sont souvent seuls présents. Pour le vol, trois d'entre eux concernent des indices directs : la pente géographique, sous forme de l'écart du point d'impact choisi par rapport au marqueur de pente, résumée sous la forme « haut *versus* bas » ; l'écart latéral par rapport à l'axe de piste, résumé par « droite *versus* gauche » ; l'écart d'incidence par rapport à l'incidence correcte sous forme de vecteur vitesse et d'un symbole fixe, correspondant à l'opposition « rapide *versus* lent ». Trois dérivées de paramètres de base sont également utiles : le vecteur vitesse, dont la position par rapport au point d'impact souhaité est la dérivée de la pente géographique ; la route, dont l'écart par rapport à la ligne de fuite de la piste est la dérivée de l'écart latéral ; l'accélération. Il convient alors pour le pilote de maintenir à zéro les trois paramètres de base, et à réguler les trois dérivées pour adapter la trajectoire aux conditions du vol. Enfin, les éléments concernant la trajectoire, dont on sait que l'affichage améliore la sécurité (Desmond & Hansen, 1990), sont présentés : la piste synthétique ; l'horizon graduée sur lequel bouge un symbole de référence de l'avion ; le vecteur vitesse inertiel, le cap et la pente souhaités.

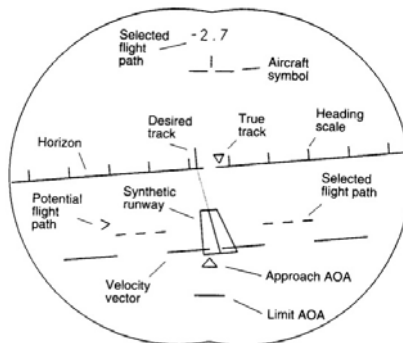


Figure 3. *Symbologie dite « Klopstein » standardisée en 1966*

La superposition collimatée supprime évidemment la mobilité du regard et les itérations nécessaires à la sécurité, mais également les tâches d'accommodation en augmentant le confort. L'utilisation de couleurs et de cristaux liquides dont la luminosité peut s'adapter automatiquement aux conditions d'éclairage facilite la compréhension. De plus, la lecture d'un instrument à l'infini n'est pas affectée par des turbulences, aussi fortes soient-elles, et permet donc une présence de l'information dans toutes les circonstances de vol, fussent-elles difficiles.

3.3 Adaptation à l'usager

La précision de l'affichage permet d'augmenter la performance (Alter-Snpl-Spac, 2002). Elle facilite la lecture directe de paramètres angulaires avec un niveau de détail d'un dixième de degré et le contrôle sans interruption du risque de décrochage de l'avion par perte de vitesse. Cette précision en fait un instrument indispensable pour maîtriser directement une pente ou une route, en complète cohérence avec l'évolution du monde extérieur, grâce à une représentation imagée permettant la compréhension spontanée du comportement de l'aéronef dans son environnement normal (Leger & Aymeric, 1999) ou face aux situations d'atterrissage périlleuses (Bulirsch, Montrone & Pesch, 1991) Ainsi, un collimateur présentant une piste synthétique, l'horizon, la vitesse air, le variomètre, et la route permet de poser un avion sans visibilité, et de l'arrêter sur la piste dans des conditions sévères de rafales ou de turbulences fortes (Klopstein, 1977).



Figure 4. *Exemple d'HUD développé par la firme Thales, équipant l'avion militaire A400M*

Bien que les concepteurs de HUD privilégient une symbologie qu'ils veulent « lisible et naturelle », elle est souvent lourde dans certaines phases, avec l'ajout de paramètres d'altitude, de vitesse-sol ou de propulsion. Les systèmes récents sont pour cela dotés d'une fonction d'allègement de symbologie, dite de « déclutterisation ». Le « clutter » désigne la saturation du champ visuel.

Les solutions pour réduire le clutter HUD (Ververs & Wickens, 1998) consistent à enlever des symboles ou à changer le format de représentation (Boston & Braun, 1996 ; MacCann *et al.*, 1993). Ceci peut être programmé de manière automatique ou faire l'objet d'une option manuelle de sélection permettant au pilote de formater lui-même la complexité de son HUD à un ou plusieurs niveaux.

La nature des informations affichées doit dans tous les cas être modifiable par l'utilisateur en fonction de la phase du vol ou de la tâche à accomplir. Ceci est le cas

sur les avions militaires ; le pilote peut par exemple afficher le domaine de tir d'une arme sur des informations relatives au pilotage, tout en supprimant celles concernant la navigation, devenues temporairement superflues. Le système doit pourtant être opérationnel également sur des avions civils, où il sert essentiellement à présenter des informations de pilotage relatives à l'environnement dans des phases particulières. Les affichages doivent pourtant être adaptés en fonction des phases du vol, de la mission ou des tâches aériennes à effectuer, et ceci au-delà de la simple



fonction de déclutterisation automatique.

Figure 5. Exemple d'affichage avant et après la fonction de déclutterisation automatique.

L'aspect sécurisant du HUD est évident lors de l'atterrissage, de remise de gaz. Mais il l'est aussi pour les situations inusuelles, pour les vols à basse altitude (vol à vue, vols aériens, etc.), mais également durant les phases de décollage (Billingsley *et al.*, 2001). Plus de pilotes revendiquent l'installation d'un HUD, notamment sur l'ensemble de la flotte commerciale (Snpl-Spac, 2002).

Néanmoins, encore aujourd'hui et dans les avions modernes, l'affichage d'informations, parfaitement collimatées et congruentes avec la vision extérieure, reste largement dépendante de l'affichage conventionnellement pauvre décrit ci-dessus.



4 Technologie embarquée sur l'homme

Le champ d'affichage HUD des symboles ou des images est technologiquement restreint. En règle générale, il est de 25 à 30 degrés sur les dispositifs classiques, et reste surtout centré sur l'axe du regard, par exemple autour de la « ligne de foi » de l'aéronef. Ceci n'a pas trop d'inconvénient pour les avions lourds, dont la trajectoire reste généralement proche de la ligne droite, mais pose des problèmes pour les appareils légers ou à voilures tournantes (hélicoptères).

La dimension du champ accessible pour afficher les informations constitue donc une limite technologique que les concepteurs tentent de dépasser (Weintraub & Ensing, 1992). La technologie VVC ou HMD résout partiellement le problème (Jacobs *et al.*, 1970 ; Jarret, 2005). Elle associe le déplacement de la tête et celui du système optique, et permet de garder des informations de vision augmentée dans des champs allant jusqu'à 70 degrés. Certaines réalisations pour des dispositifs de

simulation ont ainsi dépassé les 100 degrés de champ de vision. Les pilotes voient directement le monde extérieur au travers de lunettes-combinais semi-transparentes, et des images intensifiées ou synthétiques sont superposées sur la vision augmentée du monde extérieur (Hiatt & Rash, 2005).

4.1 Principe « see through »

L'avantage des systèmes embarqués sur l'opérateur est le principe « see through » (pour « voir à travers »). Apparu en aéronautique dans les années 1980, il a été développé par de grands constructeurs de l'électronique (Integrated Helmet and Display Sight System – IHADSS de Honeywell ; TopOwl de Thales ; Cat'sEyes de GEC-Marconi, etc.). Le traitement semi-transparent des lunettes permet également d'améliorer la capacité à voir les différents écrans lumineux de la planche de bord. Plus petits que les HUD classiques, ces appareils permettent de s'affranchir de l'obstruction du champ de vision. Ils peuvent surtout être oubliés par l'utilisateur, sont adaptés à ses propres caractéristiques, suivent le pilote en ne dépendant plus de l'aéronef.

La conception de tels systèmes nécessite alors de séparer les données optiques qui doivent suivre le mouvement de la tête (réalité augmentée mobile, telle que la symbologie et les paramètres de vol) de celles qui doivent rester stables par rapport à l'axe de l'aéronef (réalité augmentée fixe, telle que la situation de la piste, le cap, etc.). Ceci se fait à l'aide de mesures biomécaniques, qui font à elles seules l'objet d'un domaine d'étude spécifique : le « tracker » (Foxlin *et al.*, 2004). Il s'agit de synchroniser en temps réel les images virtuelles affichées dans le casque avec les mouvements du casque, grâce à un dispositif de repérage magnétique ou électro-optique. La diminution de la masse supportée par la tête, tout en embarquant la technologie suffisante à conserver des capacités de rendu optique au moins égales à celles des systèmes plus anciens, est un atout majeur pour le confort du pilote (Charbonneau *et al.*, 2008 ; Priot *et al.*, 2008). Ce compromis doit aujourd'hui beaucoup aux progrès de la miniaturisation technologique et à celle de la stratégie de déport des capteurs par rapports aux yeux afin de libérer la vision directe.

La plus ancienne méthode a consisté à décaler les capteurs de vision au niveau du front, c'est-à-dire au-dessus de la ligne naturelle de vue, pour restitution à un seul œil. Cette technique a été développée à la fin des années 1980 dans les systèmes dits « Cat's Eyes » ou « Viper » (Smith, 1990 ; Melzer & Moffitt, 1997), puis a évolué dans les années 90 vers des systèmes binoculaires (Kalich *et al.*, 2006). L'image enrichie était alors projetée sur les combinais en respectant l'écartement naturel des yeux. Malheureusement, cette localisation haute des capteurs crée un effet périscopique dans lequel l'image artificielle semble d'autant plus petite que les tubes sont longs (McLean, 1998). La modification de l'axe optique n'est cependant sensible que pour les courtes distances, et la superposition n'est que peu contraignante pour la vision à l'infini. Par contre, elle empêche la vision tête basse, provoque des distorsions avec notamment des erreurs d'évaluation de la hauteur dans les procédures d'atterrissage, et nécessite un apprentissage important tout en provoquant des malaises nauséux de « mal de l'air ».

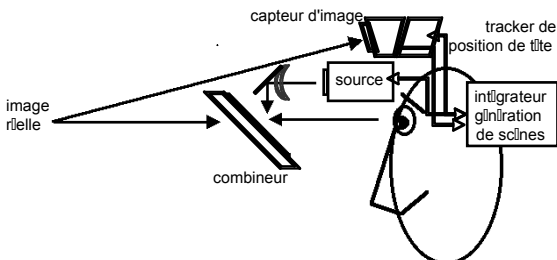


Figure 6. Principe HMD (selon Schaefer, 2003)**Figure 7.** Exemple de HMD (selon Schaefer, 2003)

Une seconde stratégie a été développée dans le milieu des années 1990, en déplaçant les capteurs latéralement, à la hauteur de la ligne de vue naturelle du pilote (Smith, 1990). Plusieurs constructeurs développent actuellement ce type de systèmes, parmi lesquels les casques MiDASH (Elbit Systems), Viper2 (GEC Marconi), TopOwl (Thales). La restitution se fait sur chaque œil, en préservant un large champ binoculaire direct (40 degrés) avec recouvrement total. Au-delà des bénéfices que fournit une vision binoculaire dans le même plan que la ligne des yeux, la mobilité de la tête est facilitée et le suivi de la vision respecté, tout en écartant les problèmes de mal de l'air et de fatigue musculaire du cou.

**Figure 8.** Système TopOwl (Thales) ; on remarque le combineur visière et les tubes de vision de chaque côté du casque, au niveau de la ligne des yeux

L'avenir s'ouvre sur de nouveaux développements, liés aux progrès de la miniaturisation des matériels et l'évolution de la bioélectronique. Ils permettent aujourd'hui de tester des dispositifs de vision sur des lentilles cornéennes souples en intégrant un circuit électrique auto alimenté ainsi que des diodes directement dans l'épaisseur des lentilles. Un prototype expérimental, développé à l'université de Washington (Ho *et al.*, 2008), se compose d'une couche de métal dont l'épaisseur est d'un dix millièmètre de millimètre et des diodes inférieures au tiers de millimètre. Ces circuits électroniques pourront, dans un proche avenir, donner directement des informations au niveau de la cornée, suivant ainsi non plus seulement les mouvements de tête, mais directement ceux de l'œil, et préservant ainsi une largeur de champ de vision complètement naturelle.

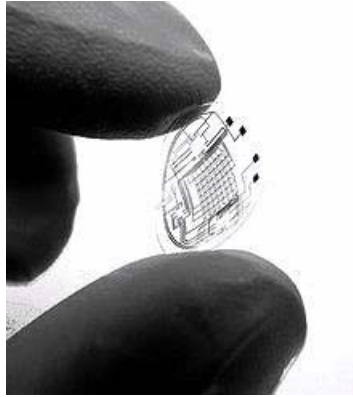


Figure 9. *Lentille de contact avec équipement de fusion de données inclus (voir le texte)*

4.2 Limites à l'usage symbolique

La technologie est en marche, permettant à terme un usage des HUD, et plus particulièrement des systèmes « see through », avec un minimum de contrainte de restriction de champ et la suppression du suivi et de la synchronisation de scène avec les mouvements de la tête (tracking). La question reste posée de savoir quoi afficher dans les dispositifs.

En effet, si les concepteurs ont jusqu'ici essayé d'associer la sécurité et la diminution de la complexité de la tâche, ils n'ont pas réussi à s'affranchir des grammaires traditionnelles de symbologie et d'affichage, dictées par la tradition, les lourdes normes internationales et les multiples recommandations en aéronautique.

Au-delà des travaux sur l'attention du pilote (Byre & Kirlik, 2004 ; Leger, 1994 ; May & Wickens, 1995 ; etc.), certaines études montrent l'intérêt d'une reconsidération de l'affichage des informations dans les images (Mulder *et al.*, 2000), ou des choix des symboles (McDougall *et al.*, 2006) en fonction de différents facteurs. Ainsi, la météorologie et l'heure du jour nécessitent une modulation de l'intensité d'affichage. La phase de vol fait également l'objet d'affichages différents et détermine la symbologie : très complète et chargée en « concept manuel » pendant les périodes critiques, plus dépouillée en phase de « surveillance ». La complexité des informations symboliques devrait pour nombre d'auteurs faire l'objet d'une simplification standardisée, ainsi que d'une réflexion portant sur les groupes d'objets formant des méta-symboles, à considérer comme des symboles eux-mêmes, et perçus comme des objets extérieurs à la scène utile (Jarmasz *et al.*, 2005).

Cette réflexion retrouve aujourd'hui des déclinaisons dans des domaines non contraints par une réglementation trop rigide. C'est le cas de l'aviation privée, du monde de la conduite automobile (Tonnis *et al.*, 2005), de celui des pratiques microchirurgicales (Fuchs, Livingston, Raskar, Colucci, Keller, State, Crawford. Rademacher, Drake & Meyer, 1998), ou des conditions d'ajustement industriel (Tang, Owen, Biocca & Mou, 2003) et de maintenance (Haritos & Macchiarella, 2005) notamment en construction aérospatiale. L'usage y facilite également les opérations de décision, de contrôle ou de simple information dans des dispositifs d'aide visuelle légers.

Au-delà des limites traditionnelles et réglementaires, les contraintes des

constructeurs n'ont pas suffisamment poussé la réflexion vers de nouvelles symbolologies. Ce pourrait être le cas si on intégrait certaines caractéristiques psychophysiologiques, comme la largeur fonctionnelle de champ et la latéralité des informations. Une nouvelle évolution des techniques de « vision tête haute » doit pouvoir s'inscrire dans les contraintes cognitives, psychophysiologiques des opérateurs.

5 Contraintes psychophysiologiques de la vision humaine

La psychobiologie humaine impose des spécificités de vision dépendantes des propres caractéristiques de l'appareil visuel. Celui-ci, chez l'homme, est la voie privilégiée de saisie de l'information extérieure, puisque plus de 70% de cette information est traitée par le canal visuel. Il n'est pourtant pas nécessaire d'aborder l'ensemble des propriétés de l'appareil optique et perceptif, telles que l'acuité, la perception des contrastes, de la profondeur et des couleurs. Certaines caractéristiques sont néanmoins utiles à prendre en compte pour les HUD.

C'est le cas du « champ de vision » qui doit s'inscrire dans l'espace opérationnel contraint de la visière, celui de la distinction entre « vision centrale et périphérique » qui préside à la définition des cônes de vision, ou celui de la répartition entre les « champs visuels droit et gauche », qui décompose la scène observée sur des appareils cognitifs latéralisés, caractérisées par des aptitudes et utilités différentes.

5.1 Champ visuel

Le champ de regard correspond au domaine que l'on voit net en bougeant les yeux tout en maintenant la tête immobile. Le champ visuel est le domaine perçu autour d'un point pendant sa fixation, c'est-à-dire en l'absence de mouvement oculaire volontaire. La zone d'acuité centrale diurne correspondant à l'étroite zone de la vision la plus nette. La zone de vision périphérique correspond à la zone de perception visuelle en dehors de la zone d'acuité centrale.

Le champ de vision, ou champ visuel monoculaire, est un sous ensemble du champ du regard. C'est l'espace plan (au sens euclidien) projeté sur la rétine (courbe) qui permet à l'opérateur de prendre conscience des informations inscrites dans le volume compris entre l'œil et la surface déterminée. Le champ binoculaire est l'espace combiné des deux plans monoculaires. Cette portion spatiale tridimensionnelle est perçue par la surface non-euclidienne de deux yeux alignés habituellement à l'horizontale, et fait l'objet d'une reconstruction cognitive en termes de scènes conscientes.

La séparation axiale des yeux permet la mise en jeu des propriétés stéréoscopiques de la vision binoculaire frontale (cf. infra). Il s'agit pour chaque œil d'une projection par laquelle la dimension métrique des objets est convertie en dimension angulaire, l'unité d'angle étant elle-même variable en fonction de l'excentricité par rapport au point fovéal⁷, et correspond à l'unité biologique du champ visuel primaire (dit ganglionnaire). La géométrie projective, qui modélise les propriétés de cette conversion spatio-angulaire, doit tenir compte de cette réalité physiologique de l'œil, dans lequel les champs visuels primaires (acuité) sont de plus en plus larges avec l'excentricité, expliquant ainsi la baisse de performance visuelle en s'éloignant de la fovéa vers la périphérie.

⁷ La fovéa est la zone centrale de la rétine, située dans le prolongement de l'axe optique, où la vision des détails est la plus précise.

L'appareil optique fonctionne comme une lentille stigmatique⁸. L'œil fait correspondre à chaque point de l'espace d'un « cône de vision » un point sur la surface hémisphérique de la rétine. Plusieurs points peuvent constituer un objet pour peu que les processus cognitifs ultérieurs en permettent la recombinaison puis l'identification. L'objet concerné apparaît de façon différente en fonction de plusieurs paramètres dont la couleur (longueur d'onde de chaque point de l'objet), l'inclinaison dans les directions du plan focal (deux dimensions euclidiennes), la distance à l'œil (et donc la troisième dimension avec la direction dans la profondeur), et l'excentricité par rapport à la vision fovéale (c'est-à-dire par rapport à l'axe du regard). Ces différents paramètres sont combinés dans des étapes du traitement visuel pour permettre une identification des formes dans un étage de traitement cognitif impliquant la fusion des informations en vision binoculaire et le référencement à des patterns mémorisés.

La perception du champ visuel est une propriété de la vision binoculaire par des senseurs alignés sur un plan orthogonal à l'axe visuel. Ce plan frontal de perception répond à des caractéristiques physiologiques hors du propos de cet article. Néanmoins, on note que la vision binoculaire présente des aspects généraux pour l'humain, mais varie selon des différences interindividuelles mineures dont la technologie devra également tenir compte (anatomie de l'œil, acuité, distance interoculaire, etc.). Le champ visuel monoculaire s'étend approximativement de 60 degrés en haut, 70 en bas, 90 environ latéralement du côté temporal et 40 du côté nasal. La somme des deux champs associés sur une même ligne interoculaire permet la constitution d'un champ de vision binoculaire variant de 170 à 180 degrés selon les individus.

Le champ de vision d'un HUD est conventionnellement le champ angulaire couvert par le combineur, spécifié verticalement et horizontalement. On distingue en fait deux champs : le champ de vision total (total field of view) correspond au champ maximal visible en déplaçant éventuellement la tête ; le champ de vision instantané (instant field of view) est le champ visible lorsque la tête est stabilisée en position normale de pilotage avec le HUD. Une simple comparaison des champs naturels *versus* HUD montre l'extrême appauvrissement dû aux appareillages traditionnels. Lorsque le HUD est fixé à la tête, on est dans une situation de quasi suppression de la vision périphérique. On rencontre en clinique une telle situation dans le glaucome primitif à angle ouvert, avec des mêmes processus adaptatifs de compensation par augmentation des mouvements de la tête. De tels comportements s'observent chez le pilote, diminuant la performance et augmentant la fatigue. Il convient donc de régler ce problème en facilitant l'ouverture du champ de vision.

5.2 Cônes de vision

L'image perçue correspond à la projection sur une surface plane, c'est-à-dire à la section orthogonale du cône de vision. Ce plan frontal de perception est exploré de manière binoculaire, permettant d'obtenir deux images distinctes de la même réalité visuelle.

Si un cône est objectivement un volume défini par une droite génératrice (dans le cas de la vision : l'axe du regard), passant par un point fixe constituant le sommet (resp : l'œil), et une courbe plane appelée directrice (resp : le champ optique), le cône de vision binoculaire est un volume complexe constitué des deux cônes monoculaires (resp : le champ visuel), dont une partie est perçue par un œil et

⁸ Un système optique est dit stigmatique lorsque tous les rayons lumineux émis par un point (source) donnent après le passage dans le système un faisceau convergeant en un point (image).

l'autre par le second, avec une volume central de superposition binoculaire. On préfère donc le terme champ visuel en distinguant les volumes mono et binoculaires.

Le champ de performance optique présente plusieurs caractéristiques adaptatives. Il est orientable d'une part en fonction de la mobilité oculaire, habituellement coordonnée des deux yeux, et d'autre part en fonction de la mobilité de la tête selon une double rotation horizontale et verticale par rapport à l'homme debout. Ces mobilités mettent respectivement en jeu deux systèmes musculaires indépendants, dont dépendent respectivement la motricité oculaire et la motricité tête-cou. La surface de balayage du regard peut alors être définie comme étant le champ de vision utile de l'opérateur.

En situation de pilotage, le dernier groupe moteur est habituellement soulagé dans les phases critiques de vol par des dispositifs ergonomiques ou orthopédiques de soutien permettant la stabilité de la posture du pilote, et notamment celle du segment scapulo-cérébro-céphalique. Le champ de vision utile est donc réduit, et seule la mobilité oculaire reste à prendre en compte dans les dispositifs d'aide optique. Le champ de vision est par ailleurs contraint par d'éventuels dispositifs technologiques gênants (indicateurs, visières, etc.), par les dimensions de la verrière et par la structure même du cockpit (inclinaison, montants, etc.) caractérisant des « angles morts », et nécessitant une réelle intégration de l'appareillage à l'homme en situation.

La vision monoculaire, pour l'oeil immobile, fixant un point devant lui, les dimensions du champ visuel sont en moyenne de 90 à 100 degrés du côté temporal et de 60 degrés du côté nasal sur l'axe horizontal, et de 60 degrés vers le haut et 70 degrés vers le bas sur l'axe vertical. La vision binoculaire frontale monodirectionnelle est horizontalement de l'ordre de 180 degrés et verticalement de 130 degrés chez l'homme debout. Nous verrons plus loin que cette superficie couverte par le champ binoculaire ne correspond pas à une simple superposition des deux champs monoculaires.

Ce qui est visible correspond au champ visuel. Celui-ci est donc réduit à ce que l'opérateur a devant lui. Il peut être représenté par un volume engendré par une quasi ellipse, dont les dimensions sont habituellement approximées par un rectangle dont les proportions sont dites « panoramiques » ayant permis l'adoption de formats d'images synthétiques de type 16/9 de préférence à 4/3 ($16/9 > 180/125 > 4/3$), tant dans l'audio-visuel que pour les afficheurs optiques IHM de nouvelle génération.

Le champ visuel n'est par ailleurs pas homogène pour ce qui est des performances physiologiques d'acuité, de photosensibilité ou de détection chromatique, et des performances psychologiques d'attention. De manière générale, les performances utiles à la vision active sont meilleures au centre et diminuent par paliers vers la périphérie (vision précise pour la fovéa, veille attentive, impression induite), les performances de détection du mouvement et d'alerte sont importantes en périphérie (alerte). On peut donc modéliser le champ de vision en une superposition de cônes de performances générés à partir d'un même sommet par des génératrices inscrivant les courbes de performances.

Ces courbes sont celles qui caractériseront les critères d'affichage et de pertinence de l'information affichée.

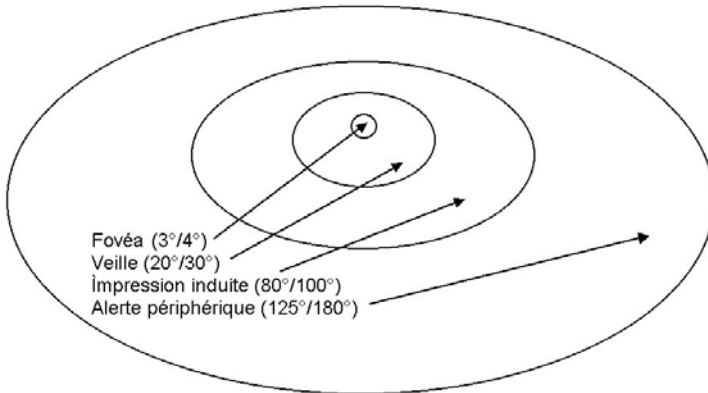


Figure 10. Cônes fonctionnels de vision de l'œil humain

Liés aux données psychophysiologiques précédentes, les angles d'affichage sont des caractéristiques des écrans HUD. Les angles de vision sont caractérisés par les cônes de vision et déterminent des paramètres de confort, au sein desquels les utilisateurs bénéficient de meilleures conditions d'affichage. Il convient de formuler des angles de vision différents pour l'horizon et la verticale.

On peut également déterminer des angles en fonction de la qualification de l'information à afficher. En effet, au-delà de certains angles (zone d'alerte périphérique), l'écran apparaît sombre et de couleurs fades. Les informations d'alerte seront privilégiées en brillance ou en éclats. Les informations chromatiques sont quant à elles à privilégier dans la zone de veille attentive déterminée autour de l'axe de vision pour la tâche opérationnelle considérée.

5.3 Répartition binoculaire

Le champ de vision, s'il peut être décrit de manière homologue entre œil droit et œil gauche selon l'axe vertical (haut/bas par rapport à l'axe de la tête), ne présente pas cette unicité lorsqu'il est considéré selon l'axe horizontal (droite/gauche). Il correspond approximativement à des valeurs moyennes de 60 degrés du côté nasal (du côté du nez) et 90 degrés du côté temporal. Cette distinction est fondamentale dans la supériorité des HUD latéraux par rapport aux périscopiques.

Cette caractéristique d'alignement, rencontrée dans la majorité des espèces animales, contraint le monde perceptif dans une organisation horizontale. L'homme n'échappe pas à la règle ; c'est un être fortement axé sur la verticalité dont les principaux organes d'action et de connaissance du monde sont latéralisés. Les yeux et le cerveau se sont développés en conséquence, et ont privilégié une organisation du monde perçu sur le monde de l'horizontalité.

Or, la vision binoculaire est fondamentale pour la perception de la direction et de la profondeur de champ. Seule la vision stéréoscopique (simultanée des deux yeux) permet une vision spatiale normale dans laquelle les impressions visuelles se fondent en une seule perception commune. Cette fusion des deux impressions visuelles se déroule de manière automatique et inconsciente, modulée par les activités motrices réflexes et des processus hiérarchiques de recombinaison d'éléments d'images dans le système nerveux.

Dans la vision binoculaire, les deux images rétiniennes correspondent pour une large part à une partie commune de l'espace placé devant la personne, mais sont légèrement différentes sur chaque côté du champ visuel monoculaire, puisque les

yeux sont séparés par une distance interoculaire moyenne de 6 à 7 centimètres chez l'adulte.

Le champ visuel binoculaire correspond à la partie commune de chacun des deux champs monoculaires. Une grande partie des deux champs monoculaires se recouvre, et l'espace ainsi défini est vu simultanément par les deux yeux. Chaque image rétinienne légèrement distincte de sa voisine est projetée après un traitement de complexité hiérarchique sur le cortex cérébral, qui grâce à des connexions inter-hémisphériques, permet l'unification des deux images 2D en une seule présentant des caractéristiques 3D. Il subsiste alors de chaque côté temporal une zone, en forme de croissant, qui n'est vue que par l'œil situé du même côté (homolatéral) et qui, bien que ne pouvant physiquement pas être en 3 dimensions, donne l'illusion d'une continuité du volume regardé.

Le niveau conscient ne permet en effet de percevoir qu'un monde unifié et en relief. C'est ce processus de formation d'une extériorisation spatiale unique et nette du monde environnant qui permet la vision normale spontanée du monde sensible.

Le monde perçu n'est en effet pas la composition additive des deux champs visuels monoculaires. Ainsi l'image éclairée vue par un œil ou par les deux est perçue avec la même luminance, et cette image est aperçue comme simple bien qu'elle donne deux images rétiniennes distinctes. Lorsque l'objet observé est plan, les deux images étant quasiment identiques, l'unification spatiale se réduira à une simple superposition. Lorsque l'objet a un volume, les deux images ombrées seront distinctes et l'unification spatiale produira une vision du relief. En effet, lorsque les deux yeux fixent un même point, d'autres paires de points correspondants sont associés en une vue simple. La région de l'espace dans laquelle ces objets sont situés (horoptère de Vieth-Müller⁹) est pseudo circulaire et varie d'un individu à un autre selon la distance de l'objet observé. Tout point de l'horoptère est vu simple, tout point placé en avant avec une disparité inférieure à un degré d'angle est perçu de manière croisée (diplopie physiologique croisée), tout point placé au-delà est perçu comme placé en arrière (diplopie physiologique homonyme) dans un sens inversé (De Bideran, 2005 ; Espinasse-Berrod, 2005).

Le processus d'unification, appelé perception simultanée, n'est pas une simple superposition. Ceci est mis en évidence par les expériences stéréoscopiques où des images distinctes mais cognitivement complémentaires sont présentées aux deux yeux (par exemple une cage à un œil et un animal à l'autre, ou un soldat à un œil et une guérite à l'autre), et qui conduisent à la vision d'une scène intégrée (l'animal dans la cage, le soldat dans la guérite). Lorsque les images n'ont pas de rapport cognitif entre elles (par exemple des verticales à un œil et des horizontales à l'autre), le sujet voit alors par intermittence une image quadrillée (superposition), une image partiellement quadrillée (suspension partielle), des verticales ou des horizontales (suspension totale d'un œil). Il est remarquable de constater que cette absence d'unification est due à un antagonisme cognitif (ou rivalité binoculaire) dépendant de l'absence de signification des images conçues comme scène intégrée. Ce processus de rivalité rétinienne (Champion, 2005) intervient en remplaçant la vision simultanée par une vision alternante.

Dans la majorité des cas physiologiques, les deux yeux reçoivent des images quasi-identiques, ne variant que par quelques détails de différence de point de vue.

⁹ L'horoptère est l'ensemble des points de l'espace vus simples lorsqu'un sujet fixe avec les deux yeux (O_1 et O_2) un point particulier (P). On parle d'horoptère théorique lorsque l'on suppose que la correspondance rétinienne se fait rigoureusement point à point. Le cercle de Vieth-Müller est le cercle circonscrit au triangle $P-O_1-O_2$.

En effet, les deux yeux sont séparés d'une distance interoculaire et un processus de fusion sensorielle tend à constituer inconsciemment une image reconstituée valorisant l'ensemble des détails de chaque côté et permettant la vision stéréoscopique, reposant sur le sens de la différence dans la vision des différences par rapport au point de fixation. Le contrôle cognitif descendant est technologiquement utilisé dans le cinéma en relief et la réalité virtuelle dans lesquels on contraint chaque œil à voir deux photos légèrement différentes d'un même objet ou espace (filtre vert et filtre rouge, lunettes polarisées, etc.). Les images rétiniennees sont alors différentes et l'unification spatiale conduira à une illusion de profondeur.

Ces contraintes visuelles impliquent une reconsidération de l'espace d'interface dans la conception des HUD, notamment dans les HMD horizontaux dont la distance inter-objectifs est maximisée. Cette conception nécessite un traitement des images issues des senseurs, et doit privilégier les informations attentionnelles planes dans les croissants monoculaires et les enrichissements volumiques dans le champ binoculaire. Ces enrichissements doivent alors être cognitivement congruents avec la scène observée, afin de s'y intégrer comme faisant partie de celle-ci. On dépasse ici les simples contraintes physiologiques pour entrer dans le monde cognitif de la signification des informations et de l'ingénierie de la connaissance.

6 Prise en compte des contraintes cognitives

La qualité de la perception visuelle d'un individu est déterminée par la précision des images formées sur la rétine de chaque œil et la sensibilité de chaque rétine. Elle est assimilable, pour ce qui est de l'œil, à la finesse du grain d'une pellicule photo ou à la précision d'une matrice d'appareil numérique (acuité, sensibilité à la lumière et aux couleurs). Elle dépend également de la capacité de coordination des images provenant des deux yeux (vision binoculaire, vision des reliefs), et des processus supérieurs contribuant au confort de vue et permettant une pertinence dans l'identification des formes complexes et de leurs mouvements. Ainsi, les contraintes cognitives de compréhension et d'identification symbolique des scènes vues restent étonnamment un domaine méconnu par les concepteurs d'HUD.

Une vision efficace est certes une vision nette, stable et sans effort, mais également intégrée dans un système de compréhension des observables où les images et leurs composantes prennent du sens et portent une signification pour le sujet. Il est d'ailleurs surprenant que la symbologie ne soit pas considérée en rapport avec ces étages supérieurs de la compréhension visuelle.

6.1 Dominance hémisphérique et latéralité cognitive

Le cerveau humain est constitué de deux hémisphères disposés en miroir par rapport au plan médian du corps. Ainsi l'hémisphère droit est-il globalement semblable à son homologue gauche, et leurs différences n'apparaissent qu'à un niveau d'analyse plus subtile (Gazzaniga *et al.*, 2001). Ainsi, à un premier niveau d'étude, le système visuel est globalement similaire à droite et à gauche. Il présente pourtant des caractéristiques qui doivent être prises en compte dans la conception des HUD.

En effet, bien que dans les deux hémisphères les aires visuelles soient situées dans la partie postérieure du cerveau (lobe occipital¹⁰) et reçoivent des afférences directes des yeux après un relais dans les zones sous corticales (Thalamus – corps

¹⁰ La partie occipitale du cerveau est celle située la plus en arrière, à l'opposé des entrées oculaires.

genouillés latéraux¹¹), la structure du système visuel, composé de deux yeux latéralisés, n'est pas aussi simple qu'il pourrait paraître. Une croyance naïve peut laisser à penser que la latéralité perceptive est liée à celle du récepteur. Pourtant, si dans les deux hémisphères les aires visuelles ont pour rôle de traiter la forme, la couleur et le mouvement des objets, la localisation de ceux-ci est relative à la localisation de la scène observée et donc du champ visuel concerné.

En fait, chaque œil est organisé de manière duale en deux hémirétines, chacune spécialisée dans l'analyse d'une partie droite ou gauche du monde vu par le sujet. La qualité stigmatique des yeux fait que le champ visuel droit projette sur l'hémirétine gauche de chacun d'eux, chacune projetant après un relais sous cortical sur le cortex visuel de l'hémisphère gauche. Inversement, la moitié gauche du champ visuel projette sur le cortex visuel de l'hémisphère droit. Ainsi, les informations issues d'un côté du point visuel de fixation sont projetées directement au seul hémisphère cérébral situé du côté opposé (controlatéral). Le côté nasal de l'œil gauche et le côté temporal de l'œil droit se consacrent à la vision de la moitié gauche du champ visuel gauche, le côté temporal de l'œil gauche et le côté nasal de l'œil droit reçoivent les informations issues de la moitié droite du champ visuel. L'information présente d'un seul côté du point de fixation sur lequel est concentrée l'attention focalisée est initialement traitée par le seul hémisphère controlatéral avant d'être intégré grâce aux connexions (commissures¹²) interhémisphériques (Leporé *et al.*, 1986 ; Hubel, 1988).

Or, on sait que le traitement de l'information visuelle est d'autant plus facilité qu'il correspond à une spécialisation fonctionnelle de chaque hémisphère (Hellige, 1996). Notamment, les performances sont d'autant meilleures qu'une information ayant certaines caractéristiques de signification ou de spatialité est présenté à l'hémisphère spécialisé pour traiter l'information considérée (Kimura, 1969 ; Dimond & Beaumont, 1972 ; Hellige & Sergent, 1986 ; Sergent, 1994 ; Springer & Deutsch, 2000). Les méthodologies et les caractéristiques d'angles et les délais d'exposition sont précisés dans la littérature psychophysique (Beaumont, 1982 ; Viviani, 1994 ; Claverie, 1999 ; Faure, 2001).

Lors d'une présentation latéralisée, l'information est d'abord analysée par les aires visuelles de l'hémisphère controlatéral, puis les résultats du traitement sont utilisés dans des étapes ultérieures requises par d'autres aires cérébrales, dont l'hémisphère opposé, en quelques millisecondes (Braun *et al.*, 1997). Ces délais sont cependant significatifs par rapport à des traitements excessivement rapides. Les différences de performances induites par la latéralité des informations montrent alors soit la supériorité de traitement d'un hémisphère sur l'autre, soit la perte d'information durant son transfert, par les commissures, aux zones capables de réaliser le traitement. C'est ainsi que des mauvaises performances du traitement d'une information verbale complexe dans l'hémichamp gauche, sont dues au transfert de l'information depuis l'hémisphère droit, incompetent pour le traitement linguistique (Zaidel, 1986) ; le temps de transfert provoque un allongement des réponses, et la dégradation des signaux transférés explique la baisse d'exactitude des réponses. Il y a donc à la fois retard et perte de robustesse des réponses. Ces processus expliquent en partie une augmentation de la charge mentale consécutive à

¹¹ Les corps genouillés latéraux sont des ensembles de cellules nerveuses (noyaux) situés à l'extrémité postérieure du Thalamus, qui est lui-même une structure majeure de relais systématique des principales afférences et des efférences corticales.

¹² Une commissure est un ensemble de fibres blanches qui relient des zones différentes du cortex cérébral. Les commissures inter-hémisphériques mettent ainsi en relation principalement les zones d'un hémisphère du cerveau aux zones homologues controlatérales.

ce transfert, comme cela a pu être mis en évidence chez les gauchers dans des tâches spatiales traitées et exécutées avec l'hémisphère droit (Faurie, 2006). Il est donc pertinent, pour les HUD, de présenter l'information du côté de la performance latéralisée pour le type d'information considérée, chez chaque sujet.

6.2 Inhibition attentionnelle controlatérale

Certains auteurs ont remarqué une modulation de la baisse de performance en fonction de paramètres attentionnels. Ainsi, bien que les caractéristiques structurales des réseaux nerveux sont majeures, elles doivent être modulées par le fait que l'activité de l'hémisphère dominant pour le langage est « amorcé », permettant un traitement plus efficace de l'information de l'hémichamp droit (Kinsbourne, 1970 ; Kinsbourne & Hicks, 1978) par facilitation attentionnelle, et inhibition de l'hémisphère controlatéral (Chiarello & Maxfield, 1996).

Cette théorie de l'activation intra-hémisphérique de Kinsbourne stipule alors que l'hémisphère concerné présente une disponibilité fonctionnelle facilitée par un déploiement des ressources attentionnelles et une augmentation de l'attention pour l'espace controlatéral à l'hémisphère activé.

L'influence controlatérale correspond quant à elle à une modification de performance du traitement latéralisé par le traitement controlatéral. Ce mécanisme correspond à trois sortes de processus qui se combinent. Tout d'abord, chaque hémisphère ayant la capacité de s'engager dans un traitement inhibe l'autre, ce qui minimise la capacité de traitements parallèles du cerveau (cf. infra) au bénéfice des traitements sériels, diminuant ainsi les conflits possibles, mais augmentant les délais (Cook, 1986). Un second mécanisme correspond à une isolation interhémisphérique, qui, s'il permet de minimiser les interférences entre des tâches conflictuelles, coupe chaque hémisphère des traitements effectués simultanément dans l'autre (Boles, 1990 ; Hellige, 1993). Néanmoins, les performances peuvent être améliorées lorsque les deux hémisphères sont sollicités en même temps. Ceci implique, dans le cas d'une tâche complexe où deux processus conflictuels sont à mettre en oeuvre ensemble, l'engagement simultané des informations (Banich & Beloeur, 1990). Enfin, l'hémisphère peut gêner les traitements effectués dans l'autre hémisphère en lui procurant des informations interférentes. Le traitement d'un hémisphère est alors rendu moins opérant par l'action de l'autre (Clarke *et al.*, 1993).

Par voie de conséquence, le traitement de l'information dans un hémichamp visuel modifie la capacité de traitement d'une information controlatérale. Cette contrainte impose des modes d'affichages HUD temporellement réglés en fonction de la qualité de l'information et de la spatialité d'affichage.

6.3 Informations verbales versus visuo-spatiales

La nature de l'information à traiter est sous la dépendance de la latéralité d'entrée dans le système visuel. Le traitement des informations verbales dépend largement de l'hémisphère gauche et celui des informations visuelles de l'hémisphère droit (Sergent, 1994 ; Springer & Deutsch, 2000), même si l'hémisphère droit est lui aussi capable de traitements élémentaires d'informations verbales.

Des études cliniques ont ainsi mis en évidence le rôle de l'hémisphère droit dans le traitement sémantique. Les premiers travaux sur des patients « split brain », ayant subi une section des commissures interhémisphériques, ont montré qu'une image d'un mot ou d'un objet projetée dans l'hémichamp visuel gauche, et donc seulement traitée par l'hémisphère droit, ne pouvait être dénommée (Sperry, 1961 ; Sperry & Gazzaniga, 1967 ; Sperry *et al.*, 1969). Si ces travaux ont confirmé le rôle majeur de l'hémisphère gauche dans le traitement des informations verbales, ils ont

également mis en évidence la capacité à apparier sémantiquement ces images à des objets palpés traités par le même hémisphère. Bien qu'incapable d'accéder au traitement verbal des mots, l'hémisphère droit peut traiter le sens des informations de l'hémichamp visuel gauche (Springer & Deutsch, 2000).

De tels traitements font également référence aux caractéristiques d'images à pouvoir être traitées en image mentale. La concrétude d'une information correspond au degré auquel un mot réfère à un concept concret (un avion, une piste d'atterrissage, etc. *versus* météorologie, température moteur, etc.). Les informations vues peuvent être plus ou moins concrètes, ou être plus ou moins facilement imageables, c'est-à-dire référées à une image mentale (Paivio, 1991, 2006 ; West & Holcomb, 2000).

La neuroimagerie montre des différences de niveaux comparés d'activation de l'hémisphère gauche et du droit dans le traitement des informations concrètes et abstraites (Fiebach & Friederici, 2003). Les études cliniques montrent que des lésions gauches provoquent des déficits dans les traitements abstraits alors que le concret est mal traité quel que soit l'hémisphère lésé (Christianson *et al.*, 1992 ; Klaver *et al.*, 2005). En fait, le concret permettant un codage à la fois visuel et verbal peut être traité de manière verbale à gauche et/ou imagée à droite, alors que l'abstrait, référant à une information faiblement imageable, ne peut être traité que par l'hémisphère gauche. Cette distinction fonctionnelle découle en fait de la dichotomie verbal/visuo-spatial, qui correspond à une spécialisation latéralisée gauche/droite.

Pour les HUD, la présentation de l'information concrète imageable peut donc s'affranchir de la latéralisation, alors que celle de l'abstrait doit être privilégiée en affichage à droite.

6.4 Autres ségrégations

D'autres dichotomies peuvent être envisagées dans la conception des HUD. Néanmoins, elles semblent moins globales ou évidentes que les précédentes. On peut cependant en citer deux.

Une première repose sur l'opposition analytique/holistique. Elle renvoie à la différence entre un traitement des informations basé sur l'analyse des détails et un autre sur un niveau global des informations. Des études ont mis en évidence une latéralisation préférentielle gauche des traitements locaux ou analytiques et droite des traitements globaux ou holistiques (Martin, 1979 ; Delis *et al.*, 1988). Même si certaines études récentes utilisant le tachistoscope sont en faveur d'une capacité de deux hémisphères à traiter les informations aux deux niveaux (Blanca & Alarcon, 2002), on peut montrer un avantage lors de la reconnaissance d'une forme globale dans le champ visuel gauche (hémisphère droit) et pour la reconnaissance des formes locales dans le champ droit (hémisphère gauche).

Une autre dichotomie est relative au mode sériel ou parallèle du traitement de l'information. Certains travaux montrent que l'hémisphère gauche procède avec performance de manière sérielle alors que l'hémisphère droit permet un traitement parallèle (Cohen, 1973). Les études relatives à ces modes de traitement mettent en place des expériences qui manipulent par exemple le nombre de lettres de mots présentés visuellement (Ellis *et al.*, 1988 ; Lindell *et al.*, 2003). Elles montrent que les présentations dans le champ visuel gauche (hémisphère droit) entraînent des erreurs impliquant un traitement séquentiel et donc sont traitées globalement, en parallèle alors que c'est l'inverse pour les présentations dans le champ visuel droit (hémisphère gauche). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour la distinction analytique *versus* global, et contribuent à comprendre la supériorité du

traitement des images complexes (visages, formes spatiales, etc.) traitées massivement (parallélisme et globalité) dans l'hémichamp visuel gauche et des symboles abstraits (lettres, mots, etc.) traités par unités (séquentialité et détails) dans l'hémichamp droit.

Ces deux ségrégations droite/gauche peuvent également être prise en compte dans les procédures d'affichage des informations basées sur des détails ou des globalités ou sur des aspects sériels ou parallèles de leur traitement.

7 Recommandations pour la conception

La psychophysiologie humaine montre des spécificités de vision dépendantes à la fois des contraintes de l'appareil sensoriel et de celles de l'appareil cognitif. Si les premières contraintes sont bien étudiées, les secondes restent peu exploitées dans la conception des HUD. Or, la situation de pilotage est particulièrement mobilisatrice du traitement visuo-cognitif d'une information complexe, qu'il convient aujourd'hui d'aider par des procédés de « vision tête haute » évolués.

Le premier rôle du HUD est de donner des informations de sécurité, de vol, de navigation et d'environnement de l'aéronef. Insérer un écran semi transparent entre l'œil du pilote et la scène extérieure de vol pose à la fois des problèmes théoriques et pratiques. Si ceux de l'usage et de la codification de la symbologie restent du domaine d'une lourde réglementation internationale et échappent à notre propos, ceux des contraintes d'affichage peuvent être reconsidérés. Ils s'inscrivent notamment dans l'exploitation de caractéristiques facilitant la spontanéité des traitements de l'information, pour améliorer à la fois sa robustesse et le confort d'usage.

La répartition en champs visuels et zone d'attention est une première dimension de la conception, la limitation de présentation dans l'espace tridimensionnel en est une seconde, enfin, la distribution latéralisée des informations en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques en est une troisième.

7.1 Localisation de l'information

La distance de l'œil au dispositif optique du HUD est une des principales contraintes imposées au concepteur. La visière peut être classiquement fixée sur un appareillage semi-mobile, c'est-à-dire solidaire du cockpit. L'utilisateur peut alors conserver une liberté de mouvement de la tête et des yeux par rapport à l'information projetée sur l'écran du HUD.

Dans les HUD de nouvelle génération, inclus dans une visière solidaire du casque, seul le mouvement oculaire est utile dans la recherche de cible, puisque l'écran est mobile avec la tête, imposant une discrimination entre information stable par rapport au champ de vision et celle qui reste localisée, par exemple en incrustation sur le paysage. Ces écrans mobiles imposent donc une nouvelle stratégie de recherche oculaire, puisque ce n'est plus l'image de l'environnement qui est simplement enrichie de manière stable par l'information HUD, mais le champ de vision mobile, et ceci indépendamment de l'image environnementale observée ou augmentée.

De plus, le rapprochement de l'écran dans un rapport approximatif de 1/10 impose une augmentation de la mobilité oculaire. La figure n°11 représente le principe de cette augmentation imposée.

Sur les surfaces projetées des cônes de vision représentées à la figure n°10, on peut imprimer la surface utile d'un HUD fixé sur le cockpit et situé à une distance approximative de 60 cm (HUD fixe - en bleu) et celle d'un HUD de nouvelle génération inclus dans des lunettes de vision solidaires de la tête (HMD - en rouge),

situé approximativement à 4 à 6 cm, et ne laissant que la mobilité oculaire à l'utilisateur par rapport à la saisie de l'information.

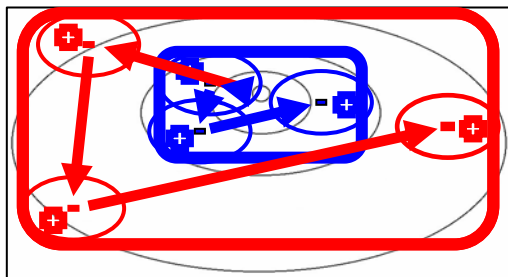


Figure 11. Représentation schématique du principe de rapprochement de l'écran HUD sur les surfaces des cônes de vision (en bleu : HUD fixe sur cockpit ; en rouge : HUD sur lunettes solidaires de la tête). Les croix indiquent des cibles (resp. bleues et rouges) et les flèches représentent la distance de mobilité oculaire afin de mettre les cibles dans l'espace de veille attentionnelle.

Les cibles visuelles surajoutées dans le champ visuel et projetées sur l'écran (par exemple indiquées par des croix dans la figure 11) nécessitent une moins grande taille pour les écrans proches (Ziefle, 1998). En conservant une localisation de l'information similaire sur celui-ci, on repère facilement l'augmentation de mobilité oculaire depuis le point central du champ afin de saisir l'information dans l'espace de veille attentive (20 à 30°), approximativement 4 fois plus dans l'exemple donné.

Les mouvements oculaires mis en œuvre dans les stratégies de poursuite ont pour objectif la capture visuelle de la cible et son ancrage oculaire dans la zone fovéale ou parafovéale jusqu'à ce que les informations utiles soient traitées (Quéré, 2005 ; Rigal, 2002). Cette poursuite oculaire est génératrice de fatigue et a des conséquences sur l'équilibre (Cail & Salsi, 1992 ; Cheneau, 2005 ; Chi & Lin, 1997 ; Rougier & Garin, 2006 ; Speeg-Schatz *et al.*, 2001).

La contrainte de conception est alors de minimiser les mouvements imposés en facilitant le traitement périphérique de l'information en fonction des attentes de latéralité ou en recentrant celle-ci dans le champ de veille attentionnelle. Dans le premier cas, c'est la latéralité cognitive qui doit imposer la qualification de l'information, dans le second, on doit permettre la fusion binoculaire en donnant une information monoculaire référée à la distance de fixation.

7.2 Signification des informations

Une des caractéristiques des champs visuels périphériques est leur pauvre sensibilité à la couleur et leur bonne aptitude à la perception des mouvements. Elle transforme ce domaine en système d'alarme qui permet, par détection d'un mouvement, la centration du regard vers la cible concernée (Oger-Lavenant, 2005) et, par là, la récupération de l'analyse chromatique.

Au-delà de la prise en compte technologique des capacités propres aux domaines ophtalmologique ou neurologique (Biderman, 1992 ; Melzer & Moffitt, 1997) et notamment en condition d'excentricité (Jarret, 2005 ; Naili *et al.*, 2006), celle des caractéristiques cognitives des informations surajoutées dans le champ visuel peut permettre une amélioration de la symbologie. Il convient alors d'ajouter les informations contextuelles à la périphérie, en respectant le tableau des latéralités (cf. tableau n°1).

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| champ visuel gauche | champ visuel droit |
| hémisphère droit | hémisphère gauche |
| non verbal | verbal |
| visuospatial | linguistique |
| holistique (gestalt) | analytique |
| parallèle | séquentiel |
| complexe | linéaire |
| intuitif (images mentales ...) | logique et rationnel |
| inconscient | conscient |
| automatique | contrôlé |
| circulaire | progressif |
| concret | abstrait |
| pensée appositionnelle | pensée propositionnelle |
| images | dessin, lignes |
| pictographique | alphabétique |
| métaphore | dénotation |

Tableau 1. Répartition schématique des performances latéralisées d'après Hubel (1988)

L'effet de fusion sensorielle peut également être utilisé puisque les deux yeux sont traités par des displays différents. La réflexion peut porter à la fois sur la latéralité des informations surajoutées, mais également sur leur capacité à être combinées sur deux yeux. La figure n°12 donne un exemple d'une disposition inspirée de Klopffstein dans laquelle les informations du vol nécessitant une poursuite fovéale restent en binoculaire et où les informations secondaires peuvent être traitées de manière imagée (images, vecteurs, niveaux, couleurs) en parallèle à gauche, et symbolique (lettres et chiffres, icônes significantes, etc.) distribuées en alternance à droite.

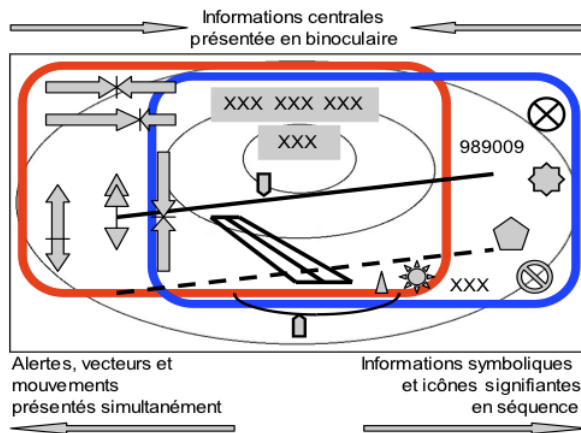


Figure 12. Principe de présentation informationnelle périphérique respectant la latéralité périphérique du champ de vision (œil gauche en rouge, œil droit en bleu)

7.3 Latéralité et latéralisation

Si la dominance cérébrale correspond à la prépondérance du rôle de l'un ou l'autre des hémisphères cérébraux pour une fonction sensorielle, cognitive ou motrice déterminée, on repère néanmoins environ 7% de sujets inversé (Bérubé, 1991). Si, pour la grande majorité des sujets droitiers, les dominances sont stabilisées (Rasmussen & Milner, 1975), le problème des gauchers se pose de manière différente.

Chez les gauchers, seuls 30% présentent un hémisphère droit dominant (Rasmussen & Milner, 1977 ; Josse & Tzourio-Mazoyer, 2004). On trouve de nombreux cas atypiques avec des dominances de droitiers ou même des dominances bi hémisphériques. Globalement, la dominance de l'hémisphère droit augmente de façon linéaire selon le degré de gaucherie (Knecht *et al.*, 2000).

Ce problème de la non stabilité des dominances pour les usagers gauchers pose évidemment un problème de conception. Une solution consiste alors à proposer un appareillage présentant une interface stabilisée pour les droitiers, et laissant une option à l'utilisateur principal d'inversion des informations périphériques selon le confort ressenti.

8 Conclusion

Si l'homme augmenté n'est plus un projet mais devient plus chaque jour une réalité technologique, la vision tête haute est un exemple de cette augmentation dans le domaine cognitif. Son utilité n'est d'ailleurs plus à démontrer pour certaines situations de travail et de prise d'informations complexes.

La conception des HUD, et notamment des HMD, interroge trois dimensions de la recherche : d'une part l'adaptation de l'information surajoutée en fonction d'une part des nécessités du vol et de la réglementation, d'autre part des contraintes technologiques et des critères optiques de la réalisation des appareillages, et enfin de critères psychophysiologiques, ophtalmologiques et neuro-ophtalmologiques des usagers.

De nouveaux travaux ont été entrepris par certains constructeurs abordant le volet cognitif des aptitudes de l'utilisateur. Un des domaines qui semblent peu étudiés est celui des capacités visuelles partagées en fonction de la latéralisation excentrée des informations. Outre le fait que cette prise en considération doit permettre de réduire la fatigue et améliorer la robustesse de l'information, elle autorise la combinaison d'information dans des configurations jusqu'ici peu connues des concepteurs.

La recherche dans le domaine présente une certaine originalité : elle associe sur un même projet les entreprises qui développent ces technologies et les laboratoires académiques qui en dégagent et évaluent les contraintes de la conception (Fouillat & Clavierie, 2009 ; Clavierie & Jecko, 2009). Il convient pourtant encore d'inciter les spécialistes de l'ingénierie, notamment celle des HUD, à prendre en compte les critères exploités dans un travail de validation permettant de faire évoluer les normes actuelles et les réglementations, pour une réelle meilleure augmentation cognitive en situation de pilotage ou de contrôle.

9 Remerciements

Ce travail a fait l'objet d'un financement de l'ISCC¹³ (appel d'offre 2008) et d'un soutien du laboratoire HEAL – « Albatros » Thales-Université de Bordeaux).

¹³ Institut des Sciences de la Communication du CNRS (ISCC).

Bibliographie

- Alter-Snpl-Spac (collectif) (2002). *Groupe de travail Airbus A380. L'instrumentation du 3^{ème} millénaire : Rapport conjoint du Syndicat du personnel navigant technique d'Air-France, du Syndicat national des pilotes de ligne, et du Syndicat des pilotes de l'aviation civile*. Roissy : 20 juillet 2003.
- Aymeric, B., Leger, A. & Kostoj, T. (1998). The 2nd decision in EVS concept: an experiment to evaluate pilots' ability. *Proceedings of the Signal processing, sensor fusion, and target recognition conference VII*. Orlando (Florida-USA) : 13-15 Avril 1998.
- Banich, M. & Beloer, A. (1990). Interhemispheric interaction: How do the hemisphere divide and conquer a task ? *Cortex*, 26:77-94.
- Beaumont, J.G. (1982) (Ed.). *Divided visual field studies of cerebral organisation*. Academic Press, Londres (GB).
- Bérubé, L. (1991). *Terminologie de neuropsychologie et de neurologie du comportement*. Les Éditions de la Chenelière, Montréal.
- Biderman, L.M. & Allusi, E.A. (1992). Pilot errors involving head-up displays (HUDs), helmet-mounted displays (HMDs) and night vision goggles (NVGs). Institute of Defence Analysis. Virginia *IDA paper*, P-2638.
- 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.
- Blanca, M. & Alarcon, R. (2002). Hemispheric differences in global and local processing with orientation classification tasks. *Neuropsychologia*, 40:957-963.
- Boles, D. (1990). What bilateral displays do? *Brain and Cognition*, 12:205-228.
- 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*, 57-61.
- Braun, C.M.J., Collin, I. & Mailloux, C. (1997). The "Poffenberger" and "Dimond" paradigms: Interrelated approaches to the study of interhemispheric dynamics. *Brain and Cognition*, 34:337-359.
- Bulirsch, R., Montrone, F. & Pesch, H.J. (1991). Abort landing in the presence of windshear as a minimax optimal control problem. *Journal of optimization theory and applications*, 70(1):1-23.
- Byrne, M. D. & Kirlik, A. (2004). Integrated modeling of cognition and the information environment : A multilevel investigation (process and product modeling) of attention allocation to visual displays. University of Illinois Institute of Aviation Technical Report *AHFD-04-14/NASA-04-4*. University of Illinois Press, Savoy (Illinois-USA).
- Cail, F. & Salsi, S. (1992). *La fatigue visuelle*. Notes de l'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. INRS éditions, Paris (France).

- Champion, L. (2005). Les « trois degrés » de la vision binoculaire. In *Bases cliniques de la sensori-motricité*. A. Péchereau, J. Richard (Eds.), *Cahiers de Sensori-Motricité*, XIIIème colloque. FNRO Editions, Nantes (France), 89-90.
- Charbonneau, M., Priot, A.E., Roumes, C. & Leger, A. (2008). Comparative effects of vergence/accommodation conflicts with different interocular separation and viewing distances. In *Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics II. Head- and Helmet-Mounted Displays XIII : Design and Applications*. J.T. Thomas, A. Malloy (Eds.). Orlando (Florida-USA) : 20 mars 2008. *Proceedings of SPIE*, vol. 6955, 69550J1-69650J12.
- Cheneau, V. (2005). La fatigue oculaire. *Travail et sécurité*, 650:26-29.
- Chi, C.F. & Lin, F.T. (1997). A new method for describing search patterns and quantifying visual load using eye movement data. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(3):249-257.
- Chiarello, C. & Maxfield, L. (1996). Varieties of interhemispheric inhibition, or how to keep a good hemisphere down. *Brain and Cognition*, 30:81-108.
- Christianson, S.A., Nilsson, L.G., Silfvenius, H. & Säisä, J. (1992). Visual half field testing of memory functions in patients considered for surgical treatment of intractable complex partial epilepsy. *Acta Neurologica Scandinavica*, 86:545-554.
- Clarke, J., Lufein, R. & Zajoel, E. (1993). Corpus callosum morphometry and dichotic listening performance: individual differences in functional interhemispheric inhibition. *Neuropsychologia*, 31:547-557.
- Claverie, B. (1999). Les Méthodes en Psychophysologie. In *Les Méthodes de Recherche en Psychologie*, J.P. Rossi (Ed.), Dunod, Paris (France).
- Claverie, B. & Fouillat, P. (2009). L'innovation comme moteur d'évolution des technologies de l'information ; vers un rapprochement des techniques et des usages. *I-Reviews - Edition électronique de l'INIST - Information, Innovation et Interdisciplinarité*. Nancy : Institut National de l'Information Scientifique et Technique du CNRS. Disponible à <http://hdl.handle.net/2042/28892>.
- Claverie, B. & Jecko, J.R., (2009). Technologies de la connaissance : l'exemple d'un partenariat « entreprise - grande école - pôle de compétitivité ». In (collectif) *Pour une nouvelle recherche – Manifeste*. Institut des Sciences de la Communication du CNRS (Ed.), Editions Ovadia, Nice (France), coll. La petite collection : Paradoxe & Complexité, 63-72.
- Cohen, G. (1973). Hemispheric differences in serial versus parallel processing. *Journal of Experimental Psychology*, 97:349-356.
- Cook, N. (1986). *The brain code: mechanisms of information transfert and the role of the corpus callosum*, Methnen, Londres (GB).
- Crawford, J. & Neal, A. (2006). A Review of the Perceptual and Cognitive Issues Associated With the Use of Head-Up Displays in Commercial Aviation. *International Journal of Aviation Psychology*, 16(1):1-19.
- De Bideran, M. (2005). Espace visuel et vision binoculaire. In *Bases cliniques de la sensori-motricité*. *Cahiers de Sensori-Motricité*, A. Péchereau, J. Richard (Eds.), XIIIème colloque, FNRO Editions, Nantes (France), 77-79.

- Debiesse, B., Marzuoli, H. & Tourdjman, C. (2005). Gilbert Klopstein - Le père du Head Up Display. *Revue "Pilote de Ligne"* du Syndicat National des Pilotes de Ligne - SNPL France ALPA 12:28-32.
- Delis, D., Kiefner, M. & Fridlunu, A. (1988). Visuospatial dysfunction following unilateral brain damage: dissociations in hierarchical and hemispacial analysis. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 10:421-431.
- 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.
- Dimond S. & Beaumont, J.G. (1972). Processing in perceptual integration between and within the cerebral hemispheres. *British Journal of Psychology*, 63:509-514.
- Ellis, A., Young, A. & Anderson, C. (1988). Modes of word recognition in the left and right cerebral hemispheres. *Brain and Language*, 35(2):254-273.
- Espinasse-Berrod, M.A. (2005). Disparité de fixation et diplopie physiologique. In *Bases cliniques de la sensori-motricité. Cahiers de Sensori-Motricité*, A. Péchereau, J. Richard (Eds.), XIIIème colloque, FNRO Editions, Nantes (France), 85-87.
- Faure, S. (2001). Stimulation en champ visuel divisé et spécialisation hémisphérique pour l'activité lexicosémantique. In *Les méthodes de la neuropsychologie*, F. Eustache, B. Lechevalier, F. Viader (Eds.), De Boeck, Bruxelles (Belgique), 109-136.
- Faurie, C. (2006). Gauchers : rares mais habiles. *Cerveau et Psycho*, 19:2-5.
- Fiebach, C. & Friederici, A. (2003). Processing concrete words: fMRT evidence against a specific right hemisphere involvement. *Neuropsychologia*, 42:62-70.
- Fouillat, P. & Clavierie, B., (2009). Pour un rapprochement des technologies et des usages : le futur du pôle TIC de Bordeaux. In (collectif) *Pour une nouvelle recherche – Manifeste*. Institut des Sciences de la Communication du CNRS (Ed.), Editions Ovidia, Nice (France), coll. La petite collection : Paradoxe & Complexité, 93-99.
- Foxlin, E., Altshuler, Y., Naimark, L. & Harrington, M. (2004). Flight Tracker: a novel optical/inertial tracker for cockpit enhanced vision. *Proceedes of the 3th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Arlington (Virginia-USA) : 2-5 novembre 2004. Issues: 212-221.
- Frahm, J.M. (2006). Computer Vision for Augmented Reality: ISMAR Tutorial 1 (coordinator). *5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Santa-Barbara (California-USA): 22-25 octobre 2006.
- Fuchs, H., Livingston, M.A., Raskar, R., Colucci, D., Keller, K., State, A., Crawford J.R., Rademacher, P., Drake, S.H. & Meyer, A.A. (1998). Augmented Reality Visualization for laparoscopic surgery with HMD. *Lecture Notes in Computer Science*, 1496:934-943.
- Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B. & Manguin, G.R. (2001). *Neurosciences cognitives : la biologie de l'Esprit*, De Boeck : Bruxelles (Belgique).
- Haritos, T. & Macchiarella, N.D. (2005). A mobile application of augmented reality for aerospace maintenance training. *24th Digital Avionics Systems Conference*. Washington DC: 31 octobre - 3 novembre 2005. 5.B.3 - 5.1-9.
- Hellige, J.B. (1993). *Hemispheric asymmetry: what's right and what's left?* Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts-USA).

- Hellige, J.B. (1996). Divided visual field techniques. In *The Blackwell dictionary of neuropsychology*, J.G. Beaumont, P.M. Knealy, M.J.C. Rogers (Eds.), Blackwell, Cambridge (Massachusetts-USA).
- Hellige, J.B. & Sergent, J. (1986). Role of task factors in visual field asymmetries. *Brain and Cognition*, 5:200-222.
- Hiatt, K.L. & Rash, C.E. (2005). AH-64 aviator impressions of IHADSS HMD flight in Operation Iraqi. In *Helmet- and head-mounted displays X: Technologies and applications*, C.E. Rash, C.E. Reese (Eds.). Orlando (Florida) : 29 march 2005. *Proceedings of the SPIE*, vol. 5800, 187-192.
- Ho, H., Saeedi, E., Kim, S.S., Shen, T. & Parviz, B.A. (2008). Contact lens with integrated inorganic semiconductor devices. *21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2008 Conference)*. Tucson (Arizona-USA): 13-17 janvier 2008.
- Hubel, D. (1988). *Eye, brain and vision*, American Scientific Library, New-York (USA).
- Jacobs, R.S., Triggs, T.J. & Aldrich, J.W. (1970). Helmet-mounted display/sight system study. *USAF Technical report AFFDL-TR-70-83*, 1.
- Jarmasz, J., Herdman, C. & Johannsdottir, K.R. (2005). Object-based attention and cognitive tunneling. *Journal of Experimental Psychology*, 11(1):3-12.
- Jarret, D.N. (2005). Helmet-mounted display systems. In *Cockpit engineering*, D.N. Jarret (Ed.). Aldershot (Hamshire-GB) : Ashgate Publishing Limited, 213-244.
- Josse, G. & Tzourio-Mazoyer, N. (2004). Hemispheric specialization for language. *Brain Research Reviews*, 44:1-12.
- Kalich, M.E., Lont, L.M., Bisette, G.M. & Jones, H.D. (2006). New vision performance indicators of biocular head-mounted display image misalignment. *Helmet- and head-mounted displays XI: Technologies and applications*. Kissimmee (Florida-USA): 17-18 Avril 2006. *Proceedings of the SPIE*, vol. 6224, 801-812.
- Kimura, D. (1969). Spatial localization in left and right visual fields. *Canadian Journal of Psychology*, 23:445-448.
- Kinsbourne, M. (1970). The cerebral basis of lateral asymmetries in attention. *Acta Psychologica*, 33:193-201.
- Kinsbourne, M. & Hicks, R.E. (1978). Mapping cerebral functional space: competition and collaboration in human performance. In *Asymmetrical function of the brain*, M. Kinsbourne (Ed.), Cambridge University Press, Londres (GB), vol. 198, 1-31.
- Klaver, P., Fell, J., Dietl, T., Schur, S., Schaller, C., Elgee, C. & Fernandez, G. (2005). Word imageability affect the hippocampus in recognition memory. *Hippocampus*, 15:704-712.
- Klopfstein, G. (1977). Autour d'une polémique. *Icare*, 82:9.
- Knecht, S., Dager, B., Deppe, M., Hoae, L., Lohmann, H., Floel, A., Ringelstein, E.B. & Henningsen, H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123:2512-2518.

- Lami, R. (1996). Historique des Collimateurs. *Icare*, 159:132.
- Le Blaye, P., Roumes, C., Fornette, M.P. & Valot, C. (2002). *Head Up Displays symbology (HUD): a pre normative study for DGAC/SFACT*. ONERA Technical Report 2/05007: juin 2002.
- Le Blaye, P. & Valot, C. (2005). *Vers un guide méthodologique pour l'évaluation FH des collimateurs tête haute (HUD)*. ONERA Rapport technique RF 1/04710 DCSD : mai 2005.
- Leger, A. (1994). La suppléance visuelle dans le pilotage des voilures tournantes : aspects facteurs humains et perspectives d'évolution. *Proceedings of All Weather Night and Day Rotorcraft Operations*. Valence (France) : 5-7 avril 1994.
- Leger, A. & Aymeric, B. (1999). Human factor issues associated with HUD-based hybrid landing systems: Sextant's experience. *4th World Aviation Congress and Exposition*. San Francisco (California-USA): 19-21 octobre 1999.
- Leporé, F., Ptito, M. & Jasper, H.H. (Eds.) (1986). *Two hemispheres - one brain: function of the corpus callosum*. New York: Alan R. Liss Inc..
- Lindell, A., Nicholls, M. & Castles, A. (2003). The effect of orthographic uniqueness and deviation points on lexical decisions: evidence from unilateral and bilateral redundant presentations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56A(2):287-307.
- MacCann, R. S., Foyle, D. C. & Johnston, J. C. (1993). Attentional limitations with head-up displays. *Proceedings of the 7th international Symposium on Aviation Psychology*, 70-75.
- Martin, M. (1979). Hemispheric specialization for local and global processing. *Neuropsychologia*, 17(1):33-40.
- 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*, 50-54.
- McDougall, S., Tyrer, V., Folkard, S. (2006). Searching for signs, symbols, and icons: Effects of time of day, visual complexity, and grouping. *Journal of Experimental Psychology*, 12(2):118-128.
- McLean, W.E. (1998). Optical designs. In *Helmet Mounted Displays (HMD): design issues for rotary-wing aircraft*, C.E. Rash (Ed.), U.S. Army Aeromedical Research Laboratory editions, Fort Rucker (Alabama-USA), 3.
- Melzer, J. E. & Moffitt, K. (1997). *Head mounted displays: Designing for the user*. McGraw-Hill, New-York (USA).
- 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.
- Naïli, F., Desprez, P. & Boucart, M. (2006). Colour recognition at large visual eccentricities in normal observers and patients with low vision. *NeuroReport*, 17:1571-1574

- Naish J. M. (1963) Properties of a head up display relevant to approach and landing. *15th LATA Technical conference*, Lucerne (Suisse), 106.
- Oger-Lavenant, F. (2005). Le voir et le regarder : les correspondances rétinienne et motrices. In A. Péchereau, J. Richard (Eds.), *Bases cliniques de la sensori-motricité. Cahiers de Sensori-Motricité*, XIIIème colloque. FNRO Editions, Nantes (France), 81-83.
- Paivio, A. (1991). Dual coding theory: retrospect and current status. *Canadian Journal of Psychology*, 45:255-287.
- Paivio, A. (2006). *Mind and its evolution: a dual coding theoretical interpretation*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah (New-Jersey-USA).
- Prinzel, L.J., Comstock J.R., Glaab, L.J., Kramer, L.J., Arthur, J.J., & Barry, J.S. (2004). The efficacy of head-down and head-up synthetic vision display concepts for retro and forward fit of commercial aircraft. *The International Journal of Aviation Psychology*, 14(1):53-77.
- Priot, A.E., Charbonneau, M. & Paillé D. (2008). Spatial constraints for 3D perception in Helmet-Mounted Displays. In *Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics II*, J.T. Thomas, A. Malloy (Eds.). Head- and Helmet-Mounted Displays XIII: Design and Applications. Orlando (Florida): 20 mars 2008. *Proceedings of SPIE*, vol. 6955, 69550G1- 69550G7.
- Quéré, M.A. (2005). Équilibre oculomoteur stato-cinétique : Fovéa et tonus oculogyre. In *Bases cliniques de la sensori-motricité*, A. Péchereau, J. Richard (Eds.). *Cahiers de Sensori-Motricité*, XIIIème colloque. FNRO Editions, Nantes (France), 43-50.
- Rasmussen, T. & Milner, B. (1975). Clinical and surgical studies of the cerebral speech areas in man. In *Cerebral localization*. Springer Verlag, New York (USA), 238-257.
- Rasmussen, T. & Milner, B. (1977). The role of early left brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. *Journal of the New York Academy of Sciences*, 299:355-369.
- Rigal, R. (2002). La coordination visuo-manuelle. In *Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques – Volume 2 : motricité oculaire*. Presses Universitaires du Québec, Québec (Canada), 649-661.
- Rock, E. (2001). *La perception*. DeBoeck, Bruxelles (Belgique).
- Rougier, P. & Garin, M. (2006). Performing saccadic eye movements modifies postural control organisation. *Clinical Neurophysiology*, 36(4):235-243.
- Roumes, C., Valot, C. (2002). *Head Up Displays symbology (HUD) : Pre normative study for DGAC/Service de la Formation Aéronautique et du Contrôle Technique*. Final report (phase I). SFACT, Toulouse.
- Schaefer, H. (2003). *Kalibrierung für Augmented Reality*. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie, Diplomarbeit, unveröffentlicht.
- Sergent, J. (1994). Spécialisation fonctionnelle et coopération des hémisphères cérébraux. In *Neuropsychologie humaine*, X. Seron, M. Jeannerod (Eds.), Mardaga éditeur, Bruxelles (Belgique), 106-125.

- Smith, W. J. (1990). *Modern optical engineering: the design of optical systems*. McGraw-Hill, New-York (USA).
- Speeg-Schatz, C., Hansmaennel, G., Gottenkiene, S. & Tondre, M. (2001). Travail sur écran et fatigue visuelle et son évolution après prise en charge ophtalmologique. *Journal français d'ophtalmologie*, 24(10):1045-1052.
- Sperry, R.W. (1961). Cerebral organization and behavior. *Science*, 133:1749-1757.
- Sperry, R.W. & Gazzaniga, M.S. (1967). Language following disconnection of the hemispheres. In *Brain mechanisms underlying speech and language*, C.H. Millikan, F.L. Darley (Eds.), Grune and Stratton Inc., New-York (USA), 177-184.
- Sperry, R.W., Gazzaniga, M.S. & Bogen, J.E. (1969). Interhemispheric relationships: the neocortical commissures, syndromes of hemisphere disconnection. In *Handbook of Clinical Neurology*, P.J. Vinken, G.W., Bruyn (Eds.), North-Holland, Amsterdam (Pays Bas), vol. 4, 177-184.
- Springer, S. & Deutsch, G. (2000). *Cerveau gauche, cerveau droit : à la lumière des neurosciences*. De Boeck, Bruxelles (Belgique).
- Steenblik, J.W. (1992). Enhanced vision systems: Toward the autonomous airplane. *Air Line Pilot*, 12:22-25.
- Stuart, G.W., Flanagan, P. & Gibbs, P. (2007). Hyperstereopsis in helmet-mounted NVDs: slope perception. In *Head- and Helmet-Mounted Displays XII: Design and Applications*, W. Randall, W. Brown, C.E. Reese, P.L. Marasco, T.H. Harding (Eds.). Orlando (Florida-USA), 1 mai 2007. *Proceedings of SPIE*, vol. 6557, 75570K1-75570K8.
- Tang, A., Owen, C., Biocca, F. & Mou, W. (2003). Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly. *Proceedings of the SIGCHI (Special Interest Group on Computer-Human Interaction) conference on human factors in computing systems*. Fort Lauderdale (Florida-USA): 5-10 avril 2003. CHI letters, 5, 1, 73-80.
- Tilloy, H. (2005). La vision synthétique perce les brouillards. *Air et Cosmos*, 1983:30-36.
- Tonnis, M., Sandor, C., Klinker, G., Lange, C. & Bubb, H. (2005). Experimental evaluation of an augmented reality visualization for directing a car driver's attention. *Proceedings of the 4th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR 2005. Vienne (Autriche): 5-8 Octobre 2005. Issues: 56-59.
- 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.
- Viviani P. (1994). Les habiletés motrices. In *Traité de Psychologie Expérimentale*, M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), Presses Universitaires de France, Paris (France), vol. 1, 777-857.
- Weintraub, D.J. & Ensing, M.J. (1992). *Human factors issues in hard up display design: the book of HUD*. SOAR Crew Station Ergonomics Information Analysis Center. State of the Art Report 92-2. Air Force Aerospace Medical research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base (Ohio-USA).

West, W. & Holcomb, P. (2000). Imaginaire, semantic, and surface level processing of concrete and abstract words: an electrophysiological investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(6):1024-1037.

Wickens, C.D. & Ververs, P.M. (1998). *Allocation of Attention with Head-Up Displays*. Final report ADA359344 for the US Department of Transportation Office of Aviation Medicine, Washington. DOT/FAA/AM-98-28.

Wickens, D.W. & Hollands, J.G. (2000). *Engineering psychology and human performance*. Prencipe Hall, Upper Saddle River (New-Jersey-USA).

Zaidel, E. (1986). Callosal dynamics and right hemisphere language. In *Two hemispheres - one brain: functions of the corpus callosum*, F. Leporé, M. Ptito, H.H. Jasper (Eds.), Alan R Liss Inc , New-York (USA) 435-461.

Ziefle, M. (1998). Effects of display resolution on visual performance. *Human Factors*, 40(4):554-568.