

L'évaluation de la sécurité lors de la validation de nouveaux concepts dans les systèmes complexes et ultra-sûrs : l'exemple du contrôle du trafic aérien

**J.Y. Grau, L. Guichard, F. Drogoul,
S. Guibert et G. Gawinowski**
EUROCONTROL, Experimental Centre
"Innovative Research" Business Area
BP 15, F-91222 Brétigny-sur-Orge Cedex
FRANCE

SUMMARY

The air traffic growth leads to develop new air traffic control and management concepts for assuring the traffic fluidity and keeping ultra-safe the air traffic system. Most of these concepts are designed by integrating new technologies and automated systems, and the interactions of humans with these systems need to be safe. Safety assessment of man-machine interactions by using simulation devices is not an easy task. The rates of accidents, incidents and human errors do not allow to investigate all safety components. For overpassing these limitations, we have led an exploratory project: the Look project. The Look purpose was to define methodological guidelines for assessing safety from a "human factors" point of view. In this way, study was focused on the theoretical frames of organisational safety, ecological safety and situated cognition, and six safety features were identified for leading the validation process. An experimentation with eight Air Traffic Controllers from two en-route air traffic control centres was led. The LOOK results are one first step allowing to propose guidelines for designing simulation and assessing safety. More studies need to be achieved for defining a full methodology.

1.0 INTRODUCTION

Le contrôle aérien est confronté à un accroissement permanent du trafic aérien : 50% d'augmentation dans les années 90, et des prévisions de l'ordre de 3 à 4% de plus par an en Europe de 2003 à 2010 et ce, en dépit des événements du 11 septembre 2001 (Eurocontrol, 2001). La mission des organismes de navigation aérienne est d'écouler avec régularité et en toute sécurité le trafic aérien. Pour faire face à ce défi, le contrôle aérien s'adapte en permanence autour d'une donnée incontournable qui est celle de la capacité du contrôleur aérien à contrôler simultanément un certain nombre d'aéronefs. Dans le contrôle en-route (contrôle des aéronefs lorsqu'ils sont en croisière), cette capacité est de l'ordre de 10 à 15 avions suivant la complexité de l'espace à contrôler. Il en résulte qu'une augmentation de trafic va se traduire dans les salles de contrôle par une répartition du trafic entre un plus grand nombre de contrôleurs, chaque équipe de contrôleurs étant en charge d'un espace aérien de plus en plus petit pour respecter cette capacité maximale. En démultipliant les secteurs, on réduit la charge de travail liée au contrôle et on accroît celle liée à la coordination des aéronefs entre les secteurs. Cette adaptation atteint aujourd'hui ses limites car on ne peut démultiplier sans cesse les secteurs de contrôle sans perdre leur valeur opérationnelle et en imposant aux contrôleurs des charges de travail supplémentaires (plusieurs secteurs prenant en charge un même avion et prédominance des coordinations sur le contrôle). On en arrive à ce que l'on appelle un véritable « mur de la capacité » (Villiers, 1997) qu'on ne peut dépasser que par la mise en oeuvre de nouveaux concepts de contrôle et de gestion du trafic aérien.

Une des solutions pour dépasser le « mur de la capacité » est de proposer aux contrôleurs des aides automatisées. Les aides envisagées concernent l'optimisation des flux de trafic, la gestion des conflits,

Communication présentée lors du Symposium RTO HFM sur « Le rôle de l'être humain dans les systèmes automatisés intelligents », organisé à Varsovie, en Pologne, du 7 au 9 octobre 2002, et publiée dans RTO-MP-088.

la prévention des situations critiques et la coopération entre les acteurs du trafic aérien. Dans cette perspective, il incombe au Centre Expérimental d'Eurocontrol¹ de développer et de valider sur un plan sécuritaire et opérationnel les nouveaux outils et concepts. La simulation est une étape incontournable dans le processus de validation des nouveaux concepts pour le contrôle aérien. Pour cela, le centre dispose de plateformes de simulation « pleine échelle » qui permettent de simuler les conditions rencontrées dans les salles de contrôle.

L'évaluation sécuritaire d'un nouveau concept ne peut se faire sans prendre en compte les composantes facteurs humains de la sécurité. On est obligé de constater que si beaucoup de travaux dans la littérature traitent des aspects facteurs humains de la sécurité, on ne dispose pas de définition opérationnelle de la sécurité ni de méthodes d'évaluation spécifiques dans une perspective facteurs humains (Rochlin, 2001). Cela conduit à s'interroger sur la place des facteurs humains dans la sécurité et à rechercher les principes d'une analyse sécuritaire lors d'un processus de validation en simulation d'un nouveau concept.

2.0 LA SECURITE DANS LE CONTROLE AERIEN

2.1 La sécurité : l'absence de risque

Dans le monde professionnel, la sécurité est appréhendée sous différentes facettes. Une première facette est de la définir par rapport à un niveau acceptable de risque, c'est à dire une production observable et quantifiable. Une telle définition répond à des préoccupations politiques ou de management, mais aussi d'attentes du grand public au regard de l'image sécuritaire qui est donnée du système. Paradoxalement dans cette approche, la sécurité n'est pas définie en tant que telle, mais à partir de son contraire : le risque. La sécurité est l'absence de risque. Le courant basé sur l'évitement du risque se confond avec les approches fiabilistes développées par les concepteurs. Il connaît une large audience car il s'accompagne de métriques pour quantifier, évaluer et prédire le risque. Les méthodes développées à l'origine dans une perspective exclusive de fiabilité technique, intègrent de plus en plus les composantes humaines et situationnelles. Des auteurs comme Shorrock et Kirwan avec TRACER (1999) ou Hollnagel avec CREAM (1998) proposent à partir des modèles développés par les sciences cognitives sur la performance et l'erreur humaine des méthodes d'analyse rétrospective et prospective de la sécurité. Ces approches s'inscrivent dans une perspective où la sécurité se construit autour de l'opérateur et de la relation homme-machine et où l'opérateur est considéré sous l'angle de ses limites de capacité et de performance. Le paradigme d'étude de la sécurité est alors de mettre en évidence les défaillances dans les relations homme-machine, de les étudier en profondeur pour connaître leurs causes et de prendre les mesures correctives adéquates.

Dans la même perspective, nombre de travaux dans la littérature abordent la sécurité à travers l'étude des grandes fonctions cognitives et psychosociales pour expliquer les défaillances : perception, situation awareness, prise de décision, communication, synergie, charge de travail, stress, etc. L'hypothèse sous-jacente est que ces grandes fonctions ont un lien direct avec la sécurité dans le sens où meilleure sera la performance de la fonction cognitive, meilleure sera la sécurité. Cela n'est pas faux, mais n'est pas suffisant pour évaluer la sécurité qui est beaucoup plus complexe comme on le verra plus loin. Si ces travaux sont importants pour poser les éléments de base de la sécurité, ils ne représentent qu'une approche modulaire qui n'intègre pas les relations entre ces modules. Ce manque est d'autant plus pénalisant que dans les systèmes complexes, les contraintes situationnelles mettent quotidiennement les opérateurs face à des charges de travail élevées, à des situations de stress ou à des conditions de travail collectif dégradées, et que malgré cela, la sécurité est assurée. Les mesures de ces fonctions ne sont alors qu'un reflet distant de la sécurité du système.

¹ Eurocontrol est l'organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne. L'organisation regroupe 31 états membres, son siège est à Bruxelles et elle dispose d'un centre expérimental situé à Brétigny-sur-Orge en France.

2.2 Les indicateurs de la sécurité

Devant la difficulté à définir la sécurité, une autre façon de l'envisager consiste à essayer de la mesurer. Cette approche peut paraître paradoxale car les indicateurs de mesure sont d'autant plus pertinents que la définition est précise et valide. La sécurité est un concept partagé par un grand nombre d'acteurs bien que chacun de ces acteurs puissent avoir des objectifs sous-jacents différents : image des actions entreprises pour la sécurité, conséquences humaines, conséquences matérielles, conséquences économiques, image sur le grand public. On voit là se dessiner un grand nombre d'indicateurs qui peuvent être utilisés pour évaluer la sécurité. Pour le contrôle aérien, l'indicateur le plus utilisé est celui des accidents. Cependant, l'aéronautique et encore plus le contrôle aérien est un système socio-technique particulier puisqu'il peut être qualifié selon les critères énoncés par Amalberti (2001) de système ultra-sûr, c'est-à-dire que l'occurrence d'accident est inférieure à 10^{-5} . A ce taux de fiabilité, comme le dit Reason (1997), l'accident n'est pas le reflet exclusif du niveau de sécurité car les facteurs liés à la chance prennent le dessus sur les actions développées par l'organisation pour assurer la sécurité. Par ailleurs sur un plan préventif, plus l'accident est rare, plus il est difficilement prédictible car il résulte de la combinaison imprévue de petits éléments.

C'est pour cela que les incidents sont aussi considérés comme des marqueurs pertinents de la sécurité. L'incident dans le contrôle aérien se traduit par l'airmiss. L'airmiss est une situation de trafic aérien dans laquelle les normes réglementaires de séparation entre aéronefs ne sont pas respectées. L'incident présente un statut ambigu pour la sécurité. D'une part, il traduit un franchissement de barrières sécuritaires, mais le franchissement de ces barrières peut aussi être pour les opérateurs un élément de régulation et d'adaptation de leur propre activité mentale. Il s'en suit que la signification sécuritaire que l'on doit à accorder à l'incident n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser de prime abord. On ne peut analyser les incidents sans comprendre les événements et les processus qui les ont générés. D'autre part, les moyens de connaître et de quantifier les airmiss sont loin d'être exhaustifs. Ils dépendent des déclarations faites par les opérateurs et des systèmes automatiques de détection du non-respect des normes de séparation. C'est ainsi que suite à l'introduction des TCAS (Traffic Collision Avoidance System) dans les cockpits, le nombre d'airmiss s'est accru, tout simplement parce que le système détecte des situations qui existaient au préalable mais qui n'étaient pas forcément perçues par les opérateurs. Tout en étant un reflet de la sécurité, les incidents sont des indicateurs incomplets dont il faut connaître les limites. L'objectif d'Eurocontrol est d'évaluer la sécurité au cours du processus de validation en simulation. Cela introduit une dimension particulière qui est celui de la signification des accidents et des incidents en simulation. En effet, bien qu'aucune étude spécifique n'ait été réalisée sur cette question dans la simulation du contrôle aérien, l'expérience d'Eurocontrol montre qu'il est exceptionnel que des accidents ou des incidents soient observés en simulation, si ce n'est en mettant les contrôleurs dans des conditions opérationnelles qui ont peu de lien avec la réalité des salles de contrôle. Les accidents et incidents sont alors importants à analyser pour la sécurité en tant qu'analyse de cas, mais peu exploitables comme reflet de cette sécurité.

Un autre indicateur, utilisé dans les approches facteurs humains de la sécurité, est l'erreur humaine. Toutefois, le lien erreur-sécurité doit s'envisager sous deux aspects : celui, classique, de la place de l'erreur dans la survenue d'un accident, et celui de l'erreur comme facteur de sécurité. Les approches récentes de l'erreur humaine développées par Leplat (1985), Reason (1990), puis Amalberti (1996) sur la sécurité écologique, insistent plus sur la gestion de l'erreur que sur sa suppression comme facteur de sécurité. Par gestion, on entend deux acceptions. La première concerne le fait que les opérateurs de systèmes complexes et à risque sont conscients qu'ils font des erreurs. En conséquence, ils développent une méta-connaissance sur leur propre fonctionnement pour mettre en place des stratégies cognitives de détection et de récupération des erreurs qu'ils peuvent commettre. La deuxième acception de la gestion des erreurs est la fonction régulatrice de l'erreur dans l'activité et les compromis cognitifs que font les opérateurs pour faire face aux contraintes situationnelles. L'erreur est un indicateur de performance de l'activité cognitive qui permet à l'opérateur de réajuster ses objectifs de performance en fonction de ses

compétences. Cette conception de l'erreur oblige à rester prudent sur l'usage de l'erreur humaine comme indicateur de sécurité. Etudier les erreurs est important dans le cadre d'une évaluation d'un nouveau concept pour identifier les éléments qui contribuent à les générer, mais aussi pour s'assurer que des stratégies de gestion des erreurs puissent être développées et appliquées par les opérateurs. L'identification et le diagnostic des erreurs constituent un point délicat de l'évaluation sécuritaire. Les classifications d'erreur qui apparaissent comme les plus pertinentes pour identifier les mécanismes causaux sont celles qui sont basées sur les mécanismes cognitifs. Quels que soient les modèles retenus, les mécanismes cognitifs ne sont pas directement observables. L'identification d'un mécanisme erreur est le résultat d'une interprétation faite par l'analyste à partir des données observables que sont les comportements et les données contextuelles (Reason, 1990). Ce caractère subjectif pose un problème méthodologique complexe pour identifier et diagnostiquer les formes d'erreur, car il introduit une grande variabilité entre analystes. Plusieurs études cherchent à formaliser des types d'erreur et des méthodes pour les observer (Isaac et col., 2002), mais force est de constater qu'il n'existe pas actuellement d'approche satisfaisante.

2.3 Une approche « construite » de la sécurité

La dernière facette sous laquelle on peut aborder la sécurité est celle de la fiabilité organisationnelle. Suite à l'accident de Three Mile Island, les travaux de Rubinstein (1979, cité par Vicente, 1999) montrent qu'on ne peut aborder la sécurité sous le seul angle des opérateurs de première ligne, mais qu'il faut élargir le spectre d'analyse au fonctionnement organisationnel du système socio-technique. Si les premiers travaux ont cherché à comprendre pourquoi les systèmes complexes étaient générateurs d'accidents (théorie de l'accident normal de Perrow, 1984 ; modèle de la sécurité emboîtée, Reason, 1997), un courant de recherche regroupé sur le nom HRO « High Reliability Organisations » a pris un paradigme d'étude opposé qui est celui de comprendre comment certaines organisations sont arrivées à être ultra-sûres. Il ressort de ces travaux que la sécurité est une propriété qui émerge des relations, rites et mythes existant au niveau de l'individu et du groupe, mais plus encore au niveau de l'organisation tout entière (Rochlin, 2001). La sécurité est construite par l'organisation de façon à répondre aux demandes de l'environnement. Les organisations à haute fiabilité sont le fruit d'une bonne adaptation entre les demandes extérieures et la structuration des unités de l'organisation. Cela a pour conséquence qu'il n'existe pas une seule manière d'organiser la sécurité mais que plusieurs manières peuvent exister. La vision d'une sécurité construite, contingente de l'environnement et adaptative aux situations explique que la sécurité est un équilibre circonstanciel entre les hommes, l'organisation, les outils et les situations. Il est important de comprendre comment les acteurs négocient leur participation à l'organisation. C'est dans cet équilibre qui s'est construit avec l'expérience que repose la pérennité de la sécurité. La modification de cet équilibre suite à des changements organisationnels ou à des évolutions technologiques comme l'est l'automatisation de certaines tâches est une source de fragilisation de la sécurité (Gras, 1993), jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit construit. Bourrier (1999) souligne qu'il est actuellement impossible de proposer une liste de signaux avant-coureurs d'un manque de fiabilité organisationnelle. On décrit par contre un certain nombre de caractéristiques des organisations qui participent à la construction de la sécurité. Ces caractéristiques dépassent les attitudes individuelles et les modèles collectifs de cognition pour s'étendre aux structures et ressources administratives qui rendent possible le développement d'une intelligence organisationnelle, et surtout d'un esprit d'inventivité en terme de sécurité. Elles doivent faire partie d'un processus d'apprentissage en action qui ne s'achève jamais (Turner & Pidgeon, 1997). Le projet HRO décrit les caractéristiques suivantes : redondance des canaux de décision, redondance du contrôle entre les acteurs, accord sur les buts au sein de l'organisation, centralisation et décentralisation des décisions lorsque les circonstances l'exigent, entraînement et recyclage permanent. Ces caractéristiques ne constituent pas un modèle organisationnel, mais un ensemble d'outils dont dispose l'organisation pour faire face aux défis sécuritaires.

Dans une perspective d'évaluation comme on ne dispose pas de marqueurs spécifiques de la sécurité, on peut alors proposer des analyses qui visent à s'assurer que l'intégration de nouveaux systèmes sur les positions de contrôle ne remet pas en cause les caractéristiques sécuritaires existantes ou permet de

disposer d'un potentiel d'élaboration de nouvelles caractéristiques. On évalue les moyens de construire la sécurité et non la sécurité en elle-même. Un nouveau concept peut modifier l'équilibre sécuritaire comme on l'a vu précédemment. La construction du nouvel équilibre passe par l'élaboration de nouvelles caractéristiques sécuritaires et par l'élaboration de nouvelles combinaisons entre ces caractéristiques. Ces élaborations sont le résultat de l'expérience des opérateurs mais aussi de la pratique sur le nouvel environnement de travail. Cela a une conséquence directe sur la portée d'une évaluation en simulation puisqu'il n'est pas sûr que tous les équilibres sécuritaires aient pu être construits durant le temps de la simulation. Dans cette perspective, toute évaluation ne sera pas exhaustive, mais s'attachera à déterminer les potentialités sécuritaires du nouveau concept. La recherche de l'équilibre sécuritaire correspond à une véritable appropriation du système par les opérateurs d'où émerge la sécurité. Cette appropriation s'inscrit dans un mécanisme similaire à celui décrit par Vicente (1999) pour expliquer l'appropriation opérationnelle d'un nouveau système par les opérateurs. Vicente parle alors de conception par l'usage et en fait un fondement de la conception écologique.

3.0 BASES POUR UNE EVALUATION SECURITAIRE

A partir des approches développées ci-dessus, il est possible de définir un cadre conceptuel pour l'évaluation de la sécurité qui repose sur les points suivants :

- La sécurité résulte d'interactions permanentes entre les opérateurs, l'environnement, les outils et l'organisation.
- La modification d'un de ces éléments modifie les interactions et donc les équilibres qui construisent la sécurité. La recherche et l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre se construit avec la pratique. La situation de travail doit permettre tant au niveau individuel que collectif et organisationnel de disposer des caractéristiques sécuritaires qui permettent de construire cet état d'équilibre.
- Les accidents sont les seuls marqueurs vraiment objectifs de la sécurité, mais leur signification est faible dans les systèmes ultra-sûrs comme le contrôle aérien.
- L'erreur humaine est un élément d'ancrage important pour aborder la sécurité. Elle est la manifestation d'un écart à l'intention qui doit permettre de faire des investigations complémentaires pour mettre à jour ses mécanismes causaux. Toutefois, utilisée comme indicateur, l'erreur pose le problème de son identification et de son diagnostic ainsi que celui de sa place dans les mécanismes de régulation cognitive de l'activité humaine.
- Les fonctions cognitives et psychosociales qui structurent les activités humaines au travail sont les modules élémentaires de la sécurité.

Ces différents points peuvent être résumés sous la forme d'une structure d'analyse de la sécurité à 3 niveaux. Au niveau le plus bas, on retrouve les fonctions cognitives et psychosociales des activités humaines qui participent au traitement de l'information et à la performance des opérateurs. Ces fonctions sont multiples. Il est difficile d'en proposer une liste exhaustive, il suffit pour cela de se reporter à des modèles de la performance humaine dans les activités de travail : par exemple Wickens (1992), Rasmussen (1986) ou Endsley (1995) pour les activités cognitives et Salas et col. (1995) pour les activités collectives. On classe aussi dans ces fonctions, des notions transversales qui sont fréquemment reprises dans les modèles comme la charge de travail ou le stress. D'un point de vue méthodologique, ces fonctions ont fait l'objet de nombreux travaux pour les évaluer et les mesurer. On dispose ainsi d'un panel de méthodes et outils qui suivant le modèle retenu pour les décrire font appel à l'éventail des techniques utilisées dans les facteurs humains. Elles présentent toutes des avantages et limitations qu'il faut connaître avant de les utiliser.

Le second niveau d'analyse, le niveau intermédiaire, aborde la sécurité sous l'angle d'observables qui sont le reflet de la performance humaine. La caractéristique de ce niveau est que le point de départ de toute investigation est la recherche de dysfonctionnement. La connaissance des dysfonctionnements qui résulte de leur analyse permet d'envisager des mesures de correction ou de gestion afin de proposer un système le plus sûr possible, en quelque sorte le système idéal. On se situe dans une démarche normative et déterministe de la sécurité. Ce niveau d'analyse est focalisé sur l'évaluation des relations homme-machine, bien que les méthodes les plus récentes tendent à élargir le spectre d'analyse aux aspects organisationnels. L'analyse est supportée par un ensemble de méthodes dérivées des arbres de défaillance dans lesquelles la composante humaine est devenue l'objet d'étude. Ces méthodes comme le souligne Amalberti (2001) sont pertinentes pour l'analyse des systèmes qu'il qualifie de régulés, c'est-à-dire ceux dont le taux d'accident se situe entre 10^{-3} et 10^{-5} , mais elles ne permettent pas d'appréhender le risque résiduel des systèmes ultra-sûrs. Les deux premiers niveaux d'analyse sont essentiels dans la construction de la sécurité. Ils permettent d'atteindre des niveaux de sécurité élevés. Toutefois, les modèles sous-jacents de la sécurité qu'ils manipulent ne sont pas suffisants pour expliquer et analyser un troisième niveau de sécurité qui caractérise les niveaux de haute fiabilité de certains systèmes à risque.

Ce troisième niveau de sécurité commence à être mieux connu avec les approches globales et « construites » de la sécurité. Il représente un enjeu considérable pour mieux appréhender la sécurité d'un système ultra-sûr comme le contrôle aérien, et l'évaluation de nouvelles positions de contrôle qui intègre des systèmes automatisés « human-centered ». Cependant, on est loin de disposer de méthodes d'analyse aussi formalisées que pour les deux niveaux précédents. Il reste là un champ d'études et d'investigations qui est prometteur pour les efforts fait quotidiennement dans l'amélioration de la sécurité. C'est avec la préoccupation d'intégrer dans le processus d'évaluation sécuritaire des nouveaux concepts de gestion et de contrôle du trafic aérien ce troisième niveau de sécurité, que le département « Recherche Innovante » du Centre Expérimental Eurocontrol a mené l'étude LOOK. L'objectif de LOOK est d'identifier des marqueurs du troisième niveau de sécurité et d'essayer de déterminer par quelles méthodes ils peuvent être appréhendés. C'est une étude exploratoire qui a pour ambition de proposer des principes d'évaluation et non de déterminer à ce stade une méthodologie formalisée.

4.0 L'ETUDE LOOK

Pour appréhender la globalité des composantes facteurs humains de la sécurité, un des premiers objectifs de LOOK a été d'avoir une approche multidisciplinaire. C'est pour cela que les travaux ont été menés en coordination avec quatre laboratoires « facteurs humains », chacun étant spécialisé dans une approche spécifique :

- Le Laboratoire d'Anthropologie Appliquée de l'Université Paris V pour les approches psychophysiologiques.
- Le Département « Sciences Cognitives » de l'Institut de Médecine Aéronautique du Service de Santé des Armées pour les approches cognitives.
- Le laboratoire « Deep-Blue » de Rome (Italie) pour les approches de cognition située et d'ethno-méthodologie.
- Le laboratoire « Centre d'Etude des Techniques des Connaissances » de l'Université Paris I pour l'approche sociologique.

Le principe de l'évaluation en simulation fait apparaître deux voies d'investigations complémentaires : l'évaluation facteur humain du troisième niveau de sécurité et la validité de la simulation du point de vue de l'activité développée par les contrôleurs. Ce deuxième point est d'autant plus important que le troisième niveau de la sécurité intègre les facteurs humains dans ses composantes les plus larges comme les organisations alors que la simulation est souvent envisagée par ses concepteurs au seul niveau de la

fidélité technique du système homme-machine (Grau et col, 1998). L'étude LOOK s'est décomposée en 3 phases :

- Phase d'étude dans quatre centres de contrôle en-route européens situés en Allemagne, France et Italie pour déterminer les caractéristiques sécuritaires qui permettront de concevoir les simulations et qui seront investiguées lors de l'expérimentation. Cette étude sur plusieurs pays est importante car chaque pays européen dispose de son propre système national de navigation aérienne avec des technologies et des cultures différentes.
- Phase de conception de l'expérimentation avec validation des simulations et du plan méthodologique.
- Phase expérimentale qui a été réalisée avec huit contrôleurs aériens venant de deux centres de contrôle : quatre du centre de Karlsruhe en Allemagne et quatre du centre d'Athis-Mons en France. Afin de mettre en évidence les caractéristiques sécuritaires, l'expérimentation a été construite pour comparer deux environnements de travail. Le premier est l'environnement actuel de travail où on fait l'hypothèse que les caractéristiques sécuritaires sont présentes et opérationnelles pour les contrôleurs. Le second est un nouvel environnement avec lequel les contrôleurs n'ont jamais travaillé et pour lequel on fait l'hypothèse que certaines caractéristiques sécuritaires peuvent être absentes ou dont l'utilisation opérationnelle génère des contraintes importantes. L'objectif est alors de voir comment les outils méthodologiques actuels d'investigation des facteurs humains permettent d'appréhender les caractéristiques sécuritaires. La complexité de l'expérimentation a résidé dans le fait que les environnements actuels de travail entre les deux centres de contrôle sont actuellement différents même si les deux centres travaillent avec des strips papier. Le strip papier est un support papier sur lequel sont inscrites toutes les informations relatives à l'identification d'un avion et à son plan de vol. Les strips papier sont différents entre les pays car les informations sont présentées suivant des logiques d'utilisation différentes. De plus, il existe des différences importantes entre pays sur les outils d'aide proposés ainsi que sur l'organisation du travail entre contrôleurs. Cela signifiait qu'il fallait vraiment construire deux simulations différentes pour Athis-Mons et Karlsruhe en environnement de travail strip papier. La seconde condition de travail était similaire pour les deux centres, à savoir un environnement dit « stripless », c'est-à-dire où toutes les informations relatives à l'avion et à son plan de vol sont informatisées et présentées sur le même support que l'image radar. Le concept « stripless » permet un traitement informatisé des données du plan de vol et des modifications apportées par les contrôleurs afin de proposer des aides à la gestion du trafic. Le concept « stripless » s'inscrit dans une logique d'informatisation et d'aide automatisée à la gestion du trafic aérien.

4.1 Caractéristiques sécuritaires pour la position de contrôle en-route

La position de contrôle en-route est l'interface dont dispose un binôme de contrôleurs pour assurer la navigation aérienne dans un secteur de contrôle. Le binôme de contrôleurs est composé d'un planeur et d'un exécutif. Chaque contrôleur dispose d'un écran radar et partage dans le cas d'un environnement strip-papier un espace commun, le tableau de strips, sur lequel sont disposés les strips papier. Le planeur est le premier à prendre connaissance d'un avion qui va arriver dans le secteur de surveillance du binôme. Son rôle est de s'assurer de la coordination de cet avion avec les secteurs de contrôle adjacents et d'analyser les difficultés, voire les conflits, que pourrait rencontrer cet avion avec les autres avions du secteur afin d'en informer l'exécutif. L'exécutif est en charge de la surveillance du trafic, de la détection des conflits éventuels et de leur résolution. C'est lui qui parle aux avions pour les prendre en charge dans le secteur et leur donner des ordres de navigation lorsque cela est nécessaire. Planeur et exécutif travaillent collectivement et en relation permanente avec les secteurs de contrôle adjacents.

Pour déterminer les caractéristiques sécuritaires, les observations et les entretiens réalisées par les différents participants à l'étude dans les quatre centres de contrôle ont été enrichis avec les modèles

d'activité des contrôleurs décrits dans la littérature (Abdesslem et col., 1999 ; Kallus et col., 1999). Les caractéristiques retenues pour l'étude concernent directement la position de contrôle. Elles n'ont pas pour ambition de couvrir l'ensemble de l'organisation du système de la navigation aérienne. C'est ainsi que ce qui a trait à la formation, la réglementation ou la gestion des flux aériens a été pris en compte dans la mesure où cela avait un lien direct avec la position de contrôle. Les caractéristiques suivantes ont été identifiées :

- a) Le travail des contrôleurs est fondé sur *l'anticipation*. La connaissance des informations fournies par les systèmes ou par les autres acteurs du contrôle aérien est un élément clé de l'anticipation. Elle permet aux contrôleurs de prévoir le trafic en prédisant les conflits éventuels, mais surtout en lui permettant d'anticiper et d'organiser sa propre activité afin de se préserver des marges d'adaptation pour faire face à des événements imprévus.
- b) La *redondance des canaux d'information*. Cette redondance est importante car elle permet aux contrôleurs de disposer de sources d'informations différentes qui lui laissent un espace de liberté pour adapter au mieux son activité aux contraintes situationnelles. La redondance sous-tend aussi que la même information peut être présentée sous une forme et avec une logique différente, ce qui permet de se construire une même représentation mentale à partir d'informations différentes. L'intérêt est alors de contrôler que les deux représentations mentales sont identiques et d'éviter ainsi une mauvaise analyse. La redondance des canaux d'information peut être interne (systèmes, displays, exécutif, planeur) ou externe (autres secteurs, chef de salle, équipages des aéronefs) à la position de contrôle.
- c) La *validité* des informations. Le contrôle aérien est un système ouvert où les informations sont multiples, complexes, plus ou moins disponibles, incertaines, voire absentes. Or les contrôleurs doivent prendre des décisions pour modifier ou non les paramètres de vol des avions. Face à cet état, les contrôleurs raisonnent par « défaut » ou dans le « flou » en faisant appel à leurs connaissances déclaratives et expérientielles. L'incertitude ainsi générée entre une représentation inférée et la réalité est source de stratégies adaptatives qui participent directement à la construction de la sécurité.
- d) Les *supports à la mémorisation*. Les contrôleurs manipulent un grand nombre d'informations avec une dynamique importante tout en devant faire face à de nombreuses interruptions. La mémoire de travail est soumise à de fortes contraintes qui peuvent être responsables d'oublis ou d'erreurs. Pour pallier ces limites, l'activité ne peut se concevoir qu'à travers des supports à la mémorisation qui sont actifs (manipulé ou non par le contrôleur) ou passifs (displays).
- e) Le *partage de la décision*. Même si le partage des tâches est relativement prescrit au sein du binôme, la souplesse et la complémentarité entre les deux contrôleurs qui se manifeste à travers un partage formel des tâches est un gage de sécurité. Cela sous-tend que chaque contrôleur puisse disposer des informations afin de comprendre la situation et inférer les intentions de l'autre contrôleur.
- f) Sous jacent au partage de la décision, la sécurité se construit à travers le sentiment que chaque contrôleur se sent surveillé par une tierce personne qui juge de la performance de son activité. La *surveillance par une tierce personne de sa propre activité* est essentielle car elle participe à la confiance que tout contrôleur doit avoir en lui-même pour exercer sa tâche. La surveillance s'exerce en priorité par l'autre contrôleur du binôme, mais elle peut aussi être assurée par un acteur plus distant de la position de contrôle comme le sont le chef de salle, un troisième contrôleur, le secteur adjacent ou les équipages des aéronefs.

Les caractéristiques décrites font appel à des fonctions psychologiques individuelles et/ou collectives.

4.2 La simulation

Le souci de LOOK a été de mettre les contrôleurs dans un environnement de travail où l'activité observée était la plus proche possible de l'activité réelle. Les limites de l'usage de la simulation dans un processus d'évaluation ont été plusieurs fois décrites (Dubey, 2000), en particulier la notion de risque et la relation au temps des opérateurs qui sont différents. Les efforts pour concevoir la simulation ont porté sur deux points : la position de contrôle et les scénarios que devaient jouer les contrôleurs. Pour les scénarios, l'objectif était de proposer un environnement de travail familier où les composantes sécuritaires habituellement utilisées pouvaient être mises en application. C'est pour cette raison que les contrôleurs ont contrôlé un secteur qui leur était familier, car appartenant à leur centre de contrôle. De même, les échantillons de trafic étaient des trafics réels correspondant à une journée de contrôle s'étant déroulée quelques mois auparavant. Les contrôleurs des secteurs adjacents étaient joués par des contrôleurs du même centre afin de respecter les règles de coordination. Des événements, choisis par des contrôleurs du centre, ont enrichi les scénarios. L'objectif des événements n'était pas de faire des scénarios catastrophes, mais bien de mettre les contrôleurs face à des situations pour lesquelles les contraintes de trafic sont plus importantes. Les scénarios et les événements ont été validés en simulation par des contrôleurs du centre, ce qui a permis d'apporter des améliorations pour l'expérimentation, et de disposer d'un produit opérationnel. Les pilotes étaient joués par des pilotes professionnels auxquels on avait demandé d'avoir un rôle actif dans la simulation, à savoir éviter que les pilotes ne soient trop « bons » et ressemblent plus à ce qui se passe dans la réalité entre les pilotes et les contrôleurs.

4.3 Les méthodes d'évaluation

Le but de LOOK est de rechercher parmi les méthodes et outils facteurs humains, ceux qui apparaissent comme les plus pertinents pour évaluer les caractéristiques sécuritaires. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- Méthodes psychophysiologiques : cortisol salivaire, électroencéphalographie (bandes alpha, bêta, delta, thêta), électrocardiographie (fréquence cardiaque et variabilité de la fréquence cardiaque), électro-oculographie et direction du regard.
- Méthodes subjectives par questionnaire : fatigue, charge de travail (NASA-TLX, SWAT), comportement individuel et collectif.
- Méthodes d'observation : observation directe, traces de l'activité, enregistrement vidéo des sessions de simulation.
- Entretiens individuels post-simulation semi-directifs et avec auto-confrontation.

L'application de l'ensemble de ces méthodes était relativement lourd et nécessitait une participation motivée de la part des contrôleurs. C'est pour cela qu'une réunion préalable avait été organisée avec les contrôleurs pour expliquer les objectifs de l'étude et les contraintes imposées par les méthodes utilisées.

4.4 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée en deux périodes de huit jours, une période pour chaque centre. Les huit jours comprenaient la formation et l'entraînement sur les deux interfaces ainsi que les sessions expérimentales. Pour chaque centre, les quatre contrôleurs étaient divisés en deux binômes au sein desquels un contrôleur était le planeur et l'autre l'exécutif. Le rôle de chaque contrôleur était la même tout au long de la période d'expérimentation. Chaque binôme a réalisé trois sessions mesurées : une sur l'environnement « strip papier » et deux avec l'environnement « striplless ». Les trafics aériens et les scénarios étaient différents à chaque fois pour éviter les phénomènes d'apprentissage. Chaque scénario durait une heure, mais la session avec l'application des différentes méthodologies durait la journée. Dans chaque session, un binôme était sur la position de contrôle mesurée alors que l'autre binôme faisait le rôle des contrôleurs en charge des secteurs adjacents.

5.0 RESULTATS – DISCUSSION

L'objectif de cet article n'est pas de présenter l'ensemble des résultats, mais d'exposer les principaux enseignements de l'expérimentation LOOK sur l'évaluation de la sécurité en simulation.

5.1 La conception de la simulation

La conception de la simulation est une étape importante dans le processus de validation. Elle doit permettre aux contrôleurs de développer une activité proche, voire similaire de celle développée en salle de contrôle. Les contrôleurs trouvèrent tout à fait réalistes les conditions de simulation, que ce soit au niveau de la position de contrôle ou des scénarios. Cependant pour appréhender les caractéristiques sécuritaires, plusieurs limites furent évoquées :

- La nécessité que les contrôleurs du binôme aient l'habitude de travailler ensemble afin que chacun connaisse bien la façon de travailler de l'autre. Il est souhaitable que les deux contrôleurs appartiennent à la même équipe de contrôleurs. Cette contrainte qui avait été identifiée n'avait pu être respectée de la part des centres de contrôle pour des raisons de disponibilité des contrôleurs. Le choix de faire contrôler les secteurs adjacents par des contrôleurs du centre de contrôle est essentiel pour la cohérence de l'activité de contrôle.
- Certaines limitations techniques ont pu pénaliser l'activité des contrôleurs. En fait, on a observé deux types de limitations. D'une part, les limitations que les contrôleurs peuvent facilement contourner, car ces limitations correspondent à des modes dégradés de leur environnement de travail et ils disposent alors de connaissances et savoir-faire adaptées pour y faire face. D'autre part, les limitations que les contrôleurs ne peuvent pas contourner car elles créent des conditions de travail auxquelles ils ne sont pas confrontés. Dans ce cas, les contrôleurs doivent élaborer des savoir-faire différents de leurs savoir-faire habituels. La simulation devient alors un espace d'apprentissage, ce qui n'est pas son objectif. Il est à noter que lors de la conception de la simulation, les limitations avaient été identifiées et leurs conséquences sur l'activité évaluées. Il ressort de cette expérimentation qu'une attention plus grande doit être portée à l'évaluation des limitations. Une meilleure connaissance de l'activité en salle est indispensable pour juger de ce qui est ou non pénalisant. D'autre part, la validation de la simulation est une étape importante dont il faut éviter certains pièges. En particulier, les contrôleurs ne s'impliquent pas autant que lors de l'expérimentation car ils savent que leur performance ne sera pas mesurée. Cela les amène à valider certains choix qui peuvent se révéler par la suite limitants. Une solution serait de ne pas présenter la validation comme une validation, mais comme l'expérimentation qui serait en fait une pré-expérimentation. Ce choix qui se justifie d'un point de vue méthodologique exige cependant des ressources adaptées pour pouvoir le réaliser.
- La conception des scénarios est un processus complexe qui doit remplir plusieurs critères : réalisme opérationnel, génération d'une activité représentative et génération d'une activité permettant de répondre aux hypothèses posées. Par ailleurs, la conception d'un scénario est sous la responsabilité d'intervenants qui ont des compétences différentes (opérationnelles, techniques, facteurs humains), et qui n'ont pas forcément la même vision du monde opérationnel. La gestion de ces contraintes impose d'avoir un processus de concertation et de conception avec des validations itératives. Ce long processus doit permettre d'aboutir à un état définitif qui évite de faire des aménagements au dernier moment ou de faire évoluer le scénario en ligne. Les risques associés à un scénario insuffisamment validé sont de deux ordres : un manque de réalisme face auquel les contrôleurs développent une activité qui n'est pas réaliste car ils font « plaisir » aux expérimentateurs, et/ou une activité réaliste mais qui ne permet pas de répondre aux hypothèses posées.
- La sécurité se construit au sein du système organisationnel. Cela a des implications sur la conception du scénario et son implémentation dans la simulation. La simulation, malgré les

ressources dont on dispose, est toujours limitée. On ne peut jamais simuler tout l'environnement organisationnel. L'appréhension de toutes les composantes de la sécurité requiert donc une analyse en salle afin de déterminer les éléments qui devront être présents dans la simulation, et il ne faut hésiter à utiliser des techniques comme le Magicien d'Oz pour simuler les éléments qui apparaissent comme pertinents. L'objectif de la simulation est une fidélité opérationnelle qui doit savoir prendre le pas à un moment donné sur la fiabilité physique ou technique.

- Le niveau de connaissance des contrôleurs sur un nouveau système. La question de l'apprentissage en simulation n'est pas nouvelle. Nombre d'études facteurs humains insistent sur la nécessité de temps d'apprentissage suffisants. Ces temps sont coûteux et difficiles à réaliser. Dans LOOK, il n'a pas été possible de disposer des ressources suffisantes pour proposer une formation optimale. Toutefois en proposant aux contrôleurs deux sessions sur l'environnement « striplless », il a été possible de juger de l'évolution de l'apprentissage et d'affiner les résultats obtenus lors de la première utilisation.

5.2 L'évaluation de la sécurité

Les situations générées par les scénarios et les différences liées aux deux positions de contrôle évaluées (strip papier et striplless) permettent de mieux comprendre la façon d'appréhender la sécurité dans un processus d'évaluation.

Les accidents et incidents

Durant les douze sessions de simulation, aucun accident n'est survenu. Par contre, six incidents « airmiss » ont pu être observés. Sur les six airmiss, trois sont survenus après que les contrôleurs aient donné un ordre correct à l'équipage, mais le temps que la manœuvre soit effectuée, il y a eu franchissement des normes de séparation. Ces franchissements de normes ne présentaient aucun caractère d'insécurité car ils étaient réalisés sous le total contrôle des opérateurs. Deux autres airmiss sont survenus alors que les contrôleurs savaient que les normes de séparation allaient être franchies, mais c'était leur intention de franchir ces normes dans la mesure où la situation ne présentait aucun danger et qu'elle était contrôlée. Enfin, le dernier airmiss était dû à la réalisation incorrecte par l'équipage d'un aéronef, d'un ordre du contrôle alors que le collationnement de l'ordre était correct. Le contrôleur s'est aperçu de l'airmiss grâce au système de détection de conflit court terme, mais il n'a pu faire aucune action en raison des faibles délais de réaction. Hormis le dernier airmiss, les airmiss s'inscrivent dans un processus volontaire de gestion des marges d'adaptation que s'octroient les contrôleurs. Les contrôleurs repoussent leur propre norme sécuritaire au-delà des normes prescrites sans qu'il n'existe d'altération de la sécurité. Le danger de ces situations repose sur le caractère individuel et subjectif de la norme individuelle.

Sécurité et activité de contrôle

Il est ressorti lors des entretiens post-simulation et des auto-confrontations deux éléments importants pour comprendre la place de la sécurité dans l'activité de contrôle. Le premier est l'affirmation par les contrôleurs que la sécurité n'avait jamais été mise à mal. La performance observée confirme le sentiment perçu par les contrôleurs. Toutefois, il ressort que la sécurité a été traitée à différents niveaux. Les contrôleurs disposent de registre de réponses en fonction des contraintes qu'ils doivent traiter. Plus les contraintes sont fortes, plus la charge de travail est élevée. Les variations de charge de travail ont été objectivées par les techniques subjectives et électrophysiologiques. L'adaptation à l'accroissement de la charge de travail passe par une régulation des niveaux d'activité où la balance entre fluidité, capacité et sécurité du trafic évolue d'un équilibre où ces trois dimensions sont à haut niveau vers un équilibre où le maintien de la sécurité prime sur la performance de la fluidité et de la capacité. Cela se traduit dans les faits par la nature des informations qui sont traités (la séparation par niveau de vol devient le critère de sécurité par excellence) et par la globalité des informations (focalisation sur les aspects les plus complexes du trafic au dépend de son appréhension globale).

Le second élément concerne le fait que les contrôleurs éprouvent en fonction des situations qu'ils rencontrent un sentiment plus ou moins marqué de sécurité. Ce sentiment subjectif est difficile à définir. Les contrôleurs évoquent que ce sentiment existe aussi en salle de contrôle. Il semble être le vécu de quelque chose qui serait une construction qui a directement trait à la sécurité. Partant de ce constat, il est apparu intéressant de le mettre en relation avec les hypothèses formulées sur les caractéristiques sécuritaires. L'objet de l'analyse des données a alors été de voir si les caractéristiques sécuritaires retenues pour évaluer le troisième niveau de sécurité pouvaient rendre compte de ce « sentiment de sécurité » qu'éprouvent les contrôleurs. Pour cela, l'objectif a été de comparer pour chacune des positions de contrôle évaluées des situations équivalentes en terme de charge de travail et pour lesquelles les contrôleurs avaient ou non un « sentiment de sécurité » correct. En recherchant pour chacune de ces situations les causes du sentiment ou non de sécurité, il est possible de décrire un ensemble de facteurs que l'on peut regrouper sous les six caractéristiques sécuritaires recherchées. Ces facteurs ont été identifiés à travers le questionnaire de comportement et les entretiens, et objectivés via l'analyse des traces de l'activité. Les caractéristiques sécuritaires sont composées d'un ensemble de facteurs, chaque facteur pouvant être constitutif de plusieurs caractéristiques sécuritaires. Les facteurs dépendent des spécificités de la position de contrôle et de l'environnement organisationnel dans lequel elle est intégrée. Un facteur est par exemple le ou les moyens de communication disponibles sur la situation de travail entre deux opérateurs. Les moyens de communiquer sont constitutifs de plusieurs caractéristiques sécuritaires comme le *support à la mémorisation* ou la *surveillance par une tierce personne de sa propre activité*. D'un point de vue sécuritaire, il est important que chaque caractéristique sécuritaire soit constituée de plusieurs facteurs qui permettent aux opérateurs de s'adapter en fonction de leurs ressources disponibles aux contraintes situationnelles.

Sécurité et charge de travail

Un autre aspect des caractéristiques sécuritaires est celui de la charge de travail. Lorsque les niveaux de charge de travail sont faibles ou modérés, les contrôleurs disposent des ressources suffisantes pour pallier les limites des caractéristiques sécuritaires du système socio-technique en mettant en place des comportements adaptés. Par exemple, accroissement des communications entre le planeur et l'exécutif. Le sentiment de baisse de la sécurité apparaît lorsque la charge de travail augmente et que les ressources disponibles ne peuvent plus être allouées aux tâches de compensation des limites des caractéristiques sécuritaires. C'est dans ces situations que les limites d'un environnement de travail sont approchées sur le plan de la sécurité. L'environnement de travail doit permettre à l'opérateur de disposer d'un registre adaptatif de construction du « sentiment de sécurité » qui permettent de rester dans le cadre de limites opérationnelles et sécuritaires acceptables. La variabilité des situations et les différences inter et intra-individuelles imposent de disposer de registres les plus étendus possibles. Dans l'expérimentation par exemple, il est apparu clairement des différences entre les deux positions de contrôle étudiées pour la *validité des informations*. Les contraintes générées par l'interface « stripless » contraignent les contrôleurs à raisonner plus sur leurs connaissances expérientielles que dans un environnement strip papier, et donc de raisonner avec une plus grande incertitude. Le sentiment de sécurité est alors moindre qu'avec un environnement strip papier.

Lorsque la charge de travail est très élevée, le « sentiment de non-sécurité » apparaît quelle que soit la position de contrôle. Les contrôleurs développent alors une activité identique entre les deux positions et basée exclusivement sur le seul écran radar. L'impact de la position de contrôle sur l'activité est alors minime. On se retrouve dans une situation où l'activité ne peut plus être réalisée dans des conditions satisfaisantes de confort cognitif et de « sentiment de sécurité ». Les caractéristiques sécuritaires ne résistent plus à la pression des contraintes situationnelles. Toutefois, les opérateurs disposent pour assurer la sécurité d'un registre de réponses « sécuritaires » qui se fait au détriment de la capacité et de la fluidité du trafic. Cet état de fonctionnement pour les contrôleurs est peu satisfaisant, en particulier s'il dure sur de longues périodes car il est vite générateur de fatigue et de stress, ce qui a été objectivé par les mesures électrophysiologiques et le questionnaire sur la fatigue. En terme sécuritaire, l'identification des seuils de

charge de travail au-delà desquels les caractéristiques sécuritaires des positions de contrôle ne permettent plus aux opérateurs d'avoir le « sentiment de sécurité » est importante pour mettre en place des mesures organisationnelles qui évitent de les dépasser (régulation des flux de trafic, armement des positions, etc.). Le processus d'évaluation doit être capable de prendre en compte ces dimensions pour faire des recommandations ou au contraire fixer des limites.

5.3 Principes pour une évaluation sécuritaire

Ces différents résultats permettent de mieux comprendre comment un processus d'évaluation du troisième niveau de sécurité peut se mettre en place dans un système ultra-sûr comme l'est le contrôle aérien :

- Il faut distinguer le « sentiment de sécurité » ressenti par les contrôleurs des registres de réponse dont ils disposent pour assurer une performance sûre.
- Le « sentiment de sécurité » se construit sur la base des caractéristiques sécuritaires de l'environnement de travail. Les caractéristiques sécuritaires dépendent de facteurs présents dans cet environnement.
- La construction du « sentiment de sécurité » est un mécanisme adaptatif propre au contrôleur et aux situations. L'environnement de travail doit permettre de générer une variabilité des comportements adaptatifs.
- L'évaluation vise à déterminer si l'environnement de travail permet au contrôleur de construire le « sentiment de sécurité ». Elle ne peut garantir que le système socio-technique est sûr. Elle peut seulement évaluer si le système possède les caractéristiques sécuritaires qui permettront aux contrôleurs de rendre le système sûr.
- L'évaluation doit s'attacher à déterminer les limites au-delà desquelles le « sentiment de sécurité » ne peut plus être présent afin de proposer les moyens de ne pas dépasser ces limites. Elle doit aussi identifier les coûts compensatoires que représentent pour les contrôleurs les limites des caractéristiques sécuritaires présentes dans l'environnement. Pour cela, la construction des scénarios d'évaluation est une tâche essentielle afin que les situations proposées soient suffisamment valides et sensibles.
- Le « sentiment de sécurité » est une construction qui s'élabore avec l'expérience. Lors d'une évaluation, il est difficile de s'assurer que l'apprentissage donné aux contrôleurs évaluateurs sur une nouvelle position est suffisant pour leur permettre d'explorer tout l'espace de construction. Il y a là un facteur limitant à une évaluation ponctuelle. Ce point a des conséquences directes sur les avantages et limites qu'il peut y avoir à faire des évaluations « statistiques » avec un grand nombre de sujets ou des évaluations « en profondeur » avec peu de sujets mais sur des périodes longues où on explore l'espace de construction de la sécurité.

6.0 CONCLUSION

Les systèmes automatisés font partie intégrante des systèmes socio-techniques ultra-sûrs. Leur place, de plus en plus prépondérante, modifie les situations de travail et l'environnement organisationnel. Le contrôle aérien n'échappe pas à cette évolution et la validation opérationnelle d'un nouveau système ne peut se faire que par le recours à la simulation. L'objectif sécuritaire est au cœur de ce processus de validation. Abordé sous l'angle des facteurs humains, l'évaluation de la sécurité oblige à se poser la question de sa définition. On peut décrire trois niveaux d'évaluation de la sécurité dont le dernier niveau repose sur une vision globale et « construite » et qui apparaît comme une voie prometteuse pour aborder la sécurité des systèmes ultra-sûrs. Le projet exploratoire LOOK conduit au centre expérimental Eurocontrol permet de mieux comprendre comment il est possible d'évaluer ce niveau de sécurité. L'étude LOOK est basée sur une approche multidisciplinaire des facteurs humains, sur une analyse de l'activité des

contrôleurs et sur une expérimentation en simulation. Elle permet dans le cadre de l'évaluation d'une position de contrôle aérien de proposer des pistes de recherche pour mener une évaluation sécuritaire en simulation. Les pistes proposées concernent aussi bien la conception et l'usage de la simulation que les méthodes d'évaluation de la sécurité.

7.0 BIBLIOGRAPHIE

Abdesslem, S., Boudes, N., Bressolle, M.C., Capsie, C., Corredor, A.F., Leroux, M., Mesguen, L., Parise, R., Torrent Güell, M. & Tremblay, E. (1999). Evaluation d'ERATO 1997-1998. Rapport CENA/R98 842/ICC, 15 février 1999.

Amalberti, R. (1996). La conduite des systèmes à risque. Le Travail Humain, Presses Universitaires de France : Paris.

Amalberti, R. (2001). The Paradoxes of Almost Totally Safe Transportation Systems. Safety Science, 37, 109-126.

Bourrier, M. (1999). Le nucléaire à l'épreuve de l'organisation. Le Travail Humain, Presses Universitaires de France : Paris.

Dubey, G. (2000). Social Factors in Air Traffic Control Simulation. Eurocontrol Experimental Centre, Report n° 348, July 2000.

Endsley, M.R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. Human Factors, 37(1), 32-64.

Eurocontrol (2001). STATFOR Medium-Term Forecast of Annual Number of IFR Flights (2002-2009). Vol. 1, 14 March 2002. Eurocontrol Headquarters, 96 rue de la Fusée, Bruxelles, Belgium.

Gras, A. (1993). Grandeur et dépendance : sociologie des macro-systèmes techniques. Collection Sociologie d'Aujourd'hui, Presses Universitaires de France : Paris.

Grau, J.Y., Doireau, P., & Poisson, R. (1998) Conception et utilisation de la simulation pour la formation : pratiques actuelles dans le domaine militaire. Le Travail Humain, 61(4), 361-385.

Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Elsevier: Oxford, UK.

Isaac, A., Shorrock, S.T., Kennedy, R., Kirwan, B., Andersen, H. & Bove, T. (2002). Technical Review of Human Performance Models and Taxonomies of Human Error in ATM (HERA). Eurocontrol Report, Bruxelles, HRS/HSP-002-REP-01, 26.04.2002.

Kallus, K.W., Van Damme, D. & Dittmann, A. (1999). Task Analysis of En-Route Controllers: Integrated Task and Job Analysis of Air Traffic Controllers, Phase 2. EATMP/Eurocontrol: HUM.ET1. ST01.1000-REP-04, 8 Oct. 1999.

Leplat, J. (1985). Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail. Armand Colin, Collection U : Paris.

Perrow, C. (1984). Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. Basic Books: New-York.

Rasmussen, J. (1986). Information Processing and Human-Machine Interaction. North-Holland, Elsevier Science Publishing C: New-York.

Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press.

Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate: Aldershot, UK.

Rochlin, G.I. (2001). Les organisations « à haute fiabilité » : bilan et perspectives de recherche. In *Organiser la fiabilité*, M. Bourrier (Ed), pp. 39-70. L'Harmattan : Paris.

Salas, E., Prince, C., Baker, D.P. & Shrestha, L. (1995). Situation Awareness in Team Performance: Implications for Measurement and Training. *Human Factors*, 37(1), 123-136.

Shorrock, S.T. & Kirwan, B. (1999). The Development of TRACER: A Technique for the Retrospective Analysis of Cognitive Errors in ATM. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, D. Harris (Ed). Ashgate.

Turner, B.A. & Pidgeon, N.F. (1997). *Man-Made Disasters* (2nd. Ed.). Butterworth Heinemann: Oxford.

Vicente, K.J. (1999). *Cognitive Work Analysis*. Lawrence Erlbaum Associates: London.

Villiers, J. (1997). Les facteurs humains et la sécurité du contrôle de la circulation aérienne. Actes du 7^{ème} Colloque International de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace "Aviation Safety: Juridical and Financial Aspects", 19-20 mars 1997, Toulouse, France. Editions A. Pédone : Paris, France.

Wickens, C. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (second edition). Harper-Collin: New-York.

This page has been deliberately left blank

Page intentionnellement blanche