

Votre attention s'il vous plait !

Eléments d'un espace de conception de signaux visuels

Stéphane Chatty Sylvie Athènes Alexandre Bustico

Centre d'Études de la Navigation Aérienne

7 avenue Edouard Belin

31055 TOULOUSE CEDEX, FRANCE

{chatty,athenes,bustico}@cena.dgac.fr

RÉSUMÉ

Avec la complexité visuelle croissante des interfaces graphiques, il devient de plus en plus difficile d'attirer l'attention des utilisateurs lorsqu'un événement se produit. Pourtant, certains domaines ont un besoin croissant de transmettre des signaux vers les utilisateurs, comme par exemple les systèmes critiques ou les systèmes de communication asynchrones. Le contrôle aérien est l'un de ces domaines, où de plus l'usage de signaux sonores doit être limité. Il faut donc rechercher des signaux visuels adaptés. Cet article explore les enjeux de la conception de signaux visuels pour les interfaces graphiques. Il situe les alarmes et déclencheurs par rapport aux autres types de visualisation d'information, propose quelques règles de conception, et identifie des dimensions d'un espace de conception de signaux visuels animés : type d'animation, transparence, fréquence, profil temporel, et localité de l'animation. Nous présentons ensuite une première expérimentation destinée à évaluer l'influence de ces paramètres sur l'efficacité des signaux.

MOTS CLÉS : Alarmes, perception visuelle, sécurité, déclencheurs, contrôle aérien, interfaces graphiques

INTRODUCTION

En mars 1999, les concepteurs et les utilisateurs des nouveaux postes de contrôle aérien français récemment mis en service se sont inquiétés : certaines alarmes visuelles en cas de défaillances techniques étaient peu ou pas perçues par les contrôleurs auxquels elles sont destinées. Le problème a été traité temporairement par l'ajout d'alarmes sonores, mais la question de fond subsiste : comment concevoir dans les interfaces graphiques des signaux visuels que les opérateurs percevront de manière efficace ?

Le problème n'est pas isolé. En 1996, une équipe de recherche effectuait des évaluations informelles de moyens de communication numériques entre contrôleurs et pilotes. À deux reprises au cours des simulations, des incidents techniques ont provoqué des alarmes imprévues : un message émis par le contrôleur n'avait pas été reçu par le pilote. Les alertes visuelles correspondantes sont apparues sur l'écran des contrôleurs. Mais absorbés par leur tâche ailleurs sur l'écran, les contrôleurs ont mis respectivement 9 minutes et 20 minutes à détecter l'alarme. Les signaux visuels avaient été conçus en utilisant des règles

ergonomiques prévues pour des messages d'erreur : des textes rouges à proximité des objets concernés. Dans ce cas comme dans le cas plus récent, une analyse a posteriori explique facilement les défauts constatés : en vision périphérique seuls les mouvements sont détectés, le rouge est la couleur pour laquelle le champ perceptif est le plus restreint [1], et la masse de rouge utilisée est sans doute trop faible dans ce cas précis. Mais s'il est facile d'identifier les défauts de conception, il est plus délicat de proposer une reconception. En effet, bien que les alarmes visuelles semblent devoir être conçues différemment de simples messages d'erreur, il existe peu de guides pour cela, et on trouve peu de données directement utilisables dans la littérature.

On peut s'étonner d'une telle lacune, étant donné la diversité des recherches en interaction homme-machine dans les quinze dernières années. A y bien regarder cependant, la majorité des efforts a porté sur l'utilisabilité des interfaces, c'est-à-dire essentiellement leur capacité à être utilisées facilement et efficacement par les usagers. Ces propriétés sont en effet déterminantes pour la plupart des produits bureautiques, qui ont largement inspiré la communauté de recherche. A l'opposé, les systèmes critiques comme le contrôle de processus (centrales nucléaires, contrôle aérien, etc.) ou les transports ont eu moins d'influence sur la recherche, probablement en raison de leur lenteur d'évolution. Ce n'est qu'aujourd'hui que les interfaces graphiques font réellement leur apparition dans ces domaines, et qu'elles y rencontrent de nouveaux problèmes. Ainsi, la capacité d'une interface à attirer l'attention ne relève pas véritablement de l'utilisabilité, mais de la sécurité, notion peu présente hors de ces domaines. Or l'évolution des systèmes critiques vers les interfaces graphiques coïncide avec une informatisation croissante de ces systèmes, ce qui a pour conséquence de multiplier les événements et les messages qui doivent être transmis aux utilisateurs. C'est ce qui s'est produit il y a quelques années avec les cockpits d'avions, et ce qui se produit actuellement dans le contrôle aérien. Là où les systèmes de contrôle "classiques" comportent deux ou trois types d'alarmes ou de signaux tous graves, un système moderne en compte plus de dix de gravité variable, et ne peut plus se contenter de les transmettre par des clignotements sous peine de surcharger l'écran. Notons par ailleurs que l'évolution des outils bureautiques les amène progressivement à des besoins similaires. Ainsi dans les produits

Microsoft, les outils d'aide "intelligents" cherchent à attirer l'attention des utilisateurs. Le besoin est encore plus patent dans les collecticiels asynchrones, tels le courrier électronique ou l'Internet Relay Chat : pour pouvoir mettre une activité de communication en tâche de fond, il est utile que cette dernière se manifeste pour revenir en avant-plan quand elle est réactivée.

Une solution efficace pour attirer l'attention est l'utilisation de sons. Couramment utilisée dans les jeux vidéo, elle est aussi répandue dans les cockpits d'avions et utilisée par de nombreux informaticiens pour leur courrier électronique. Cependant, le son ne peut être utilisé dans tous les contextes. Dans le cas du contrôle aérien, les utilisateurs sont réticents à l'utilisation systématique du son, et souhaitent en général le réserver à des alarmes graves. Il nous faut donc utiliser les signaux visuels pour les alarmes moins sérieuses.

Cet article est consacré à la conception de signaux visuels dans les interfaces graphiques. Après un état de l'art de la conception d'alarmes, nous explorons tout d'abord les enjeux spécifiques liés aux signaux visuels dans les interfaces graphiques : quels sont les objectifs à satisfaire, les contraintes à respecter ? Nous étudions ensuite la notion même d'alarme, de déclencheur et de signal visuel, précisant ces notions et les remettant en perspective par rapport aux pratiques actuelles dans les interfaces graphiques. Nous concentrons alors sur la conception de signaux visuels, nous proposons un ensemble de paramètres qui peuvent définir un espace de conception. Nous décrivons enfin une expérience qui évalue l'influence de quatre de ces paramètres sur la détection de signaux, et nous analysons ses résultats.

LA CONCEPTION D'ALARMES

Si la littérature sur la conception de signaux visuels est à ce jour inexistante dans les ouvrages d'interaction homme-machine, la conception d'alarmes a elle une histoire beaucoup plus ancienne. On trouvera par exemple une revue du problème dans [1]. La grande majorité des résultats disponibles repose sur l'utilisation de signaux lumineux (voyants, phares, flashes, etc.) et est antérieure à l'essor des interfaces graphiques. Les résultats portent sur l'efficacité relative des couleurs en fonction des performances du système visuel (vision centrale et vision périphérique, détection de mouvements, etc.), sur le lieu où doivent se trouver les voyants lumineux, sur la fréquence des clignotements, etc. Dans son guide de facteurs humains pour le contrôle aérien [3], la Federal Aviation Administration américaine utilise ces résultats en proposant de disposer les signaux dans un cône de 15 degrés autour du centre d'attention, avec des clignotements de 2 à 3 Hz.

À côté de ces travaux sur la perception visuelle, d'autres travaux se sont concentrés sur les aspects cognitifs de l'interprétation des alarmes [6, 12]. Ainsi, Wickens a défini un ensemble de principes de base permettant une meilleure lisibilité des signaux et une association efficace avec la situation en cours [16]. On retiendra par exemple les principes suivants : le séquençage, qui doit permettre de retrouver dans quel ordre les signaux ont été émis ; le groupement et la gestion de priorités,

qui réclament que l'organisation spatiale des signaux sur l'écran correspondent à l'organisation fonctionnelle du système ; la couleur, dont l'usage doit être compatible avec la signification conventionnelle ou culturelle (rouge pour le danger, par exemple) ; l'informativité, qui stipule que chaque alarme doit fournir suffisamment d'information pour être traitée.

Plus récemment enfin, des travaux dans le cadre de l'approche écologique de l'interaction ont pris parti pour une représentation plus intégrée de l'information. L'approche écologique préconise l'étude du système homme-machine ou homme-environnement comme un tout [7]. Ses tenants suggèrent donc d'exploiter les capacités perceptives et motrices humaines de manière similaire à celle dont elles sont exploitées dans la nature, en concevant des représentations complexes mais naturelles. Un bon exemple est la conception des systèmes d'affichage à tête haute pour les pilotes d'avions de combat. Leur conception se concentre sur les signaux visuels qui étayent le plus efficacement la perception de la vitesse, de la hauteur et de la direction prise.

ALARMES ET INTERFACES GRAPHIQUES

Les travaux sur les alarmes que nous venons de décrire ne répondent pas directement à la question posée au début de cet article ("comment concevoir dans les interfaces graphiques des signaux visuels perçus efficacement par les utilisateurs ?"). D'une part, les résultats obtenus sur la perception de signaux lumineux se transposent mal aux interfaces graphiques. D'autre part, la notion d'alarme qui est souvent étudiée recouvre à la fois des aspects perceptifs et cognitifs, de la forme et du contenu, et cela ne facilite pas la réflexion sur la détection de signal. Nous allons étudier ces questions, et tenter de situer les alarmes, les déclencheurs et les signaux visuels dans le contexte déjà largement exploré des interfaces graphiques.

Des signaux lumineux aux interfaces graphiques

Les résultats sur les signaux lumineux décrits à la section précédente correspondent à une technologie et à des tâches différentes de ce à quoi sont exposés les concepteurs d'interfaces graphiques. D'une part, bien qu'il soit toujours possible d'adjoindre des voyants ou des gyrophares à des écrans informatiques, pour des raisons de commodité et de coût la plupart des ingénieurs préféreront s'en tenir à des ajouts à l'interface graphique. Dans certains cas, la taille des écrans (50 cm de côté dans le contrôle aérien) interdit même de respecter les règles pour le positionnement des voyants. D'autre part, les alarmes lumineuses décrites transportent des informations essentiellement binaires, ou d'un faible nombre de bits : un voyant est allumé ou éteint, et les combinaisons lisibles de voyants sont assez réduites. Cela correspond peu aux postes de travail modernes où les opérateurs manipulent des données complexes, et où les alarmes doivent transporter des informations riches : nature de l'alarme, données auxquelles elle se rapporte, éventuels paramètres précisant l'alarme, etc.

De manière générale, les interfaces graphiques se caractérisent elles-aussi par une complexité visuelle importante. Elles sont le plus souvent le reflet de systèmes informa-

tiques complexes, où les objets et les relations sont nombreux. Les limites des boîtes à outils les plus répandues, combinées à une absence fréquente de compétences graphiques chez les concepteurs d'interfaces, mènent le plus souvent à des images complexes et difficiles à analyser pour l'œil : les interfaces ne sont que rarement structurées en niveaux de lecture comme le sont par exemple les affiches publicitaires, bien que le besoin y soit sans doute plus fort.

En conséquence, le problème qui se pose pour la conception d'alarmes visuelles se ramène souvent à un casse-tête : comment ajouter une couche supplémentaire d'informations prioritaires alors même que les écrans sont proches de la saturation et qu'on manque déjà de moyens pour les structurer ? Indépendamment des nécessaires travaux sur la lisibilité des interfaces graphiques, une forte contrainte de lisibilité pèse sur les alarmes : elles doivent être détectées et interprétées rapidement.

Un autre besoin est la capacité des signaux à transmettre de l'information, que ce soit le type de l'alarme ou des données complémentaires. Par exemple, un contrôleur aérien devra savoir immédiatement si le signal qu'il reçoit correspond à un rapprochement dangereux entre avions ou à un message reçu d'un autre contrôleur. Et le cas échéant, il doit savoir rapidement de quels avions il s'agit, la nature du rapprochement, et si possible le degré de gravité de l'alarme. Il faut donc à la fois disposer d'une gamme de signaux correspondant à des types d'alarmes différents, et que certains de ces signaux transportent des informations supplémentaires.

De plus, au-delà même de la différenciation des signaux, il faut pouvoir les hiérarchiser en fonction de leur degré de gravité, et de leur donner des efficacités plus ou moins grandes. Il peut paraître paradoxal de vouloir graduer l'efficacité des signaux alors même que l'on cherche à obtenir une efficacité maximale. La raison en est que la capacité d'attention des utilisateurs est limitée, et qu'à l'opposé leur capacité d'accoutumance est très grande. Ainsi, il est connu dans le monde aéronautique qu'une alarme qui se manifeste trop souvent perd son rôle sécuritaire. Par exemple, il existe sur les avions un signal qui indique que l'on descend en dessous d'une certaine vitesse avec le train d'atterrissage rentré : cela correspond aux phases d'atterrissage. Mais d'autres phases de vol provoquent parfois les mêmes conditions, amenant donc l'alarme à se manifester à tort. Plus d'un pilote chevronné a donc ainsi pris l'habitude d'entendre l'alarme et a fini par poser un avion sur le ventre. Il faut donc faire des compromis et accepter de réserver les signaux les plus efficaces à certaines alarmes.

Enfin, vouloir notifier des alarmes ne signifie pas que l'on est prêt à masquer d'autres informations : en effet, ces informations peuvent comporter un caractère sécuritaire plus important que l'alarme elle-même, ou être nécessaire à son interprétation. Ainsi dans le cas du contrôle aérien, les informations de l'image radar ne doivent pas être masquées ou rendues moins lisibles.

Alarme = déclencheur + explication

Nous avons vu au début de cet article que ce n'est pas nécessairement une bonne idée de traiter une alarme comme un simple message d'erreur. Et pourtant, la logique en est similaire, au point que les travaux "cognitifs" sur les alarmes ressemblent beaucoup à des travaux sur les explications d'erreurs. Il nous faut donc essayer de clarifier ces notions.

L'objectif d'une alarme est de faire prendre conscience à un utilisateur qu'un événement s'est produit, et de quel événement il s'agit. Il y a donc deux fonctions à l'alarme : l'une consiste à activer l'utilisateur, et l'autre à l'informer. On peut donc décomposer les alarmes entre un déclencheur (ou une notification) et une explication. Le but du déclencheur est d'attirer l'attention de l'opérateur. Il fait donc appel principalement à des considérations perceptives. A l'opposé, le but de l'explication est de fournir les informations nécessaires à la compréhension, voire au traitement de l'alarme. Elle fait donc appel à des notions cognitives, d'où les travaux de Wickens par exemple.

Il est parfois possible que le déclencheur et l'explication cohabitent dans un même signal. C'est ce que proposent les tenants de l'approche écologique. Néanmoins, quand il n'existe pas de "signaux écologiques" adaptés, les deux notions gagnent à être traitées de manière complémentaires mais distinctes. Les deux fonctions sont d'abord complémentaires. Une explication sans déclencheur est un simple message d'erreur. En fait, le simple fait qu'un message apparaisse là où il n'était pas est en soit un déclencheur, mais ce n'est pas toujours un déclencheur suffisant. Dans une interface de commandes ou un système de boîtes de dialogue où l'utilisateur est en attente d'une réponse du système, un message d'erreur peut provoquer un effet suffisant. Mais sur une interface à manipulation directe où les données sont nombreuses et où l'on respecte le principe de localité de Wickens (explication située près des données concernées), il faut un déclencheur associé (clignotement, son, etc). Réciproquement, un déclencheur sans explication est insuffisant : d'une part les déclencheurs transportent peu d'information, et d'autre part pour attirer l'attention de manière adaptée, les déclencheurs doivent souvent être des phénomènes transitoires, et n'ont donc pas de persistance. C'est le rôle de l'explication. Ainsi, il faut dans la plupart des cas amener par un déclencheur l'utilisateur à lire l'explication. Les deux gagnent toutefois à être traités de manière distincte, car si l'explication doit être persistente, le déclencheur ne doit pas être permanent de peur de provoquer une accoutumance.

Dans la suite de cet article, nous utiliserons les mots alarme et déclencheur dans le sens qui vient de leur être donné. Nous considérerons par ailleurs les signaux visuels comme étant le média qui transporte essentiellement le déclencheur (et parfois accessoirement des éléments d'explication). A l'exception du paragraphe suivant, le reste de cet article portera sur les signaux visuels et des pistes pour leur conception.

Alarmes, événements, feedbacks

Une fois établie la distinction entre alarme et déclencheur, une généralisation à d'autres notions des interfaces homme-machine est possible. L'alarme est en général associée à une situation indésirable, mais il est souvent tentant de d'utiliser le même mot pour des événements moins graves, par exemple la réception d'un message électronique. Dans ce cas, le déclencheur est par exemple un son, et l'explication est la présence du message dans la boîte. On voit là que le couple déclencheur-explication (qui correspond exactement au couple événement-état de Dix [5]) s'applique à d'autres constructions dans les interfaces. Tout d'abord, il s'applique aux événements "non redoutés" comme la réception d'un message électronique que nous venons d'évoquer. Il s'applique aussi aux feedbacks, ces réactions du système aux "événements de l'utilisateur", c'est-à-dire aux actions de l'utilisateur. On voit ainsi des auteurs arguer de l'importance de fournir des déclencheurs visuels animés pour ponctuer les actions de l'utilisateur, ce qui décharge son système cognitif sur son système perceptif de l'évaluation du résultat de ses actions [14, 11]. Les alarmes apparaissent ainsi comme des cas particuliers d'événements, tout comme les feedbacks.

VERS DES HIÉRARCHIES DE SIGNAUX ANIMÉS

Les sections précédentes ont permis d'identifier un certain nombre de pistes de conception d'alarmes ou de signaux visuels, qu'il s'agisse d'objectifs comme la lisibilité ou la détection des signaux, de principes comme ceux de Wickens pour les explications, ou de contraintes comme la nécessité de ne pas masquer le contenu de l'écran. Dans cette section, nous allons chercher à identifier des éléments de conception pour concevoir des signaux visuels répondant à ces objectifs, ces contraintes ou ces principes.

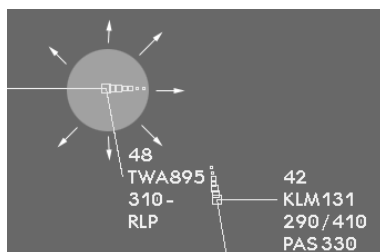


Figure 1. *Un halo circulaire semi-transparent animé de pulsations*

Nous allons ici nous intéresser aux signaux animés, avec pour cela plusieurs raisons. La première, toute théorique, consiste à dire qu'un signal est nécessairement une forme d'animation, même s'il s'agit de la simple apparition d'un objet [4]. La seconde raison est que nous recherchons la détection des signaux, et que seuls les mouvements sont détectés en vision périphérique. La troisième raison est que l'on peut le cas échéant réaliser des animations transitoires, ce qui perturbe peu la lisibilité de l'écran.

Nous allons ensuite chercher à obtenir des gammes de signaux plus ou moins efficaces, pour des raisons qui ont été expliquées plus haut. Nous allons pour cela ten-

ter d'identifier un espace de conception dont les dimensions seront des paramètres graphiques ou des paramètres d'animation. Enfin, nous allons exploiter les capacités graphiques des ordinateurs modernes, car si les boîtes à outils et les informaticiens ont des capacités graphiques limitées, les artistes, les graphistes et les auteurs de dessins animés ont depuis longtemps montré la manière dont on peut exploiter la perception visuelle. Dans un souci de souplesse, les prototypes décrits dans cet article ont été réalisés avec le langage graphique OpenGL. Il va bien entendu de soi qu'on ne peut décrire pratiquement par un espace et des dimensions l'ensemble des animations possibles, mais nous allons tenter d'identifier quelques paramètres facilement manipulables.

Forme et couleur Les paramètres les plus faciles à manipuler sont la forme et la couleur des objets que l'on anime. Ce sont aussi les paramètres pour lesquels il existe déjà des données disponibles, qu'il s'agisse de l'influence de la surface (forme et taille) des objets ou de l'influence de la couleur sur la détection de signaux.

Transparence Il est possible de représenter des objets en transparence. C'est très utile lorsqu'il faut ajouter des signaux sans masquer le contenu de l'écran. La transparence a par exemple été utilisée pour réaliser des menus qui préservent le contexte [8]. La transparence fournit une échelle linéaire entre 0% d'opacité (invisible) et 100% d'opacité. Une opacité de 50% est facilement simulable dans un environnement graphique basique comme le X Window System. La figure 1 donne l'exemple d'un objet semi-transparent superposé à la représentation d'un avion sur une image radar.

Contraste, gradient de transparence Tout comme la couleur d'un objet n'est pas nécessairement unie, la transparence d'un objet peut varier sur sa surface. Ce paramètre permet de réaliser des objets qui offrent un contraste plus ou moins net avec leur fond. Ainsi, la figure 2 donne une variante moins contrastée du halo de la figure 1

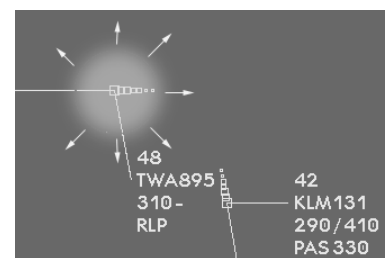


Figure 2. *Un halo à gradient de transparence*

Type d'animation Il est sans doute illusoire de vouloir décrire tous les types d'animation. On peut cependant tenter une catégorisation grossière en déplacements d'objets, changements de formes ou de taille, et changement d'aspect (couleur, transparence, etc). Les figures 1 et 2 correspondent à un changement de taille. On pourrait aussi imaginer un objet tournant sur lui-même, ou un objet passant du vert au rouge par exemple.

Fréquence Tout mouvement périodique est caractérisé par une fréquence de base, qu'il s'agisse du déplacement d'un objet ou d'une variation de couleur. On peut imaginer a priori que la fréquence de l'animation peut conditionner la manière dont le signal est perçu tout comme elle peut permettre le codage d'une information : gravité de l'alarme par exemple.

Profil temporel Comme la fréquence, le profil temporel caractérise l'évolution du signal au cours du temps. Ainsi, la figure 3 décrit trois types de profil. Si la grandeur qui varie est le diamètre d'un disque, le profil carré correspondra à un clignotement entre deux tailles (voire à un clignotement tout court), le profil sinusoïdal correspondra à une pulsation plus douce, et le profil en dents de scie à des flashes plus violents. Le profil temporel peut a priori avoir les mêmes applications que la fréquence.

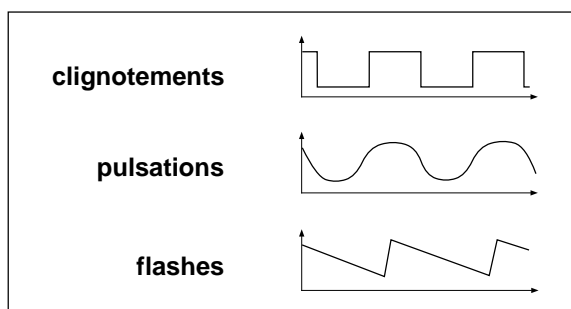


Figure 3. Différents profils temporels de signaux

Localité de l'animation Enfin, bien que nous ayons déjà traité du type d'animation, il nous a semblé utile d'introduire un autre paramètre : l'aspect local ou global d'une animation, selon qu'elle concerne la totalité de l'écran ou une zone très délimitée. En effet, nous avons choisi d'utiliser des animations pour exploiter la vision périphérique, mais cette dernière a des limites. Nous avons donc imaginé d'aller "chercher l'oeil" là où il se trouve, en donnant une grande ampleur à des signaux suffisamment discrets pour ne pas perturber la lecture. La figure 4 est un exemple d'une tel signal : les vagues concentriques se rapprochent du centre de l'animation, y attirant l'oeil.



Figure 4. Un premier prototype d'animation globale : des vagues concentriques

EXPÉRIENCE

Nous avons procédé à une expérimentation en vue d'établir l'influence de certains des paramètres que nous avons décrits. L'objectif était, sinon d'établir immédiatement une hiérarchie entre ces paramètres, du moins de mieux comprendre la manière dont la perception réagit à leur variation. Nous avons identifié deux manières possibles de mesurer la perception de signaux. La première consiste à soumettre le sujet à des signaux aléatoires en quantité telle qu'il ou elle ne les repérera pas tous, puis à déterminer ceux dont la probabilité de détection est la meilleure. La seconde consiste à mesurer le temps mis par les sujets pour réagir aux signaux, un temps plus faible correspondant à une meilleure détection.

L'expérience que nous décrivons correspond au second paradigme. Elle repose par ailleurs sur un principe de double tâche, car notre but était de simuler des situations où l'attention du sujet était requise par ailleurs (comme dans le contrôle aérien) et d'étudier la sensibilité de la détection au degré de concentration du sujet sur son autre tâche. Nous avons choisi pour cela la tâche de Stroop. Le test couleur-mot de Stroop, qui est documenté depuis maintenant plus de 60 ans, fournit des tâches de difficulté croissante et des données très stables sur la performance humaine dans ces tâches [9, 10]. Le principe consiste à regarder des mots ou des séries de lettres imprimés en couleur, et à lire le mot ou énoncer la couleur dans lequel le mot est imprimé. Nous avons utilisé trois niveaux de difficulté. Le plus facile est de lire des noms de couleur écrits en noir (exemple : le mot "rouge" est écrit en noir, et il faut dire "rouge"). La tâche intermédiaire consiste à dire la couleur de série de lettres (exemple : "xxx" est écrit en jaune, il faut dire "jaune"). Enfin dans la tâche la plus difficile, les mots affichés sont des noms de couleurs, ils sont affichés dans une couleur qui n'est pas nécessairement celle qu'ils désignent, et il faut énoncer la couleur dans laquelle ils sont affichés (exemple : le mot "rouge" est affiché en jaune, et il faut dire "jaune"). La vitesse de lecture observée lorsqu'on passe de la première à la seconde, puis la troisième tâche, se dégrade de manière stable et prédictible. Dans notre expérience, nous partons du principe que l'attention requise est proportionnelle à la dégradation de performance mesurée, ce qui nous permet de graduer l'attention du sujet requise par la tâche. Les données disponibles dans la littérature nous ont par ailleurs permis de valider la fiabilité de nos mesures.

Paramètres testés

Dans cette première expérience, les signaux que nous avons testés étaient des variantes de disques jaunes "clignotants". Nous avons choisi une forme et une couleur fixes parce que l'influence de ces paramètres sur la détection est déjà documentée. Nous avons choisi la forme circulaire pour sa neutralité symbolique (par opposition au triangle qui indique souvent un danger), et la couleur jaune en raison des données qui la présentent comme la couleur la plus détectable (c'est dans le jaune que le champ perceptif est le plus large). Dans tous les cas, les disques jaunes étaient animés de pulsations faisant varier leur diamètre entre 10 et 25mm. Le test a utilisé systématiquement toutes les variantes possibles selon quatre

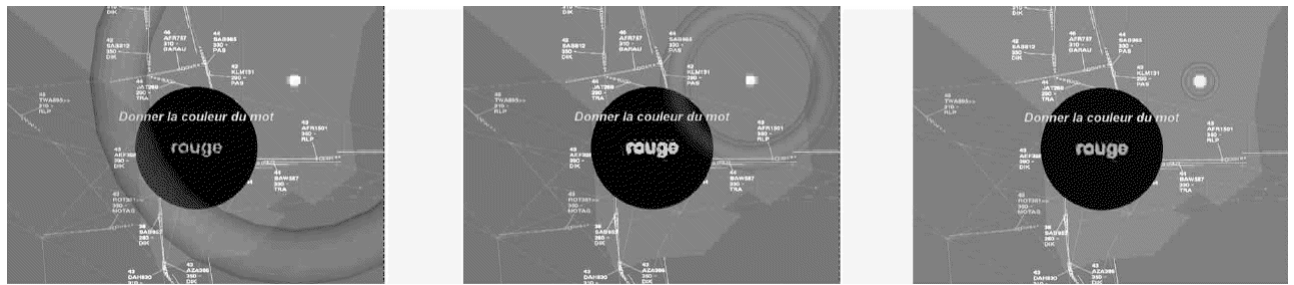


Figure 5. L'animation globale testée : un anneau converge vers le disque central du signal.

dimensions :

- la transparence : le disque était affiché avec 18%, 30% ou 50% d'opacité.
- la fréquence de pulsation : 0,75 Hz, 1,5 Hz, ou 2,5 Hz.
- le profil temporel : le diamètre du disque variait selon des pulsations pseudo-sinusoidales ou des flashes (voir figure 3).
- le caractère local ou global de l'animation : dans la variante globale, la pulsation était accompagnée d'un anneau traversant l'écran pour converger vers le disque (voir figure 5)

Dispositif et protocole

Lors de l'expérience, les sujets étaient assis devant un écran cathodique tactile de 21 pouces (voir figure 7). La distance de l'oeil à l'écran variait entre 60 et 70 cm, en fonction de la longueur de bras des sujets. La tâche de Stroop était commandée par la voix : un micro captait la voix du sujet, et un système de seuil sonore détectait l'énoncé des mots ou des couleurs. Le mot suivant apparaissait après un délai fixe suivant l'énoncé. La vitesse d'apparition des mots était ainsi entièrement pilotée par la performance du sujet. Les erreurs étaient détectées et notées à mesure par l'expérimentateur. Sur l'écran, la

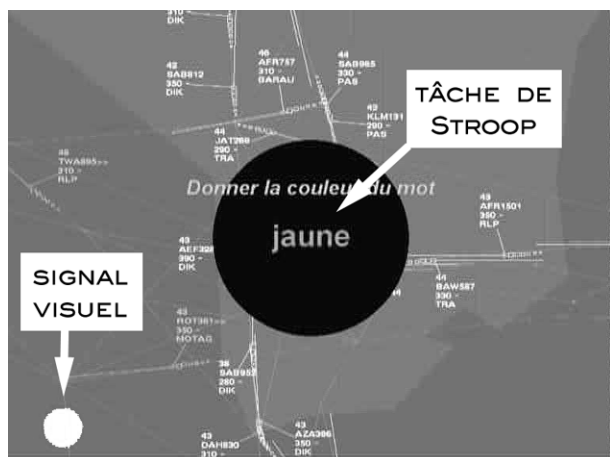


Figure 6. L'écran de l'expérience : la tâche de Stroop au centre, et des signaux visuels aléatoires à la périphérie.

tâche de Stroop occupait la zone centrale, comme illustré par la figure 6. Les signaux visuels venaient s'afficher

en des endroits et à des instants aléatoires, à la périphérie de l'écran. Les sujets avaient pour instructions de se concentrer sur la tâche centrale, et de ne pas chercher à détecter activement les signaux. Ils devaient réaliser la tâche centrale le plus rapidement possible, en cherchant à minimiser les erreurs. Lorsqu'il ou elle détectait un signal, le sujet devait désigner le lieu où il se produisait en touchant l'écran à cet endroit. Le reste du temps, le sujet devait garder la main posée sur le clavier de l'ordinateur qui pilotait l'expérience, ce qui permettait de mesurer le temps de réaction (égal à l'écart temporel entre l'apparition du signal et le relâché du clavier). Nous mesurons par ailleurs la précision de la désignation sur l'écran.

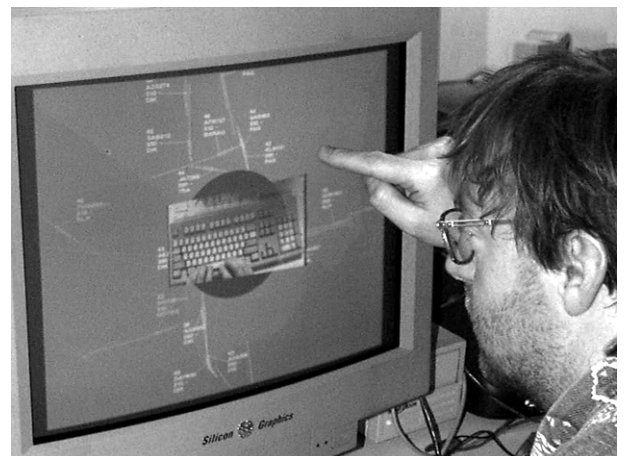


Figure 7. Le dispositif expérimental : les sujets étaient assis devant un écran tactile.

Sujets et tests

Six sujets ont participé à l'expérience, chacun étant exposé aux trois conditions de la tâche de Stroop. Chacune des 36 configurations possibles du signal visuel était présentée 10 fois, dans un ordre aléatoire. L'expérience était divisée en trois séances d'une heure, à raison d'une séance par jour. Chaque séance correspondait à une condition de la tâche de Stroop. L'ordre des conditions était équilibré sur l'ensemble des sujets.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous présentons dans cet article les résultats seuls concernant le temps de réaction. Pour cette variable, nous avons effectué une analyse de la variance (ANOVA) intra-sujet avec mesures répétées.

Nous observons tout d'abord comme espéré que la charge

attentionnelle (pilotée par le degré de difficulté de la tâche de Stroop) a une influence sur le temps de réaction. Les temps de réaction moyens augmentent significativement avec le niveau de difficulté ($p < 0,02$). Cela conforte ainsi l'hypothèse selon laquelle le temps de réaction à un signal mesure l'efficacité relative de ce signal à attirer l'attention par rapport à une tâche consommatrice d'attention : plus la tâche est complexe, et plus il est difficile d'attirer l'attention.

Nous observons ensuite un effet significatif de trois des paramètres que nous avons choisis sur les temps de réaction :

- la transparence ($p < 0,0001$) : plus le signal est transparent et plus le temps de réaction augmente.
- la localité du signal ($p < 0,0001$) : les sujets réagissent plus vite aux signaux globaux de l'expérience.
- le profil temporel ($p < 0,02$) : les sujets réagissent plus vite aux flashes qu'aux pulsations.

En revanche, dans la gamme de fréquences que nous avons observée, la fréquence des signaux n'a pas d'influence significative sur le temps de réaction.

Nous observons par ailleurs des interactions entre les paramètres, qui permettent une analyse plus détaillée des résultats principaux, ou les tempèrent dans certains cas :

- les signaux globaux améliorent la détection, mais seulement pour les signaux très transparents ($p < 0,0001$).
- le niveau de difficulté de la tâche de Stroop amplifie l'effet des autres paramètres sur le temps de réponse des sujets ($p < 0,0001$). Cependant, tout comme la non-localité du signal, son effet diminue pour les signaux les moins transparents ($p < 0,05$).
- pour certains sujets, l'effet de la transparence s'annule aux environs de 50% d'opacité.

Ces interactions devront être mises en rapport avec les autres variables enregistrées, notamment la précision de la localisation sur l'écran. De même, nous chercherons à quantifier l'effet des paramètres sur le temps de réaction, afin d'obtenir un modèle prédictif. Mais les résultats actuels permettent d'ores et déjà des interprétations.

Notre interprétation première de ces résultats est que bien que les sujets ne réagissent pas tous de la même manière, trois paramètres parmi les quatre étudiés ont une influence notable sur le temps de réaction, et donc sur la capacité du signal à attirer l'attention : la transparence, la localité, et le profil temporel. La manière de combiner ces effets permet de contrôler le temps de réaction.

Le paramètre le plus prometteur (mais aussi le plus délicat à manipuler) est la transparence. La sensibilité maximale se situe pour des niveaux d'opacité de l'ordre de 20% et nécessite probablement des réglages fins en fonction de l'effet souhaité. Mais si ces réglages sont possibles, la transparence semble permettre de définir une gamme de signaux de faible priorité. De plus, considérant que la tâche était ici de réagir le plus rapidement possible aux signaux, il est raisonnable de penser que la gamme

de temps de réponse observée serait plus large dans un environnement réel. On notera d'ailleurs que les taux de non-détection augmentent bien avec la transparence.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons abordé le domaine peu étudié de la conception de signaux visuels pour les interfaces graphiques, avec en vue l'application dans des systèmes critiques comme le contrôle aérien. Nous avons étudié les objectifs et les contraintes d'une telle conception, et proposé une distinction entre signal et alarme, entre déclencheur et explication. Nous nous sommes concentrés sur les déclencheurs, et les aspects perceptifs liés aux signaux visuels. Nous avons proposé un premier ensemble de paramètres qui définissent un espace de conception pour les signaux visuels animés. Dans le but de quantifier et de hiérarchiser l'effet de ces paramètres sur la détection des signaux, nous avons décrit une première expérience portant sur quatre paramètres. Bien que les interactions entre ces paramètres soient complexes, les résultats de l'expérience permettent d'établir que trois paramètres sur les quatre ont une influence notable sur le temps de détection du signal. Il nous faudra encore étoffer ces résultats par des tests complémentaires, tenter de comprendre plus en profondeur les interactions entre les paramètres, et tester d'autres paramètres. Nous pourrions à cette occasion étudier la manière dont le son se combine avec les signaux visuels. Deux applications viennent à l'esprit : d'une part l'enrichissement de la gamme des signaux dans les très faibles temps de réaction (pour les urgences graves), et la combinaison du sonore et du visuel dans des signaux multimodaux. Nous espérons ainsi à terme disposer de gammes de signaux adaptées à des besoins divers, et posséder sur ces signaux des connaissances similaires à celles que l'on possède actuellement sur les styles d'interaction.

D'autres études plus théoriques offrent elles-aussi des perspectives intéressantes. Ainsi, comme nous l'avons déjà évoqué, la notification d'information semble un angle intéressant pour étudier la notion de sécurité dans les systèmes homme-machine, qui est encore incomplètement comprise. De nombreux travaux ont été consacrés à caractériser l'utilisabilité, à la décomposer en sous-propriétés [15], ou à modéliser et de quantifier certaines de ses composantes : le "keystroke-level model", GOMS ou encore la loi de Fitts [2] contribuent à améliorer notre compréhension de l'utilisabilité et à faciliter la construction de systèmes utilisables. A l'inverse, il existe peu de travaux sur la sécurité, qu'il s'agisse de la caractériser, de la garantir ou de la positionner par rapport à l'utilisabilité, avec laquelle elle est tantôt complémentaire et tantôt contradictoire. Ainsi, le projet européen Mefisto, consacré à l'utilisation des méthodes formelles dans les systèmes interactifs critiques, a eu des difficultés pour identifier les propriétés "sécuritaires" à intégrer dans les modèles formels. L'une des pistes qui semblent toutefois émerger est la capacité des utilisateurs à disposer des bonnes informations pour évaluer la situation : la "situation awareness". Or les déclencheurs et les explications jouent un rôle important dans sa construction. En conséquence, disposer de résultats expérimentaux et de

modèles prédictifs sur la détection de signaux nous mettrait vis-à-vis de la sécurité dans la même situation que le "keystroke-level model" vis-à-vis de l'utilisabilité. À terme, en intégrant de tels modèles dans des descriptions formelles de systèmes interactifs comme des réseaux de Petri [13], on pourrait envisager de prédire la probabilité de détection d'un événement, et de vérifier que les événements importants seront bien détectés.

Enfin, la récente mise en service des nouveaux postes de contrôle aérien va nous permettre d'appliquer un certain nombre de résultats développés dans cette étude, et va stimuler d'autres études. Ainsi, les spécialistes de la sûreté de fonctionnement posent déjà un problème dual de la notification d'événements : comment montrer de manière non perceptible qu'un système fonctionne bien, de manière à détecter rapidement les pannes, tout comme l'arrêt du bruit d'un moteur signale une panne ?

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants à Sophie Tahmassebi-Zadeh et Sylvie Courteix-Khérouf pour leur avoir apporté le problème qui a provoqué cette recherche, ainsi qu'aux contrôleurs aériens de Paris et de Brest qui ont confirmé a posteriori l'intérêt de ce type de recherche. Merci à Simon Thorpe (laboratoire CERCO) pour des discussions préliminaires sur l'intérêt de cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

1. K. Boff and J. Lincoln. Engineering data compendium, human perception and performance. Technical report, H.Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1988.
2. S. K. Card, T. P. Moran, and A. Newell. *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
3. K. Cardosi and E. Murphy. Human factors in the design and evaluation of air traffic control systems. Technical report, Federal Aviation Administration, Apr. 1995.
4. S. Chatty. Defining the behaviour of animated interfaces. In *Proceedings of the IFIP WG 2.7 working conference*, pages 95–109. North-Holland, Aug. 1992.
5. A. Dix. Beyond the interface. In *Proceedings of the IFIP WG 2.7 working conference*. North-Holland, Aug. 1992.
6. J. Edworthy and A. Adams. *Warning design: a research perspective*. Taylor & Francis, 1996.
7. J. Flach, P. Hancock, J. Caird, and K. Vicente, editors. *Global perspectives on the Ecology of Human-Machine Systems*. Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
8. B. Harrison and K. Vicente. An experimental evaluation of transparent menu usage. In *Proceedings of the ACM CHI*. Addison-Wesley, 1996.
9. A. Jensen and W. Rohwer. The Stroop color-word test: a review. *Acta Psychologica*, 25:36–93, 1966.
10. C. MacLeod. Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychological bulletin*, 109(2):163–203, 1991.
11. C. Mertz and J.-L. Vinot. Conception par maquetage rapide: application à des écrans tactiles pour le contrôle aérien. In *Actes de la conférence Ergo-IA'98*, Nov. 1998.
12. N. Stanton, editor. *Human factors in alarm design*. Taylor & Francis, 1994.
13. P. Palanque, R. Bastide, and F. Paternò. Formal specification as a tool for objective assessment of safety critical interactive systems. In *Proceedings of the Interact'97 conference*, 1997.
14. G. G. Robertson, J. D. Mackinlay, and S. K. Card. Cone trees: Animated 3D visualizations of hierarchical information. In *Proceedings of the ACM CHI'91*, pages 189–194. Addison-Wesley, May 1991.
15. M. van Welie, G. van der Veer, and A. Eliens. Breaking down usability. In *Proceedings of the Interact'99 conference*. Kluwer, Aug. 1999.
16. C. Wickens. *Engineering psychology and human performance*. Harper Collins, 1992.