

- 11 -

" L'homme face aux systèmes techniques complexes "

FUTURIBLES (Juillet/Août 1992)

L'homme face aux systèmes techniques complexes

Plaidoyer pour « l'humanique »

Jacques Villiers ¹

Rappelant d'abord les prodigieux progrès de la science et de la technique, les espoirs et les craintes qu'ils ont pu susciter, J. Villiers entend montrer que, au-delà du mythe du sur-homme (ou de l'apprenti-sorcier) et celui d'un système technique parfait le supplantant, s'est établi en fait un couple indissociable entre l'homme et la technique, chacun doté d'un pouvoir sans précédent et se contrôlant mutuellement.

L'auteur montre en particulier combien les progrès accomplis (et la puissance développée) ont réduit la probabilité d'occurrence des accidents tout en augmentant leur gravité à un point tel qu'il est nécessaire que s'instaure une relation au travers de laquelle l'homme et la machine puissent, non se remplacer, mais veiller l'un aux défaillances toujours possibles de la technique, l'autre aux imprévisibles hévues humaines.

Issu de la première promotion des ingénieurs de l'Aviation civile, J. Villiers fut l'initiateur du projet français d'automatisation de la circulation aérienne (le CAUTRA, Coordonateur Automatique du Trafic Aérien) et développa, au sein du Centre d'Expérimentation de la Navigation Aérienne (CENA) dont il fut le Directeur de 1960 à 1970, une approche originale qui visait, s'agissant de la fonction du contrôleur aérien, à développer un processus d'automatisation dans lequel l'homme conserve sa place incontournable.

¹. Ingénieur Général Honoraire de l'Aviation Civile, Membre de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace.

Les réflexions que développe ici J. Villiers sont donc fondées sur de nombreuses années de recherche et d'expérimentation concernant l'interface homme-système technique et finalement sur la conviction acquise par l'auteur de la nécessité de développer une discipline nouvelle — l'humainique — permettant d'explorer le rôle de l'homme, appréhendé dans toutes ses dimensions (« cognitives, psychologiques, psychiques, sociales, voire symboliques ou ludiques ») dans un système complexe.

Pour avoir goûté au fruit de la connaissance, le genre humain fut condamné, on le sait, à gagner son pain à la sueur de son front.

Mais il se mit vite à comprendre et à espérer que la connaissance qui lui valut cette malédiction pourrait aussi devenir sa planche de salut.

C'est ainsi qu'elle lui permit d'abord de façonner des outils pour lécupler ses forces, pour accroître sa dextérité et pour affiner ses sens, puis d'apprivoiser et de mettre à son service la force musculaire de l'animal.

Puis vint alors le cheval-vapeur et la Révolution industrielle, étapes cependant encore si imparfaites qu'on pût se demander si, en se libérant d'un côté, l'homme ne finirait pas par s'asservir lui-même à la machine, selon les tristes et désespérantes perspectives symbolisées par *Les Temps Modernes* de Charlie Chaplin et bien d'autres.

C'est alors que l'homme parvint à rendre la machine de plus en plus capable et de plus en plus intelligente et put enfin se prendre à espérer que, avec l'avènement des machines-outils, des machines-transferts puis des robots, il allait enfin pouvoir s'affranchir à jamais de la malédiction originelle et ne plus devoir en payer éternellement le prix.

Non satisfait encore de pouvoir économiser ses forces et son temps il vint aussi à pouvoir amplifier ses capacités de prévision et de décision ; il entra alors dans l'ère de la *révolution informatique*.

La connaissance triomphante permet désormais de construire des machines capables de s'adapter à chaque instant à un environnement ouvert, complexe et imprévisible.

L'homme allait peut-être enfin pouvoir réserver la sueur de son front à ses activités ludiques et sportives ; il put même croire un instant qu'il était rendu maître de son avenir qu'il confiait naguère à la seule providence.

C'est alors qu'il dû se rendre à l'évidence et qu'il découvrit après ce long périple que, pour l'heure, ce ne serait plus à la sueur chaude et à la sueur de ses muscles qu'il devrait son pain quotidien, mais à la sueur froide de ses appréhensions, de ses craintes et de ses angoisses.

Car ces machines, qu'elles ne fassent que traiter de l'information ou qu'elles modèlent ou informent la matière, recèlent des dangers directs et indirects de plus en plus graves, voire terrifiants pour l'homme, pour la société et pour l'environnement : l'avenir lui-même devient plus que jamais incertain et de plus en plus imprévisible.

Et dans les mêmes temps, la connaissance elle-même révélait ses propres limites, lorsque ses propres découvertes l'amenaient à devoir renoncer à ce déterminisme dont elle attendait de tout pouvoir comprendre et d'être capable de tout prévoir.

Un nouveau défi barre donc une fois encore la marche vers les temps idylliques. Et cependant l'homme ne veut, ou ne peut, s'arrêter en chemin.

C'est dans ces conditions que de nouveaux systèmes toujours plus complexes et plus puissants, mais aussi toujours plus difficiles à maîtriser, doivent sans cesse être conçus pour faire face aux besoins de la prévision, du développement, de la concurrence et de la productivité ou, en un mot à ce que, avec un optimisme impénitent (ou peut-être simplement pour occulter ses angoisses) l'homme appelle les impératifs du progrès.

Après ces considérations générales et mythico-philosophiques, le moment semble venu de pénétrer au cœur des grands systèmes modernes eux-mêmes, et de s'interroger sur le rôle qui doit rester dévolu à l'homme dans leur conception et dans leur exploitation pour lui permettre de dominer encore et, dans toute la mesure du possible, la complexité de leur fonctionnement et les dangers de leurs dysfonctionnements potentiels, en un mot pour ne pas jouer à l'*apprenti-sorcier*.

Le développement spectaculaire de l'aviation requiert la mise en œuvre de grands systèmes complexes, tant pour la conception et la conduite de l'avion lui-même que pour le contrôle de la circulation aérienne.

C'est une telle expérience qui a inspiré les quelques considérations qui suivent et qui ne relèvent que du simple bon sens ; elles sont peut-être de portée plus générale, car elle concernent des problèmes de même nature que ceux que cherchent aussi à dominer les responsables d'autres moyens de transport ou des centrales nucléaires, par exemple.

La complexité et la sécurité

Tous ces systèmes tiennent leur spécificité commune à la fois de leur complexité, du degré de sécurité qu'ils requièrent, et du fait qu'ils fonctionnent en *temps réel*, l'avion présentant la caractéristique complé-

mentaire de ne pas pouvoir être arrêté à volonté et de devoir toujours poursuivre sa trajectoire jusqu'au sol en toute circonstance.

Tous ces systèmes présentent aussi toutes les autres caractéristiques de la *complexité* au sens moderne de ce terme : ils sont baignés dans un environnement ouvert et plus ou moins prévisible, utilisent des données plus ou moins floues (et fausses parfois) et traitent de processus souvent irréversibles comprenant de nombreuses rétro-actions, interactions et embranchements.

A ces contraintes de complexité s'ajoutent celles de la sécurité. En effet, les conséquences d'un accident éventuel peuvent revêtir une gravité telle qu'elles doivent être considérées comme inacceptables.

Une catastrophe non merci² !

Les autorités responsables sont ainsi amenées à fixer des objectifs de sécurité en rapport avec l'énormité des enjeux directs et indirects, de telle sorte que le produit de l'*infime probabilité* d'occurrence de la catastrophe par l'*énormité* de ses conséquences soit rendu lui-même aussi faible que possible faute de pouvoir être nul.

Une telle démarche est évidemment très satisfaisante pour l'esprit, mais les difficultés commencent dès lors qu'on arrive à son application pratique, et d'abord pour chiffrer dans l'absolu le niveau de risque « acceptable » : une catastrophe tous les dix ans ? tous les vingt ans ?

Cette probabilité étant néanmoins supposée fixée, notamment par référence au passé (chaque nouveau système devant être au moins aussi sûr que ceux qui l'ont précédé), les difficultés ne sont pas pour autant résolues car il faut encore pouvoir apporter la preuve a priori que cette sécurité sera effectivement atteinte.

Or, les événements à considérer étant à la fois extrêmement improbables et leur conjonction pratiquement imprévisibles, il faudrait en théorie un temps quasi infini pour pouvoir certifier un système complexe, dans la mesure où les événements les plus improbables sont aussi ceux qui échappent le plus aux possibilités du calcul en se refusant d'obéir a priori à des lois mathématiques (gaussiennes ou autres) !

Où s'arrête la prévisibilité et où commence la fatalité ?

Il existe heureusement des méthodes qui permettent cependant de s'approcher de l'objectif d'une manière très réaliste et de pouvoir apporter une très grande présomption de preuve que tel ou tel système peut être à même de fonctionner avec la sécurité requise.

2. Cette phrase est inspirée du titre de l'ouvrage de Nicolle, Jean-Louis ; Carnino, Annie ; Wanner, Jean-Claude. — *Catastrophes, non merci !* — Paris : Masson, 1989, 56 p.

L'homme, la sécurité et la complexité

Constater, comme on le fait encore trop souvent que la majeure partie des accidents a pour origine une défaillance humaine relève de la pure évidence, voire de la tautologie, dans la mesure même où il s'agit d'artefacts.

Ne peut-on pas voir plutôt dans un tel adage une sorte d'alibi de la part de ceux qui conçoivent, certifient ou exploitent ces systèmes, en toute connaissance des faiblesses inhérentes à la nature humaine.

Et d'ailleurs ne serait-ce pas un paradoxe que de maintenir l'homme dans le système en dépit de sa faillibilité, dans le cas où il serait possible et économiquement justifié de ne recourir qu'à des automatismes ou des robots ?

En fait, et en dépit de toutes les précautions, la machine reste elle-même faillible, non seulement en raison de la panne de certains de ses composants, mais aussi des insuffisances ou des défauts de sa conception (et notamment de sa programmation) qui peuvent ne se manifester que dans certaines combinaisons de circonstances internes ou externes au système à la fois improbables et imprévues, voire imprévisibles.

Les pannes prévisibles peuvent être détectées par la machine elle-même et palliées par des redondances appropriées, mais certaines défaillances non imaginées à l'avance peuvent néanmoins passer inaperçues et entraîner le système hors de son domaine de sécurité de fonctionnement à l'insu de ses dispositifs de contrôle.

C'est la raison qui justifie souvent de maintenir l'homme dans l'exploitation du système du fait de ses aptitudes exceptionnelles dans des circonstances exceptionnelles.

Le recours à l'homme s'impose d'autant plus que les systèmes sont plus complexes.

Mais, ce faisant, on rencontre un deuxième paradoxe : le maintien de l'homme a pour corollaire d'ajouter les facteurs de complexité, d'imprévisibilité et de faillibilité inhérents à la nature humaine et dépassant ceux de la machine elle-même.

La conception de telles machines relève quelque peu de la fable de l'aveugle et du paralytique, chaque partenaire assumant sa propre faillibilité et pouvant pallier les défaillances ou les insuffisances de l'autre !

En termes mathématiques on dirait que la fiabilité d'ensemble résulte du produit des probabilités d'occurrence d'une catastrophe résultant respectivement de la machine et de l'homme supposés se *surveiller* mutuellement selon des processus redondants et indépendants. Si l'exposant de chacune de ces deux probabilités pouvait ainsi être divisé par deux par rapport à celui de l'objectif final assigné, il va de soi que les problèmes

en serait *radicalement* simplifiés et ramcnés à l'échelle de ce qui reste encore du domaine du prévisible et du maîtrisable.

Dans une telle perspective, l'homme ne doit pas être considéré comme une simple adjonction *de pis-aller* à une machine supposée quasi-parfaite (mais faillible et imprévisible parfois encore), mais comme une des composantes à *part entière* de ce qui est en fait une véritable « *chimère* des temps modernes », système hybride de l'homme et de la machine formant un tout indissociable.

Rôle de l'homme / rôle de la machine

On dit aussi souvent que l'homme doit être « maintenu dans la boucle ».

Une telle formulation est cependant ambiguë et réductrice ; elle peut même être mystificatrice.

Les systèmes complexes sont en effet constitués par une arborescence de nombreuses boucles couplées entre elles ; le rôle dévolu à l'homme doit évidemment être différencié selon les boucles concernées et selon les circonstances.

Pour illustrer l'approche du problème, on distinguera 4 niveaux d'intervention de l'homme et/ou de la machine, selon 4 images que l'on émaillera de quelques exemples : le maître à bord, la maîtrise des processus, l'œil du maître, maître après Dieu.

Maître à bord

C'est en principe l'homme qui fixe les objectifs généraux à la machine en fonction des circonstances et de l'environnement, par exemple le commandant de bord d'un avion lorsqu'il entre le « plan de vol » (c'est-à-dire la trajectoire qu'il se propose de suivre depuis le départ jusqu'à l'arrivée) ou qu'il se conforme aux instructions du contrôle au sol pour rendre compatible cette trajectoire avec l'ensemble de la circulation aérienne, ou encore qu'il choisit certaines procédures, par exemple, à l'approche d'un aéroport.

Dès ce stade et en dépit, ou peut-être en raison, de la simplicité de ces opérations, l'homme peut se révéler faillible par simple manque de vigilance ou par différents types d'aberrations, même s'il ne s'agit que d'entrer des informations simples dans le système.

On imagine facilement que des accidents auraient pu être évités si la machine avait été rendue en mesure de détecter dans les informations

reçues celles qui ne sont pas réalistes ou qui ne sont pas cohérentes avec l'ensemble des autres informations disponibles par ailleurs.

Maîtrise des processus

Pour certains processus élémentaires, la rapidité de l'action requise peut être extrêmement élevée, et dépasser notamment les aptitudes d'un opérateur à s'y insérer, sauf à exiger de sa part une tension extrême, voire d'accepter une dégradation des performances de ce processus.

Tel est le cas du pilotage des avions dans les conditions normales, étant d'ailleurs constaté que le pilotage direct, sans traitement automatique préalable de l'information ne reste plus possible avec les avions modernes.

L'homme a d'ailleurs bien d'autres raisons d'être maintenu dans le système pour contribuer à sa sécurité, que d'être asservi dans une boucle de pilotage parfaitement automatisable. Le mot « asservissement », parle suffisamment de lui-même pour ne pas nécessiter de commentaire !

L'œil du maître

On peut assigner pour tâche à l'homme non seulement de s'assurer que chacun des processus automatiques se déroule en toute sécurité, mais encore que l'ensemble de tous les processus amène effectivement la machine à se comporter d'une manière compatible avec son environnement.

Or, l'homme n'est déjà pas en mesure de suivre pas à pas le déroulement en temps réel de chacun des processus.

A fortiori, la surveillance d'ensemble de tout le système pose ce même problème mais d'une manière aggravée par la multiplicité et l'imbrication de tous les processus. En effet, la machine est programmée d'une manière analytique selon des algorithmes logico-mathématiques, alors que l'homme ne peut appréhender une situation complexe et en détecter rapidement les anomalies que par le jeu d'appréciations globales et de logiques floues.

Maître après Dieu ou le mythe de Zorro

Ce sont ces mêmes aptitudes exceptionnelles qui peuvent permettre à l'homme d'élaborer, si nécessaire, des solutions de nature heuristiques qui, même si elles ne sont pas optimales, peuvent constituer la voie du

recours ultime en cas de défaillances auxquelles la machine ne peut plus faire face à elle seule.

Mais ces « solutions » peuvent parfois aussi se révéler catastrophiques dans certains cas, même lorsque la situation qui les avaient fait suggérer ne présentait pas elle-même une aussi grande gravité. On peut dès lors imaginer que la machine, si elle en a encore la capacité, puisse soit attirer l'attention de l'opérateur, soit interdire leur exécution soit en limiter autoritairement les effets dans le strict respect du domaine de sécurité du système. De nombreux accidents ont déjà été ainsi évités et bien d'autres auraient pu sans doute l'être.

Conception des systèmes

Dans chaque cas d'espèce, les performances respectives des machines et des hommes, de même que leurs potentialités de défaillance, présentent des spécificités qui doivent faire l'objet d'une analyse approfondie avant de pouvoir procéder aux choix fondamentaux présidant à la conception d'un système complexe.

Sur ces bases, il est alors possible de définir à chacun des niveaux d'intervention, les rôles respectifs de l'homme et de la machine, ces rôles pouvant d'ailleurs s'inverser selon les circonstances et les modalités de leur « surveillance » mutuelle.

Dans ces conditions, l'interface homme/machine ne peut plus être conçue comme une simple adaptation le long d'une frontière supposée linéaire entre leurs domaines respectifs (selon les méthodes de l'ergonomie classique avant la « révolution informatique ») mais comme un lieu de rencontre des processus qui se déroulent de part et d'autre.

Il s'ensuit aussi que les informations et les visualisations présentées à l'homme doivent être essentiellement de nature analogique et synthétique et doivent se limiter, en chaque circonstance, à celles qui sont strictement nécessaire en qualité, en quantité et en précision.

Mais de part et d'autre de cette frontière doit pouvoir aussi s'instaurer un dialogue.

Ce dialogue doit non seulement permettre d'échanger des informations pertinentes sur l'état actuel du système et sa prévision d'évolution, mais encore sur les stratégies élaborées de part et d'autre, ce qui est d'autant moins aisé que la machine et l'homme fonctionnent selon des modalités différentes.

S'agissant de systèmes en temps réel, il ne saurait pas non plus être question de procéder à de longues discussions entre ces deux partenaires.

Le rôle de l'intelligence artificielle

Ces dernières analyses amènent à considérer que la machine et l'homme se trouvent dans la situation de deux « joueurs » participant à une même « partie », à la différence essentielle près qu'ils n'ont pas pour objectif de se battre l'un l'autre, mais au contraire de s'aider et de se surveiller mutuellement pour atteindre un même objectif en donnant chacun le meilleur de ses capacités.

Il ne faut donc pas s'étonner de retrouver ainsi le même genre de problèmes que ceux que l'on rencontre dans la programmation des machines destinées à servir de partenaire dans les jeux d'intelligence comme les échecs ou le bridge.

Il n'est pas étonnant que se pose aussi le problème du choix pour la programmation de la machine entre une approche logico-mathématique et une approche d'intelligence artificielle.

Dans le cas des machines à jouer, les avis sont encore partagés sur la supériorité ultime de l'une ou l'autre des approches.

Dans le cas des « chimères homme-machine », un des objectifs vise à permettre à la machine de pouvoir prévoir ce que pense l'homme et ce qu'il cherche à faire à tout moment, en vue notamment de pouvoir l'assister dans sa tâche ou de la superviser ; il est bien évident que dans une telle perspective, c'est le recours aux techniques de l'intelligence artificielle qui s'impose puisque l'homme n'est maintenu dans le système qu'en raison de la manière encore mystérieuse dont s'exercent son jugement et son intelligence.

Dans certains cas, il peut devenir possible de confier à la machine la responsabilité directe de certaines tâches selon des programmes experts élaborés à partir des savoir-faire de l'homme, mais le problème est autre dans le cas qui nous occupe où, pour des raisons de sécurité, l'homme et la machine sont amenés à exercer des fonctions redondantes, chacun avec son « génie » propre et chacun étant mis dans les meilleures conditions pour superviser l'autre et s'y substituer en cas de besoin, puisque c'est précisément de cette redondance qu'on attend la sécurité.

La gamme des possibilités d'aberration de la part d'un être humain est particulièrement étendue, même lorsqu'il est placé dans des conditions « normales » et a fortiori en cas de stress ou, au contraire, de manque de vigilance. On ne manquera pas de rappeler que la pression résultant d'une certaine dose de stress est vitale et de nature à amplifier les performances de l'homme face à la nécessité absolue (et notamment face au danger), mais elle peut augmenter corrélativement ses potentialités d'erreurs grossières de *perception*, de *jugement* ou de *mémorisation*.

... comme peut le faire d'ailleurs aussi la somnolence ou la trop grande euphorie.

On ne manquera pas de constater cependant que *l'homme convenablement professionnalisé est sans doute beaucoup plus prévisible dans ses actions normales qu'il ne l'est dans les actions inconsidérées ou aberrantes qu'il peut commettre, mais en revanche ces dernières sont, en général plus facilement détectables.*

Or, grâce aux techniques de *l'intelligence artificielle*, et notamment des programmes experts, il devient possible d'accéder à la modélisation et donc, dans une certaine mesure, à la prévision du comportement « normal » de l'homme face à certaines situations.

On peut imaginer que, si une telle prévision (complétée par un dialogue qui serait considérablement simplifié en conséquence) pouvait être effectuée par la machine, celle-ci serait placée dans les conditions les plus favorables pour l'assister dans sa tâche et pour détecter les actions éventuellement aberrantes de l'opérateur humain.

L'homme dans toutes ses dimensions

L'approche du problème resterait toutefois trop réductrice si elle ne prenait l'homme en compte que dans ses dimensions *cognitives*.

Ses performances effectives sont considérablement influencées par son état d'esprit de l'instant, par son état de santé, voire par son « état d'âme » et bien entendu aussi par son environnement et par la nature et l'enchaînement des problèmes auxquels il doit faire face.

Sans se laisser aller à un « *humanisme primaire* » trop facilement galvaudé, il est bon cependant de rappeler que la machine doit être conçue et faite pour l'homme et non le contraire.

Dans le cas où l'homme n'est maintenu dans un système à haut risque que pour en assurer la sécurité ultime, le problème prend évidemment une dimension humaine dramatique à la hauteur de ses enjeux, même si une convention « pudique » veut qu'on ne s'y attarde pas ... sauf après l'accident !

Et cependant, bien des problèmes psychologiques et sociaux dans ces domaines ont pour origine les complexes faits d'un mélange de *culpabilisation* et de *sur-valorisation* qui résultent de la situation ambiguë réservée à l'homme dans ces systèmes.

Pour une discipline à part entière : l'humanique

Les problèmes rencontrés dans l'aviation civile et les directions dans lesquelles les évolutions sont envisagées présentent un large degré de généralité.

Ils entrent dans le cadre de ce qu'on pourrait désormais considérer comme une discipline à part entière couvrant la conception des systèmes en *temps réel* à la fois complexes, ouverts sur un environnement lui-même complexe et *peu prévisible* et dans lesquels le rôle de l'homme reste irremplaçable notamment pour satisfaire les très fortes exigences de *sécurité* requises.

La première phase de la démarche doit consister à analyser avec le plus grand soin les spécificités des performances respectives de l'homme et de la machine mais aussi de leurs déficiences potentielles.

La deuxième étape consiste à expliciter les raisons fondamentales qui conduisent à maintenir la présence de l'homme dans le système et les rôles qui doivent lui être dévolus en conséquence.

La troisième étape est de préciser chacun des rôles de l'homme jugés indispensables en chaque circonstance et à chaque niveau de commande ou de supervision du système.

A chaque instant, le haut degré de sécurité requis impose que l'homme et la machine soient en mesure de se contrôler mutuellement, quelles que soient les circonstances et la tâche qui justifient à un moment donné leur intervention.

C'est à cette condition que peut être assurée la sécurité par redondance de deux systèmes aux modes de fonctionnement indépendants, et plus particulièrement que peuvent être palliées les déficiences incontournables et souvent imprévisibles de la machine ou de l'homme avant que puisse être commis l'irréparable.

Mais, dès lors que l'homme, en raison de certains de ses talents jugés irremplaçables, doit être maintenu dans le système à quelque titre, à quelque moment et dans quelques circonstances que ce soit, il importe que *toute la conception du système soit axée autour de l'homme qui constitue le maillon à la fois le plus complexe, mais*

aussi le plus vulnérable et le plus imprévisible de l'ensemble hybride homme-machine ainsi constitué.

C'est en ce sens qu'une telle discipline pourrait s'appeler l'humanique.

La nature très différente des modes de fonctionnement de la machine informatique (essentiellement quantitative et analytique) et de l'opérateur humain (essentiellement analogique et capable d'élaborer des solutions heuristiques) ne rend pas aisé la cohabitation et la coopération de ces deux partenaires.

La machine n'a pas pour l'homme qui la conçoit les mêmes secrets que ceux des mystères de l'intelligence et des comportements humains.

Dans un tel contexte, les techniques de l'intelligence artificielle peuvent être amenées à rendre de grands services notamment pour prévoir le comportement de l'opérateur humain en vue de pouvoir mieux l'assister dans sa tâche, mais aussi pour faciliter le dialogue entre les deux « partenaires » (homme et machine) participant à chaque instant à un même « jeu » avec des rôles différents et complémentaires.

Ces techniques entrent dans le cadre de ce qu'on appelle l'ergonomie cognitive et que l'on pourrait aussi dénommer la Cognitive.

Mais l'homme doit être pris non seulement dans sa dimension cognitive, mais aussi dans toutes ses autres dimensions psychologiques, sociologiques et sociales.

Une telle démarche n'exclut pas le recours à la Robotique pour certains processus qui peuvent se passer de l'homme ou dans lesquels celui-ci peut être considéré comme un simple servent.

Mais elle est de nature beaucoup plus générale et caractérise la conception de systèmes dans lesquels l'homme reste considéré comme un maillon irremplaçable et où tous les moyens techniques doivent être organisés autour de lui en vue de lui faciliter la tâche jugée essentielle, fut-elle résiduellement minime, ainsi que de pallier les conséquences de ses déficiences éventuelles.

J.V.

Le cas du contrôle de la circulation aérienne

L'ensemble des grands principes précédents s'applique d'une manière particulièrement exhaustive aux quatre niveaux d'action sur une machine aussi complexe qu'un avion moderne amené à évoluer dans un environnement lui-même complexe et imprévisible.

Le cas du contrôle de la circulation aérienne est d'une nature beaucoup plus spécifique.

Dans ce cas en effet, et à terme prévisible, on ne saurait confier à la machine la conduite des processus décisionnels eux-mêmes, en raison de leur complexité mais aussi et surtout :

- de l'impossibilité évidente de pouvoir arrêter le système ou d'en réduire brusquement la capacité en cas de défaillance de la machine ;
- de l'incapacité d'un homme, qui ne serait pas impliqué d'une manière approfondie et permanente dans l'analyse et le suivi d'une situation complexe en perpétuelle mouvance, de superviser la machine ni encore moins d'en assurer le relais en cas de nécessité urgente.

Du fait de cette dernière contrainte, il n'est même pas évident que l'homme puisse réellement bénéficier de la préparation automatisée de ses décisions, dans la mesure où il n'est guère à même d'apprécier la pertinence de décisions qu'il n'a pas lui-même élaborées.

Le système va donc rester encore longtemps de nature essentiellement manuelle, la machine n'étant chargée que de l'acquisition, de la corrélation et de la visualisation des informations pertinentes.

On ne retrouve donc pas dans ce système les quatre niveaux d'interventions de l'homme et de la machine analysés ci-dessus puisque l'homme reste directement maître des processus fondamentaux.

Or, en cas de fort trafic, l'homme est amené à assurer la compatibilité et la sécurité des trajectoires évolutives de plus d'une quinzaine d'avions dans un espace restreint.

Dans de telles circonstances, il doit mobiliser toutes les ressources de ses compétences, aux limites extrêmes de ses performances maximales ; il n'est donc pas à l'abri de commettre parfois des « bévues » de perception, de jugement ou de mémoire.

Il en est d'ailleurs de même dans les périodes de faible trafic où sa vigilance est trop peu sollicitée.

On conçoit ainsi le rôle essentiel qui pourrait être dévolu à la machine pour assurer la supervision de ses décisions.

La machine est d'ores et déjà en mesure de donner l'alarme aux contrôleurs au moment ultime si deux avions se rapprochent dangereusement (filet de sauvegarde).

Si le système actuel reste satisfaisant du point de vue de la sécurité — qui est assurée dans des conditions conformes aux objectifs — il n'en est pas de même du point de vue social et éthique. Le contrôleur doit en effet donner la mesure extrême de ses talents et assumer ses responsabilités dans un climat de *tension temporelle* et de perception permanente d'un *danger omniprésent* que lui rappellent parfois les alarmes qui, à leur tour, lui rappellent aussi les limites de sa propre infailibilité !

Parmi toutes les bévues susceptibles d'être commises dans un environnement de temps réel, où doivent s'enchaîner de multiples tâches qui réagissent les unes sur les autres, figurent évidemment en bonne place les déficiences éventuelles de la *mémoire à court terme* d'autant plus vulnérable qu'elle n'est pas assistée par des repères matériels extérieurs à « ce qui se passe dans la tête du contrôleur ».

C'est pourquoi on étudie actuellement les possibilités offertes par les calculateurs pour assister le contrôleur dans l'organisation de ses tâches, dans l'élaboration de ses décisions, dans la supervision de leur pertinence et, par dessus tout, pour lui rappeler en temps opportun les ratés éventuels de sa mémoire.

Dans ces conditions très particulières, on pressent bien le rôle essentiel que pourra jouer la réalisation d'un « modèle de contrôleur » (voir l'encadré : le projet ERATO) pour permettre au calculateur de se mettre au diapason du contrôleur et pour induire et comprendre ce qu'il fait, ou cherche à faire à chaque instant, en vue de l'assister éventuellement et de le superviser sûrement.

Ce cas entre particulièrement bien dans celui de deux « joueurs » décrit ci-dessus et dont chacun ignore a priori la stratégie de l'autre.

Le projet ERATO : un « modèle de contrôleur » pour la réalisation des « outils pour le contrôleur »

ERATO (En Route Air Traffic Organizer) est un projet d'ingénierie cognitive pour le contrôle de la circulation aérienne qui a été lancé en 1987 par le Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne (CENNA) en coopération avec l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile), tous deux organismes de la DNA/DGAC (Direction de la Navigation Aérienne). Son objectif est de définir et de réaliser

des « outils coopératifs » capables d'assister et de superviser le contrôleur qui assume la totalité des décisions et la plénitude de la responsabilité.

Il présente l'originalité de s'appuyer sur un « modèle de contrôleur » en cours d'étude depuis de nombreuses années. Pour assister les contrôleurs, il est en effet essentiel de comprendre au préalable et d'une manière explicite et détaillée,

quelles sont les sources effectives de la complexité de leur tâche, comment ils s'y adaptent, quels sont les mécanismes cérébraux qu'ils mettent en œuvre, quels sont les goulets d'étranglement dans ces processus de traitement de l'information et de la production des décisions.

Les contrôleurs doivent mémoriser et traiter en temps réel plusieurs centaines d'informations.

Certaines de ces données sont floues ou incertaines. D'autres ne sont pas encore disponibles au moment où le contrôleur en a besoin pour prendre certaines décisions. Diverses logiques permettent de raisonner sur de telles données et de réviser éventuellement des conclusions antérieures lorsque de nouvelles informations sont disponibles ou deviennent plus précises. Ces mécanismes ont en commun d'être très lourds et inefficaces lorsqu'on les applique à de grandes masses de connaissances. La psychologie cognitive a permis de montrer les techniques très élaborées mises en œuvre par les contrôleurs pour réaliser ces traitements en temps réel. Cependant, ces techniques de traitement de l'information ont un coût en termes de charge de travail. A partir d'un seuil de saturation (qui est de plus en plus souvent atteint), elles ne peuvent plus être mises en œuvre de façon efficace : à partir de ce seuil, plus la charge de travail augmente et moins les mécanismes de traitement de l'information sont efficaces.

La saturation du contrôleur au-delà de ce seuil est susceptible d'être rapidement dangereuse.

Lorsque la demande est trop forte, il en résulte une saturation de l'espace ; les limitations de trafic qui doivent alors être impérativement mises en œuvre entraînent les retards que connaissent désormais trop souvent les usagers.

Les informations sont dès à présent fournies aux contrôleurs par des calculateurs et des visualisations très sophistiqués ; elles ne concernent que les positions actuelles et futures des avions mais pas encore les interactions entre les trajectoires. Elles sont donc encore très rudimentaires en ce qui concerne le travail même du contrôleur. Le projet ERATO a précisément

pour objet de permettre d'assister le contrôleur dans l'organisation de ses tâches et dans ses processus de décision, tout en respectant son temps et ses mécanismes mentaux.

Le « modèle de contrôleur » est donc essentiel et constituera le cœur du système. Il permettra de mettre le calculateur au diapason du contrôleur tout en minimisant les dialogues en temps réel entre eux, et de concevoir des « outils coopératifs » d'aide à la décision de nature originale.

Ce modèle comprend déjà plus de 3 000 règles.

Sa réalisation a posé des problèmes théoriques et pratiques extrêmement complexes dans des domaines aussi variés que la psychologie cognitive, l'ergonomie cognitive, l'intelligence artificielle, l'informatique ; ce système expert a nécessité l'utilisation industrielle de logiques jusque-là réservées à la recherche, comme la logique des défauts ou la logique temporelle floue. Il a été validé comme représentatif du raisonnement du contrôleur pour l'analyse des situations de conflit.

Non seulement ces outils vont respecter les mécanismes mentaux des contrôleurs, mais ils amélioreront l'efficacité de ces mécanismes. Par exemple, ces outils ne résoudre pas les conflits à la place des contrôleurs, mais ils présenteront, de la façon la plus efficace, les informations dont les contrôleurs auront éventuellement besoin pour résoudre plus efficacement et avec moins de stress les multiples problèmes en cours.

La première version de ces outils verra le jour dans les tous prochains mois et les premières expérimentations auront lieu au début de 1993.

Le rôle assigné aux automates ne sera donc pas de tenter de remplacer les contrôleurs ou de leur laisser un rôle complémentaire semi-passif, comme dans la plupart des projets classiques en cours d'étude, mais de leur permettre de mettre en œuvre d'une manière plus efficace et encore plus sûre leur savoir-faire encore irremplaçable.

Marcel Leroux
ENAC/CENA

Il est bien évident que le calculateur ne doit pas risquer d'augmenter la tâche d'un contrôleur déjà saturé ; grâce à ce modèle, on escompte que le dialogue entre le contrôleur et le calculateur pourra être réduit au strict minimum.

Il est enfin un autre type de dialogue dont la pratique d'un tel système révèle le caractère essentiel, c'est celui qui doit s'instaurer entre les concepteurs du système et ceux qui l'exploitent. Ceci est une grande affaire notamment en raison de leurs différences de culture, de compétences, de motivations et de langage. Le mode d'approche qui vient d'être sommairement décrit permet de favoriser la reconnaissance mutuelle des interlocuteurs dans le cadre d'analyses et d'objectifs clairement explicités ; il permet de faire prendre conscience du rôle spécifique de chacun d'eux et de la modestie dont il faut faire preuve devant le peu de chose que l'on sait sur le fonctionnement intime du cerveau humain ... et du sien propre en particulier. Bien des conflits stériles peuvent ainsi être relativisés, sinon évités.

L'évolution potentielle du contrôle de la circulation aérienne sur les bases qui viennent d'être décrites ne permet pas de garantir à court terme un accroissement notable et dès maintenant chiffrable de l'efficacité mesurée en coût ou en capacité mais laisse augurer d'abord de grandes possibilités de progrès de nature éthiques, sociologiques et humains.

Elle semble devoir constituer un passage obligé.

Entre ce système de l'avenir proche et un éventuel système entièrement automatique rejeté à un avenir encore imprévisible, se trouve ce qu'on a pu appeler le passage du « mur de la capacité » pour évoquer d'une manière imagée les instabilités qui caractérisent la longue période de transition au cours de laquelle devront cohabiter le libre arbitre de l'homme et celui de la machine.