

# Une conception anthropo-centrée pour casser le mythe de l'«Humain Magique» en Génie Industriel ?

PATRICK MILLOT, MARIE-PIERRE PACAUX-LEMOINE, DAMIEN TRENTESAUX

LAMIH, UMR CNRS 8201

Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, UVHC

Le Mont Houy, 59313 Valenciennes Cedex, France

{patrick.millot, marie-pierre.lemoine, damien.trentesaux}@univ-valenciennes.fr

---

**Résumé** – Dans les systèmes industriels « intelligents » notamment bâtis autour d'architectures distribuées, holoniques et multi-agents, la démarche de conception ne prend pas prioritairement en compte l'opérateur humain. Cette démarche, souvent pratiquée dans le cadre plus global du génie industriel, est qualifiée de techno-centrée en ce sens que même si elle suppose l'existence de l'humain quand le système fonctionne correctement, elle lui suppose des capacités magiques pour résoudre les situations non prévues ou difficiles. Au contraire le rôle de l'Opérateur humain doit être assigné explicitement lors de la conception des systèmes de pilotage intelligents. Cet article se place dans le cadre du génie industriel et traite de méthodes de conception *anthropo-centrée* c'est-à-dire plaçant délibérément l'humain dans la boucle de pilotage, mais aussi de conduite et de supervision du procédé cible. Après avoir montré les limites de la conception techno-centrée, nous présentons les principes de l'« humain dans la boucle », la décomposition du système selon une hiérarchie d'abstraction structurelle et/ou temporelle (Stratégique, tactique, opérationnelle) permettant de définir les niveaux d'automatisation selon les situations et les principes de la coopération homme machine.

**Abstract** – Even in the more recent intelligent industrial systems equipped with distributed, holonic and multi-agent architectures, design approaches do not take the human operators as a matter of priority to face unforeseen or delicate situations. This approach currently used in industrial engineering and called techno-centered design approach, do not explicitly take the humans into account (or very partially) when the system operates correctly, but supposes the human is endowed with “magic capabilities” to fix difficult situations. This paper claims that the Human Operator(s) role must be defined at the early design phase of the manufacturing system control. We try to show the *Human Centered Design* approaches that place explicitly the “human in the loop” of the system to be automated. We first show the limits of techno-centered design methods. Secondly we propose the principles of a balanced function allocation between human and machine and even a real cooperation between them. The approach is based on the system decomposition into an abstraction hierarchy for instance structural or temporal (strategic, tactical, and operational). A relevant knowledge of the human capabilities and limits allows the task allocation and leads to the choice of the adequate Level of Automation (LoA) according to the system situation.

**Mots clés** – Conception techno-centrée, conception anthropo-centrée, l'humain dans la boucle, niveaux d'automatisation, coopération homme-machine

**Keywords** – Techno Centered Design, Human Centered Design, human in the loop, levels of automation, human-machine cooperation

---

## 1 INTRODUCTION

Cet article se place initialement dans le contexte des systèmes industriels « intelligents » où l'on définit typiquement des architectures de pilotage distribuées, holoniques ou multi-agents, mais nous estimons qu'il reste d'actualité dans le contexte plus global du génie industriel ou des systèmes de pilotage de systèmes socio-techniques complexes soumis à risques et à perturbations, en incluant la production de biens manufacturés mais aussi la production d'énergie ou de services. Il traite de la manière avec laquelle l'être humain est considéré du point de vue de l'automatique dans la conception de systèmes de pilotage intelligents de systèmes industriels pilotés qu'ils soient en

fonctionnement (nominal, dégradé) ou en dysfonctionnement, en incluant un risque potentiel de sécurité notamment. Par pilotage nous entendons l'élaboration d'un ensemble de signaux de commande basés sur une observation et une supervision temps-réel d'un système piloté perturbé tenant compte de signaux de consignes traduisant des objectifs à atteindre tout en respectant un ensemble de contraintes.

La complexité des systèmes industriels et des organisations humaines qui les pilotent s'accroît en même temps que les exigences de sécurité qui s'appliquent. Ces exigences doivent évoluer en fonction des expertises passées qui ont été réalisées suite à des catastrophes industrielles plus ou moins sévères

(Seveso, Bhopal, AZF, Tchernobyl...). En France, une étude menée par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie en 2013 intitulée « inventaire 2014 des accidents technologiques » a montré que les trois premiers secteurs en nombre d'accidents sont l'industrie manufacturière, le traitement des eaux usées et des déchets et l'agriculture et que l'industrie manufacturière de la cokéfaction et du raffinage est à l'origine de 30 accidents pour une dizaine d'établissements. Même si dans cette étude, « seulement » 11% des causes premières proviennent d'une « intervention humaine contre-productive », les causes racines impliquent souvent l'être humain, soit au niveau d'un défaut dans l'organisation du travail et des contrôles, dans le non-respect des procédures, dans les mauvais choix d'équipements et dans la prise en compte insuffisante des retours d'expériences passées.

L'objectif de cet article est de sensibiliser les concepteurs de systèmes de pilotage de réviser leur vision de l'homme dans les systèmes qu'ils conçoivent afin qu'ils tiennent compte des capacités et limites de celui-ci.

## 2 CONCEPTION CLASSIQUE DES SYSTEMES DE PILOTAGE EN GENIE INDUSTRIEL: UNE APPROCHE TECHNO-CENTREE

Dans le cadre des systèmes intelligents (ou dans celui plus général du génie industriel nous pensons), l'approche classique de conception d'un système de pilotage est « techno-centrée ». Elle consiste à automatiser le maximum de fonctions (nominales ou dégradées) dans un cadre prédéfini et à supposer que l'être humain est là pour superviser et gérer tous les cas non prévus. Si tout fonctionne bien, l'être humain est souvent supposé appliqué des procédures pré définies où proposer des améliorations pour accroître les performances (démarche lean par exemple). En cas de situation ou dysfonctionnement non prévus, l'être humain, en tant que superviseur, est dès lors considéré comme un *magicien omniscient* qui va régler tous les problèmes, fournir les bonnes informations au bon moment, dans les délais requis et remettre le système de pilotage en condition opérationnelle. Par dérision nous sommes tentés de l'appeler : *l'Humain Magique*.

Pour illustrer cette vision, nous considérons deux champs de recherche différents mais classiques en automatique dans le développement de fonctions de systèmes de pilotage intelligents : celui (historique) de l'aide à la décision et celui (plus récent) de l'ordonnancement distribué.

### 2.1 L'humain magique en aide à la décision

Dans les années 1980-2000, de très nombreux chercheurs ont développé des systèmes d'aide à la décision (SAD), éventuellement interactifs (SIAD) ou multicritères. Une fonction couramment étudiée dans les SIAD est par exemple la fonction de supervision. Les systèmes pilotés étaient supposés évoluer dans un cadre prédéfini et dans un environnement jugé peu changeant ou de manière suffisamment lente pour pouvoir adapter les décisions dans des temps raisonnables. Toute décision possible devait ainsi être prévue et conçue dès la phase de conception, laissant peu de place aux phénomènes émergents, à l'imprévu ou aux risques. Cet engouement trouvait son origine dans la considération d'un contexte décisionnel basé sur le principe de rationalité limitée au sens de Simon.

Au final ces SIAD se réduisent pour beaucoup à proposer au superviseur humain un ensemble d'alternatives parmi lesquelles celui-ci doit choisir dans des délais déterminés, sans d'ailleurs

lui donner toujours les éléments pour éclairer son choix, ou à l'avertir en cas de dérive sur un indicateur prédéfini afin qu'il puisse remédier à la situation (MacCarthy 2006), (Oborski 2003), (Trentesaux, Moray, et Tahon 1998). Cette vision de la conception du système de pilotage relève donc bien d'une approche techno centrée.

### 2.2 L'humain magique en ordonnancement distribué

Depuis les années 2000, on est face non seulement à la complexité croissante des produits et processus, mais aussi à l'accroissement des incertitudes internes et externes et de la volatilité des informations et des usages. De nouveaux paradigmes d'ordonnancement sont alors apparus, octroyant au système de pilotage plus d'autonomie et de capacités d'adaptation dans cette fonction et en distribuant les capacités de traitement de l'information et de décision à des entités artificielles (typiquement, agents ou holons). De type « bottom-up », ces paradigmes incitent les concepteurs à donner à ces entités des capacités de coopération ou de négociation afin qu'elles réagissent et s'adaptent plus facilement face à l'incertitude croissante tout en maîtrisant la complexité des systèmes à piloter. Cela aboutit à un comportement global plus ou moins émergent éventuellement mixé avec des fonctionnements classiques « top-down » pour limiter cette émergence. Les propositions les plus emblématiques de cette approche de pilotage en production sont PROSA (Van Brussel et al. 1998) et ADACOR (Leitão et Restivo 2006). Des propositions alignées sur cette mouvance sont très régulièrement proposées dans la littérature, avec une terminologie plus actuelle en lien par exemple avec le concept de produit intelligent/actif (Sallez, Berger, et Trentesaux 2009), (Ribeiro et al. 2015) et en élargissant souvent le cadre au-delà de la production pour englober celui de la logistique (Reaidy, Gunasekaran, et Spalanzani 2015), (McFarlane et al. 2013) ou des cyber-physical systems (Gaham, Bouzouia, et Achour 2015).

Même si ces approches considèrent plus facilement l'être humain comme partie prenante des processus (human-in-the-loop), l'intégration de l'être humain est vue de manière très similaire aux approches historiques top-down, c'est-à-dire de manière techno-centrée. Ainsi l'être humain est encore une fois considéré soit comme une interface omnisciente, *l'humain magique*, en cas de problème (par exemple en interface ou en remplacement d'un « staff-holon »), soit comme un « simple » élément (holon ou agent) opérateur pas plus actif qu'un agent ou un holon artificiel mais au moins en interaction avec ces entités artificielles (Zambrano Rey, Carvalho, et Trentesaux 2013).

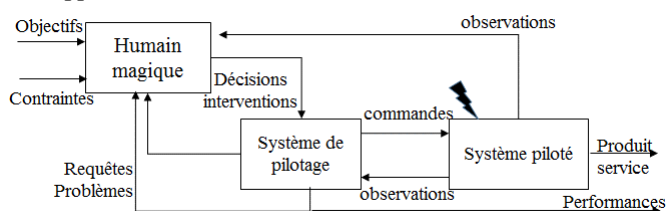
## 3 LIMITES DES APPROCHES DE CONCEPTION TECHNO-CENTREE POUR LE PILOTAGE DES SYSTEMES INDUSTRIELS

Ces deux exemples illustrent clairement, à la lumière de l'étude ministérielle présentée en introduction, le fait que les approches de conception classiques, techno-centrées:

- sous-estiment et sous-exploitent la capacité de l'être humain lorsqu'il est intégré en tant qu'opérateur (au-delà des études en ergonomie qui traitent de la dimension physique et non décisionnelle des tâches),
- surévaluent l'être humain lorsqu'il est superviseur et, pour simplifier, par habitude ou par manque de connaissance des enjeux, le considèrent comme un *Humain Magique* « parfait » sur tous les tableaux : dans sa fiabilité, dans ses décisions, dans sa

capacité cognitive, dans ses temps de réaction, mais aussi, dans sa capacité à faire face à des situations non prévues, à les comprendre et à les contextualiser (« Situation Awareness ») et à s'adapter à l'imprévu.

La figure 1 décrit de manière schématique une telle approche techno-centrée du pilotage des systèmes industriels, avec néanmoins une différence : nous avons représenté explicitement la fonction « humain (magique) » dans le système. Une telle approche conduit à l'identification de tâches qu'il convient d'allouer de manière statique (en conception) soit au système de pilotage automatisé soit à l'*humain magique* et à supposer que seul le système automatisé puisse éventuellement dysfonctionner ou évoluer dans une zone de fonctionnement non prévue par exemple. Le cycle en V classique de la conception illustre bien cette approche.



**Figure 1. Approche techno-centrée de la conception du pilotage.**

Cette simplification de la réalité humaine couplée à l'absence d'une réelle considération du potentiel et des limites humains sous-jacent est de plus en plus critiquée et peut même conduire à des situations mettant en jeu la sécurité humaine dans les systèmes complexes à risques, en génie industriel ou ailleurs (Milot 2014 a).

Dans le domaine du génie industriel, peu de travaux sont menés pour envisager autrement l'implication efficiente de l'être humain dans les systèmes de pilotage et les rares travaux abordent essentiellement la capacité de l'être humain à travailler dans l'incertain (Valckenaers et al. 2011). La nécessité de réviser cette approche de conception classique, techno-centrée est d'autant plus urgente de nos jours pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, l'évolution technologique : le développement de l'internet des objets, de l'intelligence ambiante et des «cyber-physical systems» va octroyer, dans un contexte de comportements émergents (bottom-up) aux systèmes artificiels, produits et ressources de production ou de transport de plus en plus de capacités de communication et d'interaction (entre eux ou avec les êtres-humains) qu'il va falloir judicieusement exploiter et contrôler.
- Ensuite, cette évolution technologique s'accompagne d'un accroissement de la complexité des systèmes, d'une importance grandissante des exigences de sûreté et de disponibilité, du niveau de concurrence et de la volatilité dans la disponibilité des ressources techniques et naturelles. Ceci va limiter de plus en plus la pertinence d'une « simple » approche de conception techno-centrée des systèmes de pilotage.
- Egalement, cette évolution technologique accroît la capacité de traitement des systèmes automatisés. En profiter est ainsi séduisant mais cela pose la question de l'allocation de tâches entre l'homme et le système de pilotage : jusqu'à quel point pousser l'automatisation ? ou en d'autres termes, quel niveau

d'automatisation choisir (Level of Automation LoA) ? ou mieux, comment rendre ce niveau d'automatisation ajustable ? (Flemisch F. et al. 2012).

- Enfin, dans un contexte de développement durable, les dimensions sociale et sociétale, où l'homme est à sa place dans le système, et y joue un rôle performant adapté à ses capacités et compétences, prend de plus en plus d'importance dans le monde industriel.

Dans cet article, nous défendons l'idée de réviser les approches de conception des systèmes intelligents de pilotage et plus généralement, en génie industriel pour les orienter vers une conception plus centrée sur l'homme dans le but affiché de limiter encore plus les risques industriels dans un futur proche. Il est important de noter que cette problématique est désormais explicitement abordée dans des projets Européens (par ex : SO-PC-PRO « Subject Orientation For People Centred Production » ou encore MAN-MADE « MANufacturing through ergonoMic and safe Anthropocentric aDaptive workplacEs for context aware factories in Europe »).

#### 4 LES ENJEUX D'UNE AUTOMATISATION ANTHROPO-CENTREE

Puisque que le concepteur place délibérément l'humain dans la boucle (mais pas son modèle) l'enjeu principal qui lui incombe est d'anticiper les fonctions que va effectuer l'humain et par déduction les informations dont il a besoin pour comprendre l'état du système et formuler une décision, et ensuite les commandes qu'il lui faut pour agir, en d'autres termes les interfaces homme machine appropriées. Le concepteur est alors confronté à un important dilemme:

- d'un côté l'opérateur humain est un garant de la fiabilité du système, et il a sauvé de nombreuses situations critiques par ses capacités de raisonnement dans des situations imprévues, imprécises et incertaines : la mission spatiale Apollo 13 en est un exemple mythique où les trois astronautes n'ont dû leur survie qu'à leur ingéniosité, à leur capacité d'innovation et à celles des équipes d'ingénieurs au sol,
- de l'autre côté l'opérateur humain peut être imprédictible et cause de perturbations dans le système automatisé ; prenons l'exemple de l'industrie nucléaire qui est «intéressante» en ce sens qu'elle nous a donné 3 dramatiques exemples en un peu plus de 30 ans, Three Mile Island en 1979, Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011.

Ces trois accidents montrent les effets d'une interaction homme-machine mal vécue par les Opérateurs humains, et donc mal conçue. Kara Schmitt (2012) résume très bien les problèmes d'interaction hommes-machines rencontrés. L'accident de Three Mile Island résulte d'une incompréhension de l'automatisation en ce sens que les opérateurs n'ont pas compris l'action du système de sécurité automatique qui aurait évité l'accident et l'ont débranché. L'accident de Tchernobyl est caractéristique du manque de confiance envers l'automatisation associé à la méconnaissance de la physique nucléaire et au manque de culture de sécurité de l'époque dans les pays de l'Est. Ces facteurs combinés ont conduit les opérateurs à effectuer des tests aux limites des capacités des réacteurs tout en ayant débranché les systèmes de sécurité. Enfin l'accident de Fukushima, survenu après le tsunami qui a endommagé la centrale nucléaire résulte du manque d'une automatisation appropriée associé à une sous-estimation des risques lors de la conception: la hauteur de

l'enceinte anti-tsunami n'était que de 5,7 mètres alors que les vagues atteignirent 10 mètres, les générateurs de secours étaient placés en sous-sol et ont été noyés, leurs batteries n'ayant alors plus assez d'autonomie pour alimenter les systèmes de refroidissement et mettre en sécurité les 3 réacteurs après leur arrêt. En outre plusieurs des systèmes d'arrêt sécuritaires n'étaient pas automatisés et les principes de sécurité étaient actifs et non passifs et nécessitaient donc de l'énergie pour fonctionner.

En fait l'automatisation n'est pas concurrente du maintien des humains dans les boucles de conduite et de supervision des systèmes, mais l'opérateur humain ne doit pas non plus être surestimé et vu comme un dispositif de secours disponible et fiable à 100% pour assurer les activités non automatisables ou pallier les erreurs de conception. C'est le sens que nous donnons au caricatural « *Humain Magique* ». Au contraire les équipes d'opérateurs humains doivent être pleinement intégrées dans les boucles de commande, de contrôle et de supervision des systèmes hommes-machines, afin de tirer profit de leurs capacités, sans en subir les effets perturbateurs tout en connaissant les limites de ce qui peut leur être demandé (Millot 2014 b).

La question est donc : quelle allocation des tâches ou des fonctions entre humains et machine ? En général dans un système on trouve trois allocations possibles des fonctions entre l'humain et les automatismes (Boy, 2011): *une partie du système (ou de ses modes de fonctionnement) est automatisée* et l'humain n'a pas de rôle apparent (dans les actions mais il peut être impliqué de manière cachée dans la supervision); *une seconde partie ou certains modes de fonctionnement ne sont pas automatisés* mais l'humain doit suivre des procédures préétablies et surtout éviter de prendre des initiatives, il s'agit d'une forme d'automatisation de l'être humain; enfin *la dernière partie n'est pas du tout automatisée* et les humains sont capables et requis pour intervenir dans les situations inattendues. Dans ce troisième cas on attend de l'humain qu'il fasse preuve d'initiative et d'innovation. Nous verrons plus loin que la Conscience de la Situation ou *Situation Awareness (SA)*, qui caractérise la présence humaine dans le système est cruciale.

Depuis la fin des années 90, les domaines applicatifs étudiés ont fortement évolué vers les systèmes complexes et de grande taille, qu'ils soient continus discrets ou hybrides. On parle de systèmes de systèmes, de systèmes en réseau et multi-agents (voir partie 2.2). Le *niveau d'automatisation* a fortement augmenté grâce à l'automatique permettant d'améliorer la *performance* du système de production ou de service.

D'autres objectifs sont maintenant pris en compte, particulièrement *la sûreté de fonctionnement* et *la sécurité*. On s'intéresse de plus en plus aux *systèmes critiques pour la sécurité*. Au milieu des années 2000, René Amalberti (2005) donnait, en substance, le classement des *systèmes à risques* selon leur niveau de risque: les entreprises d'amateurs individuels comme l'alpinisme ( $10^{-2}$ ), les systèmes grand public comme l'automobile ( $10^{-3}$ ), la médecine ( $10^{-3}$ ), l'industrie chimique ( $10^{-4}$ ), les vols charters ( $10^{-5}$ ) et les systèmes dits ultra-surs comme l'aviation commerciale, l'industrie nucléaire et les transports ferroviaires ( $10^{-6}$ ).

Mais dans ces systèmes l'homme ne peut pas être lui-même vu que comme le seul facteur de fiabilité, ou à l'inverse comme le seul facteur d'infiabilité: dans les années cinquante sur 100

accidents d'avion on dénombrait 70 causes techniques et 30 causes humaines. Depuis les années 2000 la proportion globale est inversée, 70 causes humaines pour 30 causes techniques parce que la fiabilité technique a fortement progressé, alors que la compréhension et le traitement des erreurs humaines n'ont pas progressé aussi vite. Ce qui est déterminant c'est d'attribuer à l'humain un rôle en adéquation avec ses capacités et ses limites.

## 5. DEMARCHE DE CONCEPTION ANTHROPO-CENTREE

La conception anthropo-centrée suit une démarche pluridisciplinaire qui déborde du domaine habituel de l'Automaticien et qui mobilise en plus des sciences pour l'ingénieur, des sciences cognitives : psychologie, sociologie, ergonomie cognitive notamment. A l'instar de l'Automaticien il est indispensable de voir le système homme(s)-machine(s) de manière globale, c'est ce que schématise la pyramide AUTOS de Boy (Figure 2). Il faut également maîtriser la complexité du « système humain » et la « complexité du système socio-technique » dans toutes ses dimensions, pas seulement technologiques, mais aussi légales et sociétales : ici vont intervenir les notions de « responsabilité » et d' « autorité » et de leurs partages entre humains et machines. Enfin il faudra définir un (des) niveau(x) d'automatisation adéquat(s), fixes ou flexibles dynamiquement selon les partages d'autorité et de responsabilité. Ce n'est pas facile, mais c'est le prix à payer pour réussir l'automatisation anthropo-centrée.

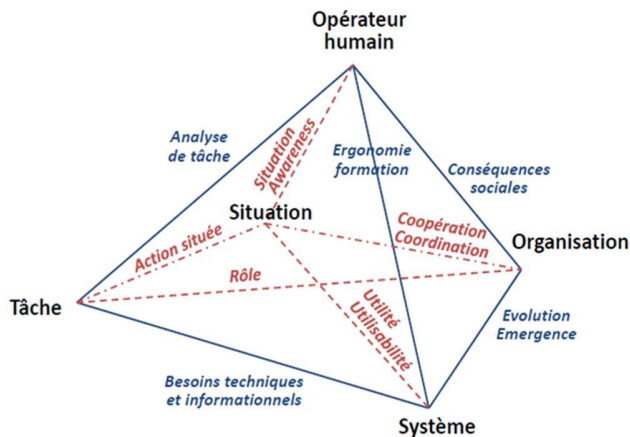
### 5.1. Analyse du système global homme(s)-machine(s)

Du point de vue informatique Guy Boy (2011) schématise l'environnement d'un système homme(s)-machine(s) par une pyramide, composée de 5 sommets et de leurs relations et qu'il nomme AUTOS: A pour Artifact, U pour Utilisateur, T pour Tâche, O pour Organisation et S pour Situation (Figure 2). Transposés aux systèmes dynamiques, l'Artifact devient le *Système* et l'Utilisateur devient l'*Opérateur*. Ce schéma comprend d'abord le triangle classique bien connu de l'automaticien humain O-S-T, l'Opérateur ayant été formé sur le Système, effectuant les Tâches selon les besoins du système en appliquant des procédures (ou en tentant d'innover en cas de problème nouveau), ces tâches devant être facilitées par la qualité ergonomique de l'interaction homme-système mais aussi de l'interface.

Le 4ème sommet *Organisation* introduit le niveau d'automatisation impliquant le rôle de l'Opérateur et les partages des tâches (et des fonctions) entre les humains au sein de l'équipe de pilotage ou de supervision, mais aussi entre les humains et des systèmes automatiques (de commande ou de décision). Le partage des tâches (ou des fonctions) entre hommes et machines attribue aux humains un niveau de responsabilité vis-à-vis de la gestion des performances et des risques et un niveau d'autorité déterminant cette responsabilité. Le contexte socio-organisationnel du système doit alors rendre compatibles ces deux niveaux d'autorité et de responsabilité : cela fait partie du dilemme du concepteur mentionné plus haut. A cet effet, le partage des tâches homme-homme et homme-machine peut ne pas être statique et défini dès la conception, mais évoluer dynamiquement selon des critères intégrant la performance du système global et/ou la charge de travail humaine.

Le 5ème sommet concerne la *Situation* de la tâche qui peut introduire des contraintes nouvelles nécessitant une évolution de la conscience de la situation (Situation Awareness SA) de

l'opérateur humain pour détecter une situation inhabituelle, une évolution des décisions, des compétences mises en œuvre ou encore une évolution dynamique de l'organisation comme évoqué précédemment.



**Figure 2 : Environnement du système homme-machine (adapté de Boy 2011)**

L'imbrication de ces 5 sommets montre alors que la réussite de l'automatisation d'un système va bien au-delà du seul problème d'automatique mais qu'elle doit s'inscrire dans un processus de conception du système homme-machine centrée sur l'homme, à l'instar du projet européen MAN-MADE.

### 5.2. L'Opérateur Humain : quelles fonctions ? quelles erreurs ?

Posons-nous 3 questions :

1) L'humain étant physiquement dans la boucle, quelles fonctions et tâches est-il amené à assurer ? la réponse à cette question permettra au concepteur de spécifier les interfaces d'entrée et de sortie de la boîte Opérateur Humain. Le modèle de résolution de problèmes de Rasmussen ci-dessous est éclairant.

2) L'humain est capable de commettre des erreurs, pour quelles raisons ? comment les éviter ? comment lui permettre de les détecter et de les corriger ?

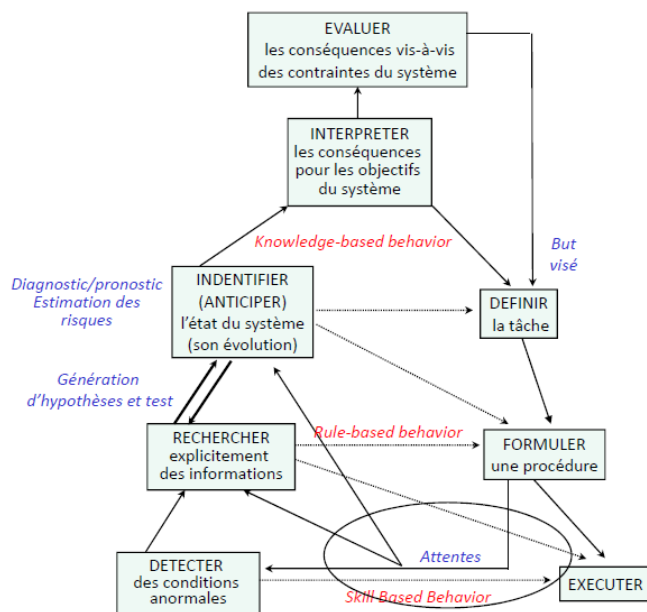
3) Comment s'assurer que l'Opérateur que l'on place comme pilote ou superviseur du système sera apte à détecter un événement, comprendre la situation qui en résulte et prédire l'évolution future de ce système ?

#### 5.2.1 Les fonctions de résolution de problème

L'échelle double de Rasmussen (1983) est un modèle fonctionnel bien connu pour décrire le comportement décisionnel normal de l'Opérateur humain face à un problème à résoudre (Figure 3). L'opérateur détecte un événement anormal, évalue la situation en observant les informations disponibles et en identifiant l'état du système (diagnostic) ou en anticipant son évolution (pronostic). Il élabore ensuite une solution en fonction des contraintes et des risques encourus. Cette solution est planifiée en but, sous-buts et procédures de mise en œuvre ce qui constitue la tâche à exécuter. Si cette tâche résulte en une action, celle-ci est exécutée.

Hoc (1996) a complété le modèle initial de Rasmussen, en précisant les mécanismes cognitifs de l'évaluation de situation, inspirés d'ailleurs de Reason (1990): diagnostic et/ou pronostic par une méthode de génération d'hypothèses (raisonnement guidé

par les données) puis de test de ces hypothèses (raisonnement guidé par les buts). Il introduit également une dimension temporelle (diagnostic : état présent, pronostic: état futur, attentes de l'évolution du système pour reboucler sur une nouvelle évaluation de situation).



**Figure 3. Modèle de résolution de problème (Rasmussen révisé selon Hoc et Reason)**

La seconde richesse de ce modèle réside dans les 3 niveaux de comportement qu'il comprend :

– le niveau des automatismes (*Skill Based Behavior, SBB*) est réactif ; l'opérateur bien entraîné exécute spontanément l'action adéquate dès qu'il détecte les conditions anormales) : c'est ici qu'on retrouve les modèles d'automatique.

Les deux niveaux supérieurs quant à eux sont cognitifs :

– le comportement basé sur des règles (*Rule Based Behavior, RBB*) où l'opérateur expert, ayant identifié l'état du système applique directement une tâche prédéfinie qu'il a apprise : les modèles correspondants ont fait les belles heures des systèmes à Base de Connaissance de l'IA dans les années 80 et 90 ; la question subsidiaire est alors : comment former ou entraîner l'Opérateur à acquérir cette expertise ? les procédures évoquée plus haut en font partie.

– le comportement basé sur les connaissances (*Knowledge Based Behavior, KBB*), où l'opérateur est face à un problème qu'il n'a jamais rencontré et doit inventer une solution. Il s'appuiera par exemple sur ses connaissances structurelles et fonctionnelles ou dysfonctionnelles du système pour raisonner. On verra au paragraphe 5.3 quels types de modèles du système prendre en compte.

#### 5.2.2. Les erreurs humaines

Les études sur les erreurs humaines visent à en comprendre la genèse, afin de les prévenir et/ou les gérer. Par exemple une action erronée peut résulter de l'application incorrecte d'une bonne décision ou de l'application correcte d'une décision inappropriée. La décision erronée peut elle-même produire une mauvaise solution tout en étant basée sur une évaluation correcte de la situation etc. Reason (1990) divise les erreurs humaines en

deux catégories : non-intentionnelles et intentionnelles. Ces catégories sont elles-mêmes subdivisées en *ratés* et *lapses* pour les actions non-intentionnelles, et en *fautes* et *violations* pour les actions/décisions intentionnelles. Les violations comprennent deux catégories: l'une est sans intention de nuire, par exemple pour prévenir un accident imprévu par la procédure, alors que la seconde est malveillante (sabotage).

Rasmussen (1997) tente d'expliquer la genèse de certaines erreurs par la nécessité pour l'Opérateur d'atteindre un compromis entre trois objectifs conjoints mais quelquefois contradictoires (Figure 4) :

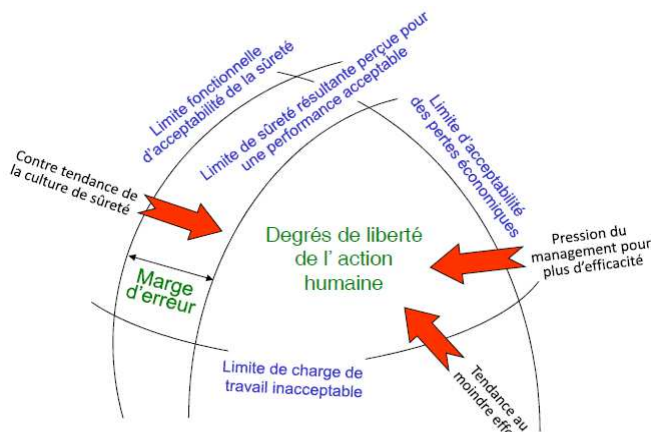


Figure 4. Les compromis qui régissent l'action humaine (adapté de Rasmussen 1997)

- les objectifs de performance imposés soit par le management de l'entreprise, soit par l'opérateur lui-même qui se traduisent par des efforts supplémentaires,
- les coûts cognitifs ou physiologiques (charge de travail, ou WorkLoad notée WL, stress) pour atteindre les objectifs indiqués précédemment, et que l'opérateur tente de réguler. Le lecteur trouvera une présentation plus complète de la régulation de la charge de travail humaine dans Millot (1988) ou plus récemment dans Pichon et al. (2010).
- les efforts induits par les précautions à prendre pour conserver la sûreté de fonctionnement du système, de l'environnement ou des opérateurs eux-mêmes.

Si la pression du management et des coûts cognitifs dus à la tâche s'accroît, l'opérateur aura tendance à « repousser » la limite de sûreté fixée, éventuellement franchir la « marge d'erreur » et même la limite ultime ce qui peut conduire à une perte de contrôle et par conséquent à un incident ou un accident. Des travaux plus récents complètent cette approche dite « fiabilité humaine » (Hollnagel, 1998), en plaçant notamment des barrières pour interdire certaines actions (Polet, P. et al. 2002), (Qiu S. et al., 2015). Une synthèse est présentée dans (Millot P., 2014c).

### 5.2.3. Conscience de la situation ou *Situation Awareness SA*

La capacité humaine à détecter, anticiper et gérer un événement indésirable a été étudiée notamment par Endsley (1995) comme la "conscience de la situation" (plus connue sous son vocable anglo-saxon *Situation Awareness SA*). La SA est définie selon trois composantes, "la perception des éléments dans un espace-temps (SA1), la compréhension de leur signification

(SA2) et la projection de leur état dans un futur proche (SA3)", (Figure 5).

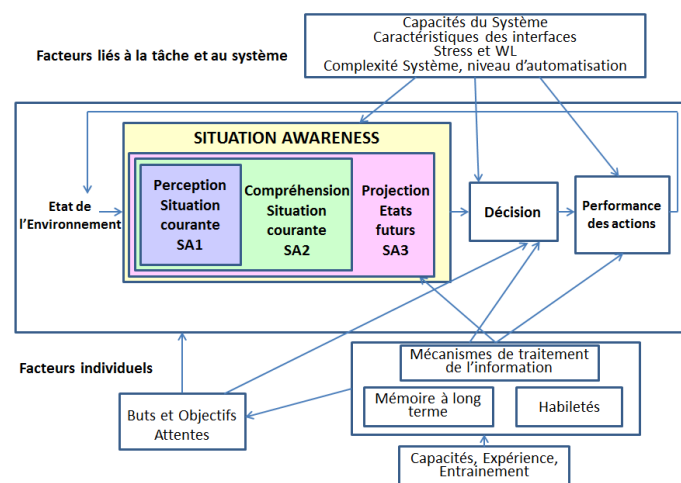


Figure 5. Modèle de *Situation Awareness* lors d'une décision dynamique selon Endsley (1995)

L'enjeu est donc majeur pour la conduite et/ou la supervision du système homme-machine. Aussi Endsley a-t-elle proposé des méthodes de mesure des trois composantes SA, comme SAGAT (*Situation Awareness Global Assessment Technique*) ou SART (*Situational Awareness Rating Scale*).

Des extensions vers la SA collective pour couvrir les cas réalistes d'équipes humaines voire d'équipes hommes-machines sont en cours notamment dans le contrôle aérien, le pilotage d'avion de chasse ou la coopération hommes-robots (Millot & Pacaux, 2013), (Millot P, 2014c).

Schématiquement, nous dirons que *l'Opérateur humain peut commettre des erreurs, mais il faut lui donner les moyens de les détecter et de les corriger*. Favoriser sa SA individuelle ou la SA d'équipe est une approche très prometteuse (Millot P. 2015).

### 5.3 Décomposition hiérarchique du système et des tâches

Le rôle à attribuer à l'Opérateur va dépendre du « point de vue » c'est-à-dire du niveau de modèle que l'on a du système technique. Par exemple l'Opérateur de supervision n'aura pas le même rôle et donc pas les mêmes connaissances ni les mêmes besoins informationnels et d'action que l'Opérateur de maintenance ou que l'Opérateur de conduite. La modélisation multi-point-de-vue ou encore hiérarchique introduite dans le courant systémique de (Le moigne 1994) a produit plusieurs méthodes d'analyse et de modélisation. SADT a suivi d'ailleurs la même idée qui repose sur une décomposition du système global. (Lind 2011) propose la méthode MFM (Multilevel Flow Modeling) qui décompose le système selon deux axes : l'axe buts/moyens et l'axe tout/parties (Figure 6).

Selon l'axe *buts/moyens*, on trouve quatre niveaux de modèles, du plus global (et moins détaillé) au plus granulaire : les objectifs, les fonctions, les comportements et les composants. Les modèles d'un niveau sont ainsi les buts des modèles du niveau inférieur et les moyens du niveau supérieur. On notera que les modèles d'automatique trouvent leur place au niveau comportement, et les modèles très techniques par exemple électroniques, mécaniques ... occupent le niveau des composants.

Ces deux niveaux relèvent des *sciences de l'ingénieur*. C'est à ces niveaux que l'Opérateur de maintenance va exercer son rôle, et donc qu'il devra posséder les connaissances qui s'y rapportent. En revanche si on s'interroge sur la commande en temps réel, celle-ci nécessite un comportement réactif et des capacités de calcul élevées et rapides qui dépassent les capacités humaines. Il est donc préférable de les automatiser (si possible).

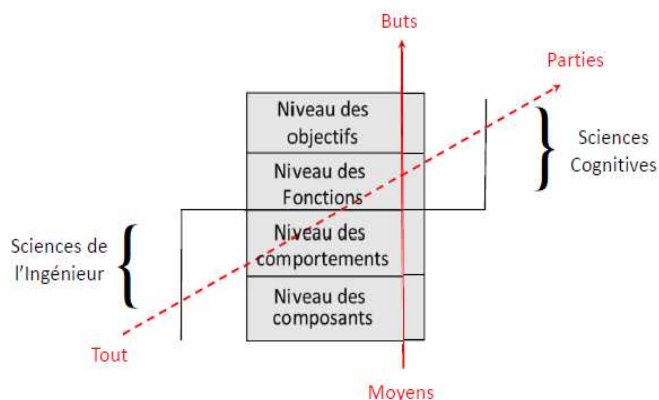


Figure 6. Décomposition multiniveau d'un grand système selon Lind

Les deux niveaux supérieurs relèvent quant à eux des *sciences cognitives* et concernent la nature et la réalisation des fonctions (et leur séquençement) plus globales assurées par les comportements du niveau physique. Parmi les approches possibles de modélisation, on peut citer les modèles qualitatifs (Gentil et al. 2004), les réseaux de Pétri etc. Les prises de décisions relatives à la mise en œuvre des fonctions sont très souvent les résultats d'algorithmes d'optimisation, voire d'une expertise humaine, donc symbolique, qui peut être mise en œuvre sous forme de règles. On entre alors dans le champ de l'Intelligence Artificielle. Les tâches correspondantes concernent le pilotage ou la supervision du système, elles sont souvent confiées aux Opérateurs humains (voir le comportement RBB ci-dessus) et font l'objet des travaux actuels d'automatisation, voire de développement d'outils d'aides comme les SIAD évoqués dans la partie 2.

La décomposition selon l'axe tout/partie est le corollaire de la décomposition imposée par l'axe buts/moyens : plus on est près des buts, plus l'ensemble du système est pris en compte, plus on est près des moyens plus la modélisation concerne les parties. On peut y appliquer les mêmes règles de partage des tâches entre hommes et machines.

#### 5.4 Décomposition fonctionnelle de la tâche

Pour pouvoir gérer la difficulté d'une tâche et ainsi mieux définir le rôle humain, on peut tenter de la décomposer. Par exemple la tâche de conduite automobile peut être décomposée fonctionnellement en 3 sous tâches selon 3 objectifs:

- *stratégique* pour déterminer l'itinéraire entre le lieu de départ et le lieu d'arrivée,
- *tactique* pour définir la trajectoire et la vitesse sur la route choisie,
- *opérationnelle* pour contrôler la vitesse et la trajectoire du véhicule sur la voie.

Il s'agit d'une décomposition fonctionnelle hiérarchique, les trois sous tâches que le conducteur effectue ayant des horizons

temporels différents, les fonctions et les ressources nécessaires pour exécuter chacune d'elles étant également différentes, (Figure7).

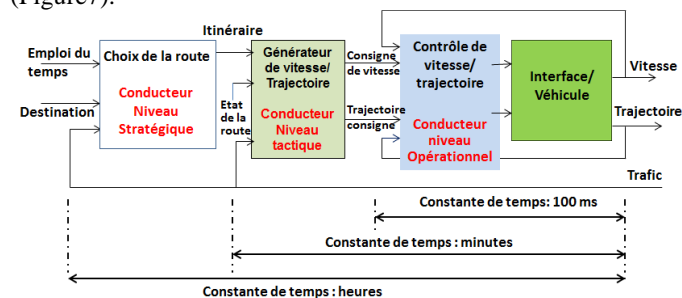


Figure 7. Décomposition hiérarchique de la tâche de conduite automobile selon trois objectifs

Des outils d'aide peuvent être ajoutés qui s'appliquent à des sous-tâches bien spécifiques : le régulateur de vitesse, l'ABS (système antiblocage des roues) et l'ACC (Automated Cruise Control) s'appliquant à la sous-tâche opérationnelle, le GPS à la sous-tâche stratégique. On notera que les modèles d'Opérateur présentés ci-dessus sont applicables à chaque niveau.

## 6 CONCEPTION ANTROPO-CENTREE ET NIVEAU D'AUTOMATISATION ADAPTABLE

Le niveau d'automatisation (LoA) détermine le rôle et l'implication des opérateurs humains pour assurer ces objectifs : *performance, sûreté de fonctionnement, sécurité*. Sheridan (1992) classe 10 LoA depuis le système totalement manuel (niveau 1) jusqu'au système totalement automatique (niveau 10) avec entre eux différents niveaux. Par exemple au niveau 4 *le calculateur sélectionne une action possible et la propose à l'humain (on retrouve ici le concept fédérateur des SIAD présentés en début d'article, à condition toutefois que l'Opérateur dispose des critères de choix)*, au niveau 5 *le calculateur exécute l'action si l'humain approuve*, et au niveau 6 *le calculateur accorde un temps restreint de veto avant l'exécution automatique de l'action*. Puis progressivement l'humain perd de son *autorité* jusqu'au niveau 10 où il est explicitement sorti de la boucle de commande.

Le bât blesse lorsque l'automatisation produit une incohérence entre *l'autorité* et *la responsabilité* de l'humain. Par exemple dans le Contrôle Aérien, le Contrôleur humain est pénalement responsable s'il donne un ordre erroné à un pilote. Une tentative d'automatisation partielle du contrôle, même techniquement maîtrisée a été refusée par les contrôleurs pour cette raison (Millot & Mandiau, 1995). En fait on a appris lors de cette étude que l'obstacle à l'automatisation n'est pas toujours la difficulté technique, mais qu'elle peut avoir des raisons légales, sociales ou sociétales. Un autre exemple en France, le code de la route rend le conducteur responsable de son véhicule. L'automatisation de la conduite, c'est-à-dire le transfert d'autorité de l'humain vers un auto-pilote embarqué ne pourra alors se faire que sous la responsabilité du conducteur humain... avant que la pression sociétale ou industrielle n'amène à changer la législation.

L'idée qu'un LoA figé à la conception ne soit pas la meilleure solution fait son chemin. On conçoit aujourd'hui que le LoA doive être adaptable dynamiquement selon la Situation. Les travaux sur la répartition dynamique des tâches lancés il y a plus de 25 ans par Millot (1988) prennent tout leur sens aujourd'hui et

sont repris par d'autres (Inagaki 2006), (Pacaux et al. 2011), (Flemisch F. et al. 2012), (Millot 2014b). Au Japon il est concevable qu'en situation dangereuse, un auto-pilote embarqué prenne le contrôle total du véhicule à la place du conducteur pour éviter un accident, avec toutes les conséquences que cela implique. On peut alors passer d'un LoA de 1 (conduite totalement manuelle) à un LoA de 10 (totalement automatique). On remarquera que la décomposition hiérarchique de la tâche de conduite (Figure 7) vue précédemment montre des possibilités d'automatisation partielles d'un seul niveau, par exemple le niveau opérationnel, tout en conservant l'autorité et la responsabilité à l'humain aux autres niveaux tactique et stratégique. C'est la « métaphore du cheval » (Flemish et al. 2012) dont une variante est le projet ABV (automatisation à basse vitesse) du LAMIH (Sentouh & Popieul, 2014).

Le schéma de la figure 1 peut alors être transformé en une organisation hiérarchique des tâches avec différents niveaux d'automatisation (Figure 8) et cette fois de façon assumée par le concepteur. L'humain perd alors son *mystère et son côté magique* parce qu'on modélise (et donc prévoit) son comportement, en acceptant qu'il fasse des erreurs où qu'il mette trop de temps à répondre par exemple. Le concepteur

s'appliquera à créer les interfaces adéquates, et les parades pour permettre à l'humain de formuler la bonne décision, de détecter les erreurs du système comme les siennes propres et de les corriger ou de les compenser.

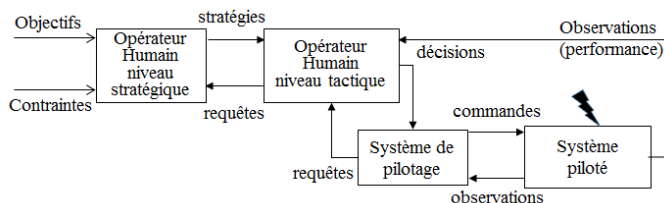


Figure 8. Partage des tâches et niveaux d'automatisation.

## 7. VERS UNE CONCEPTION ANTHROPO-CENTREE DES SYSTEMES DE PILOTAGE EN GENIE INDUSTRIEL

Tenant compte de ce qui précède, la figure 9 résume et décrit notre proposition de conception anthropo-centrée du pilotage des systèmes industriels.

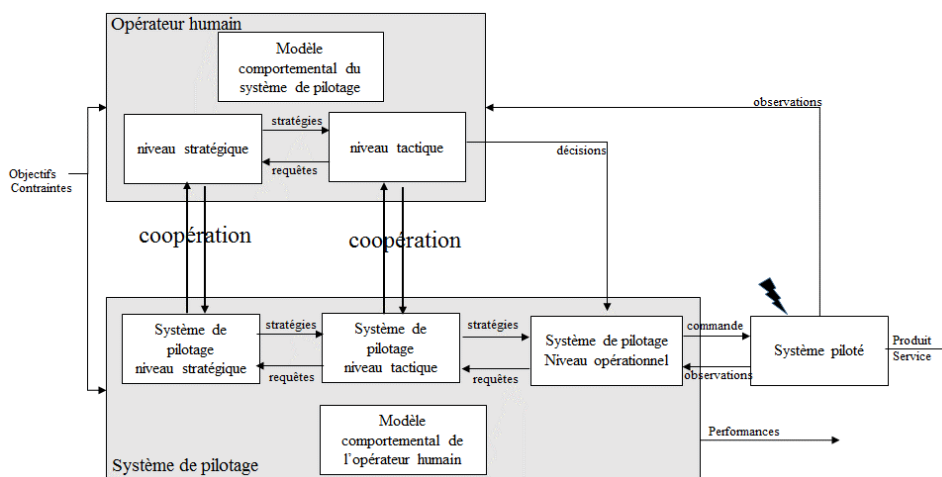


Figure 9. Approche Anthropo-centrée de la conception du pilotage.

Notre proposition s'articule autour de plusieurs réflexions précédemment introduites et plusieurs voies de solutions :

-1) Le découpage en niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels comme à la figure 8. Ce découpage permet une décomposition de la tâche non seulement hiérarchique mais aussi temporelle. Elle permet alors de placer l'humain au mieux de ses capacités et limites notamment sur les niveaux supérieurs.

-2) La considération que l'opérateur n'est *pas infallible*. Notre proposition généralise en quelque sorte le principe de « l'homme mort » que l'on trouve dans le domaine du transport ferroviaire. C'est un système qui permet au train de vérifier que le conducteur est toujours opérationnel (ce dernier doit activer un actionneur inactif régulièrement). La généralisation consiste à définir de manière miroir pour l'homme et le système de pilotage automatisé une observation croisée et une attente croisée du comportement de l'autre.

-3) La possibilité pour l'opérateur de *coopérer* avec le système de pilotage selon le niveau auquel ils interviennent respectivement. Cela se comprend que le système de pilotage possède une capacité décisionnelle. Le concepteur devra alors se poser les questions du partage d'autorité entre les deux agents, humain et système: comment les agents vont ils coopérer (opérer collectivement) sur la tâche ?

Vont-ils la décomposer et se partager les sous tâches ? si oui les sous tâches sont-elles similaires (comme par exemple les tâches des préposés aux guichets d'une banque) ? ou inversement sont-elles complémentaires (comme par exemple celles des corps de métiers qui construisent une maison) ? également : quel agent gère la coopération c'est-à-dire quel agent décompose et répartit les tâches ou sous tâches : l'humain ? le système (ce qui sous-entend qu'il ait une « vue » globale sur l'ensemble du système industriel !) ? ou encore un



agent tiers, humain ou machine : on peut imaginer par exemple que la coopération du niveau tactique soit gérée par le niveau stratégique.

. Si la tâche n'est pas décomposée, les agents peuvent la planifier séparément et la coopération peut consister en une confrontation de leurs solutions respectives : par exemple le pilote et le co-pilote de l'avion peuvent coopérer pour résoudre un problème ensemble, alors que seul le pilote appliquera la commande : les psychologues parlent de contrôle mutuel. Cette forme de coopération apporte une réponse à la question 2 : la surveillance mutuelle de l'humain et du système en cas de décision aberrante, ou en cas de non réponse à un problème urgent et grave (par manque de temps de l'humain ou simplement en cas de surcharge de travail...).

. La difficulté sera alors de détecter la décision erronée. Concevoir un système homme-machine qui favorise la *Situation Awareness*, qu'elle soit individuelle ou d'équipe est un enjeu très actuel. Par manque de place nous ne pouvons développer plus longuement ici, mais le lecteur pourra se référer à (Millot, Boy, 2012) sur les possibilités que la coopération homme-machine offre en matière de sécurité, et à (Millot, Pacaux, 2013), (Millot 2014d) et (Millot, 2015) sur l'apport que procure une coopération en terme de conscience de la situation (SA) des opérateurs qui coopèrent. Des exemples y sont donnés dans le contrôle aérien, dans le pilotage d'avions de chasse et dans la coopération entre pompiers et robots d'interventions.

## 8 CONCLUSION

L'objet de cet article était d'inciter les chercheurs à adopter une approche anthropo-centrée dans leur activité de conception de systèmes de pilotage intelligents. Nous pensons que cette démarche doit se généraliser en génie industriel. Nous avons montré l'intérêt de ce type d'approche qui prend en compte explicitement l'humain dans la boucle de pilotage et de supervision du système piloté, à la fois avec ses qualités mais aussi ses limites. Les modèles cognitifs résumant l'activité humaine de résolution de problèmes, la gestion des erreurs humaines et de la conscience de la situation ont tenté d'éclairer notre proposition. Le rôle et la position à donner à l'humain lors de la conception a été montré à partir de décompositions hiérarchiques et temporelles du système à piloter. Une synthèse d'architecture futuriste intégrant à la fois une organisation homme-machine multiniveau et coopérative a enfin été proposée et discutée.

## 9 REFERENCES

Amalberti, R., Auroy, Y., Berwick, D. & Barach, P.,(2005). "Five system barriers to achieving ultrasafe health care". *Annals of Internal Medicine*. Vol. 142, no. 9, pp. 756-764.

Boy G. 2011. "A human-Centered Design Approach" (2011), Introductory chapter in G. Boy (ed), *The handbook of Human Machine Interaction, A human-Centered Design Approach*, pp.1-20, Ashgate, Farnham.

Endsley, M. R. (1995) "Toward a theory of situation awareness in dynamic systems". *Human Factors*, 37, 32-64.

Flemisch F., Heesen M., Hesse T., Kelsh J., Schieben A., Beller J. (2012). "Towards a dynamic balance between humans and automation: authority, ability, responsibility and control in

shared and cooperative control situations", *Cognition Technology and Work*, 14:3-18, 2012

Gaham, Mehdi, Brahim Bouzouia, and Noura Achour. 2015. "Human-in-the-Loop Cyber-Physical Production Systems Control (HiLCP2sC): A Multi-Objective Interactive Framework Proposal." In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, edited by Theodor Borangiu, André Thomas, and Damien Trentesaux, 315-25. Studies in Computational Intelligence 594. Springer International Publishing. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15159-5\\_29](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15159-5_29).

Gentil S., Montmain J. (2004), "Hierarchical representation of complex systems for supporting human decision making", *Advanced Engineering Informatics* 18, 143-159

Hoc J.M.,(1996), « Supervision et contrôle de processus, La cognition en situation dynamique », Presses Universitaires de Grenoble.

Inagaki T., (2006). Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation. *Cognition, Technology and Work*. Volume 8, Issue 3, pp. 161 - 167, ISSN:1435-5558.

Leitão, P., and F. Restivo. 2006. "ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control." *Computers in Industry* 57 (2): 121-30. doi:10.1016/j.compind.2005.05.005.

Le moigne, Jean-Louis. 1994. *La Théorie Du Système Général*. PUF.

Lind, Morten. 2011. "An Introduction to Multilevel Flow Modeling." *Nuclear Safety and Simulation 2* (1): 22-32.

MacCarthy, Bart. 2006. "Organizational, Systems and Human Issues in Production Planning, Scheduling and Control." In *Handbook of Production Scheduling*, edited by Jeffrey W. Herrmann, 59-90. International Series in Operations Research & Management Science 89. Springer US. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-33117-4\\_3](http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-33117-4_3).

McFarlane, Duncan, Vaggelis Giannikas, Alex C. Y. Wong, and Mark Harrison. 2013. "Product Intelligence in Industrial Control: Theory and Practice." *Annual Reviews in Control* 37 (1): 69-88. doi:10.1016/j.arcontrol.2013.03.003.

Millot P., (1988), « Supervision des procédés automatisés et ergonomie », Hermes, Paris.

Millot P., Mandiau R.,(1995). « Men-Machine Cooperative Organizations : Formal and Pragmatic implementation methods », dans J.M. Hoc, P.C. Cacciabue, E. Hollnagel (dir.), *Expertise and Technology : Cognition Computer Cooperation*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, chap. 13, p. 213-228..

Millot, P., Boy, G. (2012) Human-machine cooperation: a solution for life-critical Systems?, *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, IOS Press, volume 41, pages 4552-4559

Millot P., Pacaux-Lemoine MP. (2013), "A common work space for a mutual enrichment of human-machine cooperation and team-situation awareness", 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Human Machine Systems, Las Vegas, NV, 11-15 August 2013.

Millot P.(2014 a). "Human Machine Systems and Ergonomics", in P. Millot (Ed), *Designing Human-Machine Cooperation Systems*, ISTE-Wiley, pp xv-xxiv, London. June 2014, ISBN 978-1-84821-685-3

- Millot P. (2014 b). "Human Centered Design, in P. Millot (Ed) Designing Human machine Cooperation Systems, pp 31-67, ISTE-Wiley, London June 2014, ISBN 978-1-84821-685-3
- Millot P. (2014c). Risk management in Life Critical Systems , ISTE-Wiley, London, October 2014, 420 pages, ISBN: 978-1-84821-480-4
- Millot P. (2014d) Cooperative organization for Enhancing Situation Awareness, in P. Millot (Ed) Risk Management in Life critical Systems, pp 279-300, ISTE-Wiley, London, November, ISBN: 978-1-84821-480-4
- Millot P. (2015). Situation Awareness: is the glass half empty or half full? Cognition Technology & Work, Springer, London, May, volume 17, Issue 2, pp 169-177
- Oborski, P. 2003. "Man-Machine Interactions in Advanced Manufacturing Systems." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 23 (3-4): 227–32. doi:10.1007/s00170-003-1574-5.
- Pacaux M.P., Debernard S., Godin A., Rajaonah B., Anceaux F., Vanderhaegen F., (2011). Levels of automation and human-machine cooperation: Application to human-robot interaction, IFAC World Conference, Milano, Italy.
- Pichon, M., Millot P., Enjalbert S. (2010). "Toward an on-line and unobtrusive workload assessment method", IFAC/IFIC/IFORS/IEA Conference on Analysis Design and Evaluation of Human-machine systems, Valenciennes, August.
- Polet, P., Vanderhaegen, F., Wieringa P.A. (2002). Theory of Safety-related violations of a System Barriers", *Cognition Technology and Work*, 4 (2002) 171-179.
- Qiu S., Sallak M., Schön W., and Cherfi-Boulanger Z. (2015) "Evaluation of human error probabilities based on classical HRA models: an application to railway systems," in Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement, QUALITA, Dijon, France.
- Rasmussen J., (1983), « Skills, Rules and Knowledge; Signals, signs and symbols and others distinctions in human performance models », IEEE SMC n°3, 1983.
- Rasmussen, J., Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem, *Safety Science*, 27 (2/3), 183-213, 1997
- Reaidy, Paul J., Angappa Gunasekaran, and Alain Spalanzani. 2015. "Bottom-up Approach Based on Internet of Things for Order Fulfillment in a Collaborative Warehousing Environment." *International Journal of Production Economics* 159 (January): 29–40. doi:10.1016/j.ijpe.2014.02.017.
- Reason J. (1990). Human error. Cambridge University Press (1990) (Version française traduite par J.M. Hoc, L'erreur humaine, PUF, 1993).
- Ribeiro, Luis, Andre Rocha, Angelo Veiga, and José Barata. 2015. "Collaborative Routing of Products Using a Self-Organizing Mechatronic Agent framework—A Simulation Study." *Computers in Industry* 68 (April): 27–39. doi:10.1016/j.compind.2014.12.003.
- Sallez, Yves, Thierry Berger, and Damien Trentesaux. 2009. "A Stigmergic Approach for Dynamic Routing of Active Products in FMS." *Computers in Industry* 60 (3): 204–16. doi:10.1016/j.compind.2008.12.002.
- Schmitt, K. (2012). "Automations influence on nuclear power plants: A look at the accidents and how automation played a role". International Ergonomics Association World Conference. Recife, Brazil, February, 2012.
- Sentouh C, Popieul JC, (2014). Human-Machine Interaction in Automated Vehicle: The ABV Project, in P. Millot (Ed) Risk Management in Life critical Systems, pp 335-350, ISTE-Wiley, London, November, ISBN: 978-1-84821-480-4
- Sheridan, T.B. (1992). Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control. MIT Press, Cambridge, MA.
- Trentesaux, Damien, Neville Moray, and Christian Tahon. 1998. "Integration of the Human Operator into Responsive Discrete Production Management Systems." *European Journal of Operational Research* 109 (2): 342–61. doi:10.1016/S0377-2217(98)00062-9.
- Valckenaers, Paul, Hendrik Van Brussel, Herman Bruyninckx, Bart Saint Germain, Jan Van Belle, and Johan Philips. 2011. "Predicting the Unexpected." *Computers in Industry*, Special Issue: Grand Challenges for Discrete Event Logistics Systems Grand Challenges for Discrete Event Logistics Systems, 62 (6): 623–37. doi:10.1016/j.compind.2011.04.011.
- Van Brussel, H., J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, and P. Peeters. 1998. "Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA." *Computers in Industry* 37 (3): 255–74. doi:10.1016/S0166-3615(98)00102-X.
- Zambrano Rey, G., M. Carvalho, and D. Trentesaux. 2013. "Cooperation Models between Humans and Artificial Self-Organizing Systems: Motivations, Issues and Perspectives." In *2013 6th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS)*, 156–61. doi:10.1109/ISRCS.2013.6623769.