

La place de l'homme dans les systèmes de systèmes

Dominique Luzeaux

Chef du département « ingénierie des systèmes complexes »

Délégation Générale pour l'Armement

dominique.luzeaux@polytechnique.org

Résumé

Dans cet article, il sera question de systèmes de systèmes, tels qu'ils sont développés au sein de la Défense. Après avoir esquissé les éventuelles spécificités de tels systèmes, et donné quelques exemples afin d'illustrer les problématiques qui s'ensuivront, nous aborderons la place de l'homme dans ces fameux systèmes de systèmes. Cela inclut évidemment les aspects d'ergonomie dans leur utilisation, mais ne s'y restreint pas, comme nous le soulignerons. Il en résultera une position critique à adopter systématiquement quand on aborde cette problématique, dont nous essaierons de démontrer qu'elle est essentielle pour la performance globale.

I - PROLÉGOMÈNES SYSTÉMIQUES : DES SYSTÈMES AUX SYSTÈMES DE SYSTÈMES...

Dans la mesure où il sera beaucoup question de systèmes dans la suite, il est nécessaire en préliminaire de tenter de définir les différents termes.

Les principales normes (depuis la MIL-STD-499B jusqu'à plus récemment ISO 9000: 2000 puis ISO/IEC 15288, dernière norme datant de 2002, en passant par EIA/IS-632, ISO-12207, SE-CMM) définissent un système comme : *un ensemble intégré d'éléments – personnels, produits, processus –, connectés et reliés entre eux, en vue de satisfaire un ou plusieurs objectifs définis.*

Les points importants de cette définition sont l'existence de composantes élémentaires (dont il est rappelé qu'elles sont de nature très différente : matérielle, logicielle, virtuelle, humaine...) et de relations entre elles. Tant les biologistes [2, 20], les épistémologues [6], les économistes [7, 19], les conseillers en management d'entreprise [4, 22] que les sociologues [17] s'accordent à dire que l'accent doit être mis sur les relations unissant les éléments d'un système autant que sur ces éléments eux-mêmes. Les propriétés du système dépendraient davantage des relations entre les parties que de la nature de ces parties. Il est à noter qu'un tel renversement de perspective a conduit en mathématiques à la théorie des catégories, se démarquant alors notamment de la théorie des ensembles : il n'est pas que conceptuel, car bien que l'on puisse démontrer l'équivalence des deux approches, ceci nécessite cependant de recourir à certaines hypothèses qui, si elles sont reconnues comme acceptables pour la plupart des

mathématiques usuelles, n'en demeurent pas moins ontologiquement non négligeables [14]. Ce n'est a priori qu'au prix de ce renversement de perspective, primauté ontologique du relationnel sur l'objet explicite, que l'on peut atteindre une intégration supérieure [8]. Comme le dit le sociologue Edgar Morin, il convient de *passer de l'organisation à l'interaction.*

Il est important de souligner que ces relations n'ont aucune raison d'être statiques au cours du temps, ce qui permet d'envisager des boucles temporelles entre les composantes, mais également des topologies (i.e. des formes architecturales) évolutives de ces boucles. C'est cette plasticité qu'il faudra d'ailleurs tenter d'appivoiser dans les applications futures pour en tirer toute la quintessence.

Bien qu'étymologiquement le système soit avant tout « un ensemble cohérent », les définitions précédentes mettent également l'accent sur la téléonomie. Certainement inspirée par le courant épistémologique prônant l'importance du déterminisme et de la causalité, cette prise en compte de la notion de finalité dans l'évolution du système est cependant cruciale pour l'ingénieur. Outre l'aspect dynamique, elle met en avant le relativisme inhérent à toute description et la nécessaire identification d'une part de l'objectif qui incarne la raison d'être du système, d'autre part de l'environnement immédiat du système par rapport auquel ce dernier évolue et avec qui il échange nécessairement.

La généralisation de la définition au concept de système de systèmes semble alors triviale : il suffit, suivant un schéma récursif bien connu, de prendre des systèmes pour composantes élémentaires. Malheureusement, ou heureusement pour certaines communautés qui ont su profiter de l'aubaine et se constituer sur cette ambiguïté (!), les choses ne sont pas aussi simples. C'est ainsi que certains différencient les familles de systèmes et les systèmes de systèmes. Une famille de systèmes serait un ensemble de systèmes indépendants qui peuvent être assemblés ou interconnectés de différentes façons afin de produire des capacités diverses. On pourrait qualifier une telle structure de *compliquée*. Dans cette définition, le terme « ensemble » est important, car il dépouille l'agencement des systèmes individuels de ses éventuels traits relationnels.

Un système de systèmes irait au-delà de la notion de famille de systèmes, la perte de quelque partie du système entraînant alors la dégradation de la performance d'ensemble. Outre la téléonomie, signalée précédemment et que l'on voit ici apparaître par la petite porte dans la mesure où c'est la

performance relative au but recherché qui sert de critère de définition, certains voient dans cette définition une allusion au concept d'*émergence* : le système de systèmes autorisant des comportements émergents a priori non observables au niveau de ses composantes, toute amputation partielle entraîne a posteriori une discontinuité comportementale observable.

Pour prendre une image, on est passé de l'assemblage de type Lego à quelque chose du type organisme vivant. Le *compliqué est devenu complexe* qui, dans ses deux étymologies concurrentes de « embrasser, englober » ou alors de « tisser ensemble », souligne ce double aspect d'interaction et d'intégration pour viser l'émergence d'une propriété globale nouvelle. Il est possible qu'un système de systèmes inclue une famille de systèmes, qui peut être utilisée à d'autres fins, mais c'est alors au détriment de cette émergence.

Ces différentes définitions, au-delà de leur intérêt intellectuel et de leur utilité pour délimiter le champ d'observation, sont toutefois peu opératoires pour l'action. La richesse du concept ne se dévoile en effet que par l'utilisation qui en est faite. Par ailleurs, l'ambiguïté sémantique est inévitable, et il semble que l'essentiel qui différencie les systèmes, les systèmes de systèmes – et tout éventuel concept intermédiaire – soit le facteur d'échelle : dans tous les cas, les concepteurs et les utilisateurs seront amenés à maîtriser les transitions entre le *local* et le *global* ; la démarche propre aux systèmes de systèmes n'est pas a priori éloignée de celle déroulée pour un système. La différence réside cependant dans le fait que certaines décisions, qu'elles concernent les concepteurs, les architectes ou les utilisateurs, auront un impact bien plus important dans le cas des systèmes des systèmes.

À ce niveau, il convient de se remémorer la loi de variété requise¹, introduite par le cybernéticien Ross Ashby, qui affirme que la régulation d'un système n'est efficace que si elle s'appuie sur un système de contrôle aussi complexe que le système lui-même. Un corollaire est que si on ne confère pas assez de liberté au système de systèmes et à ses éléments, la variété requise pour maîtriser le système de systèmes est insuffisante. Il est important de garder cette remarque à l'esprit, car elle démontre que si l'on veut maîtriser un système de systèmes, sa régulation ne va pas de soi et nécessite d'identifier les différents degrés de liberté sur lesquels on est susceptible de jouer pour modifier le comportement global [9] : quelles interactions ? entre quels éléments ? les boucles sont-elles stabilisantes ou déstabilisantes ? quelle est leur nature qualitative ?

¹ La variété d'un système est le logarithme du nombre de configurations d'états ; on peut la relier à une certaine mesure d'information sur le système. Cette loi est en réalité proche du second principe de la thermodynamique en physique, du principe de modèle interne introduit par Wonham en automatique, ainsi que de certains théorèmes de Shannon en théorie de l'information.

quels modes d'action peut-on identifier ? A priori, il est vain d'espérer maîtriser un système de systèmes par une régulation trop simple, basée par exemple sur certains modèles trop frustes.

Comme rappelé en systémique appliquée au management d'entreprises [4], pour pouvoir s'adapter en permanence aux modifications de leur environnement, les systèmes de systèmes doivent être inventifs et plastiques : c'est une organisation souple où rien n'est figé de façon rigide afin que les idées puissent être mises en place rapidement ; où les agents dans leur ensemble connaissent suffisamment les orientations afin de pouvoir donner leurs idées ; qui développe les réseaux internes et externes, permet les logiques de coopération et d'entraide qui facilitent les réactions, les interactions, et les rétroactions face aux fluctuations de l'environnement.

II - ÉLÉMENTS DE CONTEXTE : LES SYSTÈMES DE DÉFENSE

Le contexte des systèmes qui nous intéressent est marqué par les caractéristiques suivantes :

- menaces nouvelles,
- évolution vers une logique capacitaire,
- complexité croissante,
- contexte politique de coopération.

Détaillons ces divers points un par un.

La prise en compte de menaces nouvelles (post-guerre froide ou autres que la guerre) nécessite une flexibilité et une *réactivité* importantes dans l'exploration des concepts de systèmes de Défense. En effet, les logiques développées dans le cadre de la guerre froide étaient celles d'affrontements symétriques : masses de métal s'affrontant dans les grandes plaines ou les airs, d'où en termes d'acquisition une logique privilégiant la continuité dans les armements avec des raffinements technologiques par générations successives. Mais le nombre ayant plus d'importance que le différentiel individuel des systèmes, les durées longues des cycles d'acquisition n'avaient pas d'impact qualitatif sur la capacité d'une nation. Par contre, les nouvelles menaces mettent en avant les possibilités de conflits asymétriques : l'adversaire potentiel ne dispose pas a priori des mêmes technologies militaires sur étagère, mais peut en contrepartie utiliser de manière inventive les technologies courantes du monde civil, posant alors une menace non plus au niveau du système d'armement individuel, mais au niveau du métasystème de la force en présence. Cette *évolutivité* de l'environnement et la nécessaire capacité du système à s'adapter à ces différentes évolutions contribuent à sa complexité.

L'évolution vers une logique capacitaire de l'outil de Défense oriente naturellement le processus d'acquisition vers la prise en compte de systèmes de systèmes. En effet, il ne s'agit plus simplement de remplacer un système par un autre (par exemple un avion de combat par un nouvel avion de combat),

mais de travailler sur la complémentarité de certains systèmes d'armes en vue de l'effet qu'ils sont sensés produire : c'est ainsi qu'entre un char et un hélicoptère peut se poser la question, les deux étant des armes anti-chars. À un degré plus général, cet exercice peut être fait en comparant les systèmes entre eux, puis les agrégats de systèmes entre eux : en fait, au lieu de partir d'une logique de produit, où l'on planifie le vieillissement et le remplacement, on met en avant une logique d'effet recherché et on adapte la base produit à ces effets recherchés. Il devient ainsi possible de faire des économies d'échelle d'une part, et d'autre part d'avoir un outil de défense beaucoup plus flexible, car la réponse à une nouvelle menace est alors un exercice d'architecture système en cherchant à organiser de la manière la plus appropriée les systèmes d'armes ou leurs agencements disponibles sur étagère, et de ne chercher à acquérir le cas échéant que le différentiel nécessaire pour exercer l'effet non couvert. Une telle démarche pose encore plus nettement les problématiques de l'*intégration*, de la *mise en cohérence* et de l'*interopérabilité* d'un système dans un système de niveau supérieur.

Les systèmes de Défense sont par ailleurs de plus en plus complexes, car intégrant davantage de composantes, hétérogènes et de durées de vie très disparates. Les exemples classiques sont de l'ordre de trente à quarante ans pour des avions de combat par exemple, ou pour des véhicules blindés, contre des durées de quelques semestres pour certains équipements électroniques ou de transmission. De fréquentes rénovations suite à l'obsolescence des sous-systèmes, construits de plus en plus sur des technologies civiles, nécessitent de maîtriser les architectures a priori de systèmes dont on ne connaît pas les configurations de composants sur les moyen et long termes. En effet, le problème de l'obsolescence d'un composant n'est pas simplement celui de la capacité à remplacer ce dernier dans un mode un pour un, car il peut remettre en question des choix architecturaux plus larges : aux années où les cartes dédiées étaient la solution optimale pour la performance ont succédé les années où le logiciel l'emportait, puis inversement, posant ainsi par exemple dans le domaine de l'informatique nomade la problématique de la co-conception matériel/logiciel (« hardware/software co-design »). De même, des astuces d'implantation utilisées un jour pour augmenter la performance peuvent à terme se révéler pénalisantes, voire remettre le fonctionnement du système en question, par exemple quand on modifie un support physique de cette implantation. La *réduction des risques* dans les différentes phases d'un programme d'armement (en amont de la faisabilité jusqu'à la mise en service, voire au retrait avec la prise en compte croissante de contraintes environnementales) devient alors un enjeu essentiel pour la *maîtrise des coûts* tout au long de la vie du programme.

Enfin, le contexte politique avec la réduction des budgets de Défense et la construction de l'Europe requièrent une maîtrise des coûts d'acquisition, ainsi

que des développements partagés entre partenaires européens. Il n'est plus possible d'acquérir au sein d'une même nation l'ensemble des capacités souhaitées. Par ailleurs, les crises se résolvent de plus en plus au sein de coalitions, ce qui nécessite et introduit une certaine interdépendance qu'il convient de maîtriser, car les alliances sont diverses et changeantes, d'où potentiellement des reconfigurations opérationnelles sur le terrain. La *réutilisation* prend alors toute sa mesure.

III - LA SOCIÉTÉ DE L'INFORMATION : IMPACT SUR LE MONDE DE LA DÉFENSE

S'adaptant aux changements fondamentaux au sein de nos sociétés ainsi que dans le monde des affaires, du fait des rapides évolutions technologiques, le domaine des opérations militaires est en train de vivre une *transformation* importante : depuis quelques centaines d'années, les outils et tactiques de combat ont suivi linéairement l'évolution des technologies militaires [5] : qu'il s'agisse dans les temps anciens des armes à trait, puis de l'artillerie, et plus récemment de l'introduction des aéronefs et des véhicules automobiles blindés, puis des missiles à haute précision. Aujourd'hui, on peut considérer cependant qu'il n'y a pas simplement une évolution des armements, mais une réelle rupture envisageable : la prolifération, l'accès libre à certaines technologies, leur souplesse et apparente simplicité d'emploi et en même temps leur sophistication si l'on envisage un emploi optimisé, font que nous sommes a priori à l'aube d'une transformation comme celles qui ont suivi les ères féodale et napoléonienne. Dans le premier cas, c'est l'organisation même de la société qui a été remise en cause, suite à l'introduction d'armes destructrices pour les chevaliers et pouvant être maniées par des mercenaires ou des personnels de toute origine au sein de la société. Dans le second cas, il en a été en quelque sorte de même, avec le concept de levée en masse, qui fut une rupture par rapport au maintien d'une petite armée professionnelle, et permit d'utiliser toute la population masculine d'une certaine tranche d'âge en tirant parti de l'industrialisation naissante de la société permettant cette levée en masse.

Les nouveaux concepts d'opérations, dites réseau-centrées – plus connues sous leur terminologie anglo-saxonne de NCW (network-centric warfare) [1]–, tirent leur raison d'être des glissements paradigmatiques suivants, que l'on observe dans la société de manière générale :

- de la plate-forme (ou du serveur, ou plus généralement du nœud physique) au réseau,
- de l'acteur individuel et considéré indépendamment de son environnement, à une vision d'un écosystème en perpétuelle évolution,
- de l'importance des choix stratégiques et des stratégies d'évolution dans des écosystèmes changeants.

Ces changements ont été induits dans la société par les considérations économiques de retour sur investissement, de compétition entre écosystèmes, et de prise en compte du facteur temporel dans l'évolution des systèmes. Ils ont évidemment également leur racine dans les technologies sous-jacentes (explosion de l'Internet, des intranets, des extranets...), en termes d'infrastructures, de produits mais surtout aussi de services associés. Il en a résulté une nouvelle conception de l'information, en tant que richesse, avec une plus-value non plus dans la protection jalouse d'une information, mais plutôt dans la livraison au bon moment de la bonne information. Ceci implique alors des capacités de distribution, en plus du simple traitement. L'effet recherché est la flexibilité et la dynamique du système, deux éléments clé dans le nouveau contexte. Le premier est fondamentalement orienté vers la survie améliorée dans des conditions changeantes, et le second vers la réactivité accrue, la logique étant toujours d'être le premier à tirer la bonne conclusion, en particulier dans des contextes où celui qui tire en premier a le plus de chance de survivre à l'échange !

Ces opérations réseau-centrées constituent un nouvel ensemble de concepts et de capacités militaires associées, qui permettent aux combattants de tirer parti de toute l'information disponible, et de mettre en œuvre les atouts disponibles de manière rapide, flexible et complémentaire. Les idées clé sont :

- une force organisée en réseau de manière robuste afin de pouvoir partager l'information,
- une diffusion large de l'information afin d'améliorer la qualité de l'information et de permettre le partage d'une situation tactique commune,
- le partage d'une situation tactique commune, afin de permettre la collaboration et la synchronisation des forces en présence, et d'augmenter le tempo de la manœuvre,
- une efficacité accrue de la mission.

Au-delà des développements technologiques, il faut donc faire évoluer la doctrine, l'organisation, le commandement, ainsi que les composantes capacitaires c'est-à-dire les divers systèmes, et tout ceci dans une vision d'engagements au sein de coalitions variables.

On est en droit de se demander si toutes ces idées ne sont pas des reformulations de concepts éprouvés, avec éventuellement une amélioration de certaines performances, en termes de temps de réaction ou de quantité d'informations échangées. En fait, il est assez facile de voir que si la rapidité de diffusion de la bonne information relève éventuellement de cette logique de simple amélioration de performance, il y a davantage dans la flexibilité accrue : c'est une capacité de réorganisation totale, à tous les échelons, qui est recherchée, afin de satisfaire l'intention du commandant suprême. Ceci est réellement quelque chose de nouveau, en particulier pour les

organisations militaires, car cela va a priori à l'encontre d'un contrôle de haut en bas, i.e. du commandant à la troupe. Les contraintes inhérentes à une telle vision statique et descendante sont évidentes : chaque élément ayant son propre rythme d'opération, son propre référentiel spatio-temporel, il est illusoire voire dangereux dans certaines situations, de vouloir contraindre les rythmes de tous les éléments à suivre celui du chef. Cela rompt toute capacité d'accélération brutale pour une manœuvre particulière qui pourrait s'imposer pour façonner l'ennemi suivant la conception napoléonienne, pour l'amener dans la configuration que l'on souhaite (rechercher la plus grosse perte ennemie, et non pas nécessairement le meilleur gain ami). Ce genre de considérations est devenu monnaie courante dans le monde du management des affaires et a fait également ses preuves en partie dans certains conflits récents.

Le ticket d'entrée dans ces nouveaux concepts est élevé : sur le plan technologique, il nécessite des grilles d'information denses et performantes, en termes de capteurs, de capacités de traitement, de décision et de transmission, et enfin en termes de couplage étroit des actionneurs avec les éléments précédents. Au-delà des technologies permettant cela – elles sont en grande partie disponibles aujourd'hui, et continuent en développement –, le concept d'engagement coopératif émerge : il résulte d'une combinaison d'une grille de capteurs performante et d'une grille d'actionneurs performante, avec des boucles courtes détection-décision-action. La coopération résulte de l'existence et de l'exploitation des grilles, où l'ensemble est sensé être plus performant que les parties élémentaires. Il devient alors possible de raisonner en effets recherchés, que les engagements coopératifs permettront de mettre en œuvre.

Mais sur le plan organisationnel, le ticket d'entrée est également élevé : en effet, sont remis en question les processus d'entraînement, d'organisation, d'affectation des ressources. De même que dans une entreprise, il est nécessaire d'identifier tous les degrés de liberté disponibles, et surtout d'essayer d'adapter les moyens de réponse à la situation. Cela semble aller de soi, mais quand on y regarde de près, une organisation basée sur les missions à exécuter peut être très variable, en particulier quand les missions ne sont pas systématiquement définies complètement a priori ! Revenons à l'analogie avec le monde économique : pour un projet, il est monnaie courante de constituer l'équipe à la demande, en trouvant les bonnes compétences de gestion de projet, de métiers techniques, de suivi financier, etc. voire en s'alliant avec d'autres partenaires dans des co-traitances. Le parallèle s'établit facilement dans le domaine militaire : il faut alors concevoir la constitution de la force en fonction de l'effet recherché, en puisant dans les réserves disponibles sur étagère les capacités nécessaires, tant dans ses gisements propres que dans ceux des partenaires au sein d'une coalition, etc. Facile à dire, mais plus délicat à mettre en œuvre

dans des organisations traditionnellement assez rigides..., en particulier en matière de prérogatives de commandement et de liens hiérarchiques ! Cette constitution d'une force comme un service est un réel changement de perspective, et entraîne une transformation radicale dans les forces armées. Car n'oublions pas non plus – à l'instar d'une entreprise qui n'intervient pas que sur un projet mais doit en gérer plusieurs simultanément – que les missions à mener en parallèle et au sein de coalitions potentiellement très différentes sont monnaie courante : il suffit de voir pour chaque nation les différents terrains d'intervention.

Cet aspect organisationnel, qui est à la base du processus de transformation, dont on parle beaucoup au sein des partenaires OTAN, n'est pas que théorique. À titre d'illustration, dans un autre domaine, on a pu en mesurer les effets tangibles dans la réorganisation de la sécurité publique à New York, où le taux de criminalité a nettement diminué, suite à une réorganisation en profondeur de l'ensemble des services concernés au sein de processus concourants. C'est la même démarche qui est à la base de certaines initiatives entreprises à l'été 2004 pour la surveillance incendie dans le sud-ouest français, avec des acteurs venant d'horizons très variés (pompiers, associations locales, volontaires...), intégrés pour la mission dans une structure de commandement commune avec établissement d'une situation informationnelle partagée permettant alors de mieux coordonner les forces en présence sur le terrain.

Au-delà de l'aspect organisationnel, il y a également l'aspect coût. Ce dernier n'est pas simplement un effet de mode, mais une triste réalité : tout a un coût... y compris la vie humaine, ne nous y trompons pas. Et toute contrainte de coût est directement reliée à une contrainte de délai, donc de performance à un instant donné, d'où une capacité d'intervention soit diminuée, soit plus risquée. Il faut donc considérer simultanément le coût global de possession d'un système et son coût d'emploi pour une mission. Le premier prend en compte la conception et la production, mais également toute la phase d'utilisation, c'est-à-dire le maintien en fonctionnement, l'entraînement, la gestion des obsolescences et les nécessaires évolutions, ainsi que le retrait de service. Le second correspond à la notion de service dont il a été question précédemment, où on constitue une force en fonction de l'effet recherché. Et comme le montrent certaines interventions récentes, le coût peut devenir récurrent, notamment quand les interventions se prolongent dans la durée.

IV - QUELQUES EXEMPLES

Afin d'illustrer les propos précédents, quelques exemples peuvent être utiles. Une capacité dont on a parlé ces dernières années est celle de la défense antimissile balistique : elle concerne la protection d'un théâtre d'opérations projeté (pour certains pays est également envisagée la protection du territoire), face à des menaces de missiles balistiques. Une telle protection relève de la notion

de capacité, et afin de la réaliser il faudra mettre en œuvre des systèmes très variés, ayant trait à la détection de la menace (alerte avancée, car vu les temps de vol des missiles susceptibles d'être des menaces, chaque fraction de minute compte), puis au pistage de cette menace afin d'en calculer la trajectoire, à la prise de décision (celle-ci pouvant relever d'échelons politiques au plus haut niveau, d'où des transits par des systèmes d'information avec des confirmations devant être obtenues très rapidement), et enfin au traitement de la menace, avec mise en œuvre éventuelle d'armes pour la détruire. On voit ici la complexité de l'architecture globale, en termes tant du nombre de systèmes potentiellement mis en œuvre, de leur disparité géographique, que de données transisant, le tout étant fortement contraint par le temps et la sécurité des informations. Au fur et à mesure de l'évolution des menaces (on est passé de lanceurs fixes à des lanceurs mobiles, puis de missiles à une tête à des missiles à plusieurs têtes, puis à des missiles dont la trajectoire n'est plus strictement balistique, etc.), on ne peut se permettre d'acquérir de nouveau l'ensemble des constituants de détection, traitement, communication, décision, pistage, neutralisation... D'autant plus que certains des systèmes constitutifs sont a priori des programmes majeurs, c'est-à-dire lourds sur le plan budgétaire, et se doivent donc d'être utilisés à plusieurs fins pour être justifiables budgétairement... (sans parler de rentabilité économique, chacun sait que l'exercice d'une programmation militaire n'est plus aussi aisé qu'il ne l'était il y a un quelques décennies !). Les logiques individuelles des systèmes, ou tout au moins les logiques de diverses capacités les mettant en œuvre potentiellement, peuvent tout à fait être difficilement compatibles deux à deux. L'exercice d'architecture système n'en est que plus délicat.

Une autre capacité exemplaire [13] est le contrôle et la surveillance de zone, dont l'objectif est de maîtriser, à partir des moyens à dominante aéroterrestre et d'effectifs minima, toute action jugée inopportune, néfaste voire hostile, située à l'intérieur d'une zone hors du contact : en décelant et en surveillant toute activité pouvant s'opposer à l'objectif général, en provoquant des effets contre les personnes ou systèmes jugés indésirables. Il s'agit donc d'un véritable système de systèmes organisé, commandé et contrôlé, de moyens de surveillance et d'identification d'activités dans une zone déterminée, reliés directement ou non à des armements à effets variables agissant à distance ou déployés sur la zone elle-même. Ces armements sont associés au système en fonction des besoins. Le contrôle peut s'exercer soit localement dans un secteur occupé par des forces amies, ou bien à distance, sur un secteur qu'elles n'occupent pas. Les moyens d'action doivent permettre de contrer les activités ennemies dans les modes opératoires « coercition » et « maîtrise de la violence », ceci dans le cadre d'engagements de type symétrique ou asymétrique. La zone d'opérations, dont l'occupation est en général lacunaire, peut atteindre des dimensions de dizaines de kilomètres

tant de profondeur que de largeur. La difficulté inhérente à cette problématique se perçoit dans des conflits récents, où indépendamment des positions idéologiques, la difficulté technique apparaît immédiatement.

V - ET L'HOMME DANS TOUT CELA ?

Loin d'être oublié, il a été question de la place de l'homme de manière implicite depuis le début. Il est nécessaire à ce stade de préciser en premier lieu son rôle à chaque étape du cycle de vie d'un système de systèmes : utilisateur final et client, lors de la phase d'analyse préliminaire du besoin et de préparation de lancement du processus d'acquisition ; architecte lors de la phase de conception détaillée ; encore concepteur et également acteur dans la phase de réalisation et de production ; utilisateur final dans la phase d'utilisation.

V.1 - Utilisateur : opérateur, superviseur, décideur

En tant qu'utilisateur, que ce soit opérateur ou superviseur, il impose des contraintes d'ergonomie, qui sont en fait des contraintes d'interface comme d'autres, liées à la nature des entrées et sorties que l'homme peut gérer. Une telle vision systémique, qui considère l'homme comme un système à part entière au sein d'une architecture plus générale peut en choquer certains ; en fait, il ne s'agit d'une certaine manière que de prendre en compte les spécificités physiologiques de l'être humain ! Cet aspect de facteur humain lié à l'utilisateur se traduit essentiellement en exigences de survie voire de confort pour l'opérateur (contraintes d'espace, de température, de pression, de chocs...) et de présentation de l'information via les sacro-saintes interfaces homme-machine (codes de couleur, symbologie adaptée, recherches de représentations adaptées...).

Pour les systèmes de systèmes tels que ceux considérés précédemment, cela se traduit par des nécessaires améliorations au niveau des communications, de la compréhension de la situation et de la capacité à exercer le contrôle et le commandement. Il est important de voir que l'opérateur peut intervenir soit au niveau d'un système élémentaire, soit à l'interface ou l'intersection de plusieurs systèmes. Dans ce cas, son rôle devient essentiel, car de lui dépend la performance globale. Par exemple dans la défense antimissile balistique, les opérateurs sont au niveau de certains capteurs pour la fonction de détection, d'autres sont au niveau des consoles de poursuite et au sein des centres de décision, enfin d'autres sont aux commandes des systèmes d'armes terminaux. Les niveaux d'opération sont en fait très différents, avec des fonctions de décision plus ou moins importantes, et surtout un impact plus ou moins direct sur l'efficacité capacitaire. La tâche d'architecture générale se doit donc de considérer la

place de l'homme tant au niveau fonctionnel qu'au niveau des interfaces physiques.

Mais la phase d'utilisation ne se limite pas, de loin, à l'opération du système. Il faut en particulier considérer l'entraînement à l'utilisation : ceci est d'autant plus important que les systèmes de systèmes se veulent flexibles dans leur utilisation, ce qui nécessite de s'être entraîné à leur emploi dans des contextes et des configurations très variés. Il n'est pas inutile que le système de systèmes ait également été conçu en partie pour pouvoir s'y entraîner : on retrouve ici un corollaire de la loi de variété requise mentionnée ci-dessus, dans la mesure où si le système a un niveau complexité supérieur à celui de son opérateur, sa maîtrise sera impossible. La prise en compte des capacités d'entraînement par l'opérateur (en ne négligeant a priori aucun des divers rôles que pourrait occuper l'humain en tant qu'acteur au sein du système) va induire des exigences supplémentaires à répercuter en amont lors de la conception du système. Par ailleurs, toujours au vu de la flexibilité recherchée d'un système de systèmes, il faut donner la possibilité de mettre en place un feedback rapide des retours d'expérience tant opérationnels que d'entraînement en direction des exigences physiques, fonctionnelles ou architecturales. Et sans oublier la composante économique liée à la maîtrise du coût de possession global, le coût d'entraînement y contribuant de manière importante car récurrent...

En résumé, on voit la place privilégiée (ou tout au moins essentielle, car impactant fondamentalement sur la performance globale) qu'occupe l'homme, dans la mesure où il est un utilisateur clé et qu'il convient qu'il soit le meilleur utilisateur possible.

Nous avons mentionné les interfaces homme-machine : là encore il faut prendre en compte certaines limitations physiologiques de l'homme, à savoir que l'interface homme-machine ne doit pas créer des tâches spécifiques liées à son utilisation et n'ayant pas de plus-value en termes de performance globale. Typiquement, l'interface doit être telle que l'homme ne doive pas consacrer à cette tâche des ressources qu'il pourrait dédier à d'autres activités. Ce n'est pas tant une question de facilité d'utilisation de l'interface – au contraire, cette facilité peut aller à l'encontre de l'objectif d'optimisation de la performance de son utilisateur ; il doit y avoir quasiment une symbiose entre l'interface et son utilisateur –, que d'adaptation de l'interface à l'ensemble des tâches effectuées par celui qui utilise ladite interface. Ce point est bien plus difficile à maîtriser dans un contexte de système de systèmes que dans celui d'un système isolé où l'ensemble des tâches est parfaitement défini, figé et l'optimisation peut donc être faite une fois pour toutes.

La raison de cette remarque est que l'ensemble des armées est confronté aujourd'hui à une réduction d'effectifs importante, pour des raisons de coût de fonctionnement : ceci se répercute en exigence système, à savoir la réduction des équipages (typiquement pour les bâtiments de surface, les

objectifs dans les différentes marines sont de l'ordre de 50%) tout en maintenant évidemment la performance globale, d'où une chasse aux tâches d'opérateur qui n'ont pas de plus-value et une recherche de la meilleure valeur ajoutée de l'opérateur. L'impact visé en termes économiques est la maîtrise, voire la réduction du coût mission.

V.2 - *Maintien en condition opérationnelle*

Passons maintenant au maintien en condition opérationnelle pendant la phase d'utilisation du système. L'homme intervient ici comme acteur de cette maintenance, et il convient donc de prendre en compte ses limitations pour minimiser le temps et la complexité de cette tâche. Un exemple simple permet d'éclairer ce point : pour la maintenance de moteurs, l'accessibilité aux différentes pièces est essentielle. S'il faut des déposes moteur pour faire de petites réparations, on imagine le temps perdu et le coût ajouté, d'abord du fait de la dépose, et aussi parce que cela risque de nécessiter des savoir-faire particuliers qu'il faut mettre en œuvre et maintenir (personnels supplémentaires, formation de ces personnels, etc.). Du point de vue opérationnel, c'est-à-dire en campagne, il faut aussi tenir compte de l'immobilisation du système du fait de la maintenance. On parle classiquement des niveaux d'intervention dans les armées : au plus bas niveau, la maintenance est directement assurée par le servant du système, ce qui permet d'envisager une immobilisation minimale, voire une possibilité de ne pas interrompre la mission. Puis au niveau suivant, il y a interruption du service au cours de la manœuvre, et nécessité de faire intervenir des équipes dédiées sur le système. Au dernier niveau, c'est l'immobilisation potentielle pendant toute la mission, intervention d'équipes dédiées, et rapatriement éventuel du système complet. Il est clair que l'on voit immédiatement l'impact en disponibilité, et en coût d'une mauvaise définition des niveaux : il est donc essentiel lors de la conception, puis lors de la réalisation du système, de prendre en compte le soutien logistique intégré en liaison étroite avec les profils d'utilisateurs et de ressources humaines qui pourront être présentes ou disponibles dans les contextes d'utilisation des systèmes.

Avec la complexité croissante des systèmes de systèmes, ces points ont un impact également croissant. Il y a d'une part la multiplication des composantes élémentaires, qui augmente naturellement le risque de défaillance ; mais il y a aussi le fait que la maintenance d'un des éléments impacte immédiatement sur la disponibilité globale. Il est donc d'autant plus nécessaire que le soutien soit pris en compte au niveau global : il est d'ailleurs apparu dans des conflits récents que la logistique était critique quant au succès d'une opération où la complémentarité des effets est cruciale, et qu'elle pouvait même être une cause de défaillance éventuelle d'une opération. À tel point qu'il devient essentiel de diminuer les indisponibilités des systèmes élémentaires, et surtout d'intégrer les

niveaux d'intervention au sein du fonctionnement nominal désiré du système de systèmes.

V.3 – *Concepteur*

Il existe un autre rôle de l'homme qui doit être mis en avant pour le système de systèmes, alors qu'il n'avait a priori pas lieu d'être pour le simple système : c'est le rôle de concepteur. Pourquoi donc ? Parce que le système de systèmes n'est pas rigide dans sa conception, qu'il s'inscrit comme nous l'avons dit dès le début dans une logique capacitaire, que l'expression de besoin et les exigences ne sont pas figées pour toute sa durée de vie, et que ce n'est pas une simple rénovation à mi-vie qui peut y remédier. Le concepteur trouve alors toute sa place, car il doit être capable de suivre les évolutions capacitaires, en traçant et minimisant les impacts sur les systèmes, se concentrant sur l'architecture d'ensemble, pour des raisons essentielles de délai et de coût. Mais si le concepteur a un rôle fondamental tout au long de la vie du système de systèmes, il devient nécessaire de prendre en compte ses spécificités si l'on veut optimiser sa tâche et son rendement ! Comme le concepteur est a priori justement un homme, ses limitations physiologiques se retrouvent ici : il s'agit en particulier de maîtriser toute l'information associée à l'ingénierie du système de systèmes, ainsi que la maîtrise de l'impact d'une évolution ou d'une obsolescence sur l'architecture système, fonctionnelle ou physique. La quantité d'information, et sa complexité relationnelle, sont certes traitables par l'assistance de l'ordinateur, mais l'important est également de minimiser ce travail : la conception doit être conçue elle-même pour faciliter sa gestion de configuration., en vue d'une exploitation aisée par l'homme. Cette problématique fait l'objet depuis quelques années de recherches en ingénierie de la modélisation et en ingénierie logicielle, où des techniques d'une part de rétro-ingénierie, d'autre part de transformation de modèles, ont justement pour finalité d'autoriser cette évolutivité de la conception, et l'insertion « à la demande » de systèmes pour une nouvelle configuration capacitaire souhaitée.

V.4 – *Client, fournisseur*

Le dernier rôle dévolu à l'homme dans sa relation particulière avec un système de systèmes est celui de client, ou plus précisément acheteur, ainsi que de fournisseur. Aussi étrange que ceci puisse paraître, on ne peut négliger cet aspect dans la mesure où cela influe directement sur la maîtrise du cycle de vie dudit système. En effet, comme précisé ci-dessus, le système de systèmes est en perpétuelle évolution, au niveau des exigences qui le caractérisent, et au niveau de ses composants. Ceci entraîne des logiques d'achat adaptées et suffisamment souples pour s'adapter à cette problématique ; la contrainte posée par l'homme est ici relative à son rôle comme acheteur et comme fournisseur. En effet, l'acquisition s'inscrit dans un contexte d'une part de réglementations, d'autre part

d'entreprises et d'environnement concurrentiel. Ces éléments sont évidemment à prendre en compte, car ils conditionnent la faisabilité de l'acquisition. En particulier, on y retrouve le lien avec le rôle de concepteur : par exemple si on se place dans un cadre de développement incrémental, il faut mettre en adéquation le processus d'achat et le processus de conception. De la même manière, il faut mettre en correspondance la politique de soutien logistique intégré et de maintenance avec la capacité à exécuter les actes contractuels correspondants, tout en prenant en compte la pérennité des fournisseurs sur la durée de cette maintenance. En effet, le monde concurrentiel entraîne des disparitions d'entreprises, des rachats, des évolutions de stratégies commerciales, d'autant plus que les marchés de la défense ne sont pas forcément les plus porteurs dans la durée.

VI - L'HOMME DANS LES SYSTÈMES DE SYSTÈMES : SES ATTENTES

Les habitudes ont changé avec l'évolution de la société, et en particulier la diffusion des nouvelles technologies. En particulier, l'interactivité entre le public et les systèmes de systèmes comme Internet ou l'ensemble de la société numérique est à présent basée sur un mode essentiellement de recherche et récupération d'une information ou d'un service (le mode « pull » pour employer la terminologie anglo-saxonne), contrairement aux habitudes de la décennie précédente, qui était basée sur le principe de la fourniture d'une information (le mode « push »).

Pour résumer, l'utilisateur humain devient un utilisateur averti et exigeant, qui souhaite disposer de la bonne information au bon moment, et ne veut plus a priori faire le tri dans une masse d'informations qui lui seraient fournies en bloc. Si de son côté il est amené à fournir des informations, il veut un retour utile.

Il est clair que ces habitudes prises dans la vie de tous les jours se répercutent sur les profils des utilisateurs quand ils sont face ou intégrés au sein du système de systèmes : l'interactivité ne pourra se résumer à un simple rôle d'opérateur, où l'homme ne ferait qu'être aux commandes de certaines manettes, ou fournirait des informations au sein d'un processus complexe de décision. L'homme sera demandeur d'un retour par rapport à ce qu'on exige de lui : son attente par rapport à un système de systèmes sera donc basé sur une conception d'échange fructueux, une espèce de relation gagnant-gagnant. Ceci est tout à fait compréhensible, au-delà du simple contexte sociétal qui a changé : par rapport à un système, l'homme est certes opérateur, mais il a un rôle dominant dans une certaine mesure. Au contraire, l'homme perd cette relation par rapport au système de systèmes, au sein duquel il est plutôt intégré voire noyé. C'est justement pour ne pas avoir ce sentiment, qui irait à l'encontre de l'efficacité globale, qu'il est fondamental de penser la place de l'homme et son interaction avec le système de systèmes.

Cette notion d'interactivité, qui va au-delà d'une simple interaction où les échanges seraient limités à des instructions de base sans sémantique particulière attachée, est essentielle. Prenons à titre d'illustration l'exemple des opérations réseau-centrées et la problématique de l'établissement et de la diffusion d'une situation tactique partagée. Dans un tel contexte, il est demandé à tous les abonnés de fournir en temps réel leur position et leur identification (ce qui peut se faire de manière automatique) ainsi que les éventuelles menaces détectées. Ceci se fait, pour l'instant, par des messageries analogues à ce qui est monnaie courante dans le domaine civil. Il est clair que, du fait de cette analogie de moyens – la problématique est guère différente d'une transaction de commerce électronique auprès de fournisseurs distants et distribués au sein d'une chaîne complexe : organisation d'un séjour de vacances par exemple avec des agences de voyage, des transporteurs, des hôtels, d'éventuelles pré-réservations de prestations sur place... –, les attentes de l'utilisateur humain ont tendance à se conformer à des schémas préétablis. Un certain délai dans la réponse est accepté, sous certaines conditions d'avertissement et de prédiction, mais un retour d'information est exigé.

Il en est de même quand nous voyageons par avion : nous sommes alors plongés dans le système de systèmes du transport et contrôle du trafic aérien. Réactivité, interactivité, retour d'information ou capacité à fournir une information sur requête, sont devenus des exigences quotidiennes. Il serait inimaginable, si l'on veut que l'homme adhère au système de systèmes dans son utilisation et son fonctionnement, qu'il n'en soit pas de même dans le domaine de la Défense.

Mais ceci n'est qu'un aspect de la nécessaire confiance qui doit s'établir. L'autre est lié à la sécurité du système de systèmes : de même que le commerce électronique n'a eu un véritable essor que lorsqu'on a pu garantir la sécurité des transactions et donc ramener la confiance, de même il est nécessaire de garantir sécurité de l'information et sûreté de fonctionnement

Voyons à présent les problèmes liés à la sûreté de fonctionnement : il s'agit de la propriété qui permet aux utilisateurs d'un système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre ou plus précisément de l'ensemble des aptitudes d'un produit lui permettant de disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et pour son environnement (BNAE/RG Aéro 00040). La sûreté de fonctionnement englobe les notions de :

- disponibilité (probabilité pour que le dispositif fonctionne correctement à l'instant de sollicitation, cf. AFNOR NFX 60-500),
- fiabilité (probabilité pour que le dispositif fonctionne correctement pendant un intervalle de temps donné, cf. AFNOR NFX 06-501),
- maintenabilité (aptitude du produit à être remis dans un état de fonctionnement donné, dans des

- limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions données),
- et sécurité (aptitude du système à résister aux agressions extérieures, qu'elles soient naturelles, malveillantes ou involontaires).

Ces aspects revêtent une importance accrue dans les systèmes de systèmes, du fait de la complexité globale et de la difficulté à formaliser la satisfaction d'une capacité recherchée. Mais également si on était capable de traduire cette dernière en termes de performances quantifiables, il se poserait toujours la question de l'adéquation des modèles représentant l'homme au sein du système de systèmes.

Un dernier aspect, lié encore aux habitudes prises dans la société, concerne l'acceptabilité des interfaces homme-machine : tant les jeux vidéo, que les divers logiciels grands publics offrent des capacités de présentation de l'information qui sont ludiques et séduisantes. Il est donc nécessaire de tenir compte de cet état de fait pendant les étapes de conception et de développement. On pourrait même se poser la question de rendre ludique l'interface au sein des systèmes de Défense – au-delà des éventuels états d'âme éthiques – de la même manière que les logiciels courants tentent de le faire, aux seules fins de baisser les niveaux de stress des opérateurs.

Les différentes remarques qui ont précédé pourraient suggérer que c'est l'effet de mode qui prime ; on pourrait aussi objecter que la vie courante et l'évolution de nos habitudes sont totalement asservies à une dictature de la technologie imposée par des producteurs qui en fait se soucient peu de l'humain comme utilisateur intelligent ou utile quant à sa plus-value dans une interaction avec le produit, et qui le considèrent uniquement comme un client à séduire – ou exploiter –. Et que subséquemment la conception des systèmes de systèmes utilisés quotidiennement n'est pas guidée par une optimisation architecturale de la place de l'homme, mais simplement par la constitution d'une clientèle captive. C'est probablement en partie vrai, mais cette force de l'habitude ne peut et ne doit pas être négligée, sous peine de diminuer l'acceptabilité de l'ensemble du système de systèmes. De manière introspective, souvenons-nous comment nous réagissons quand une fonction disparaît dans un produit familier, même si nous ne l'utilisons quasiment jamais. Il en résulte un malaise, une insatisfaction, voire un regret... qui de facto baisse (momentanément) notre performance en tant qu'utilisateur.

On se plaît à rêver que l'homme fût aussi rationnel qu'il le prétend... !

VII – MÉTHODES D'INGÉNIERIE

Aujourd'hui, pour mener à bien le projet de conception d'un système, des canevas pour organiser et planifier la conception existent [3, 15, 16]. Il s'agit de documents normatifs tels que l'EIA 632, élaboré

aux USA par l'ANSI, et l'ISO 15288. Petit à petit, ces documents deviennent le référentiel sur lequel s'appuient les entreprises engagées dans la conception de systèmes complexes.

Les activités spécifiques aux facteurs humains sont spécifiées de façon explicite dans les processus de l'EIA 632. Pour une description détaillée, se référer à [21]. Ces éléments sont des premiers pas ; pour autant, il reste du chemin à parcourir. Intégrer les facteurs humains à la conception implique de travailler ensemble, de concert. Pour cela, il est nécessaire de disposer de méthodes et d'outils communs permettant d'organiser, de planifier, de gérer et de mettre en œuvre des activités des facteurs humains, tout au long du cycle de vie du système. L'élaboration de ces méthodes et outils communs ne résout pas toutes les difficultés rencontrées. D'autres aspects, culturels, sociaux et organisationnels, ont d'importants impacts sur l'intégration des facteurs humains au sein de la conception.

Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier le processus d'ingénierie des facteurs humains et les activités qui lui sont propres. Dans cette perspective, le processus de conception centrée sur l'utilisateur est spécifié dans le document ISO 13407. Il ne traite que du processus de conception de systèmes informatiques et ne prend pas en compte l'ensemble des dimensions et des disciplines des facteurs humains. Par exemple, des aspects concernant la radioprotection, les risques sur la santé induits par des contraintes musculaires ou squelettiques, ne sont pas pris en compte, de même que d'autres aspects tels que la surcharge de travail, ou les conflits d'objectifs en termes de double contrainte sur le stress des opérateurs et leur capacité à intervenir dans toutes les situations qu'ils rencontrent.

Dans un second temps, on peut se poser les questions strictement liées à l'ergonomie des interactions homme-machine, et se référer au document ISO 16982, qui s'inspire de l'ISO 13407 précité ainsi que de l'ISO 12207 consacré à l'ingénierie du logiciel.

Mais une vision plus orientée vers le processus est nécessaire. C'est l'objet du document ISO 18529, qui présente un certain nombre d'exigences et d'activités du processus centré sur l'humain, telles qu'identifier et planifier l'implication des utilisateurs, planifier les activités de conception centrée sur l'humain, identifier et documenter l'environnement physique, utiliser les connaissances existantes pour développer des solutions de conception. Cependant, s'appuyant sur l'ISO 13407, il ne prend pas en compte les autres dimensions des facteurs humains. Il faut donc poursuivre le travail commencé en identifiant l'ensemble des activités en termes de ressources, compétences, coûts, méthodes, outils, indicateurs, flux, aspects juridiques, bref l'ensemble des facteurs nécessaires à la prise en compte et à l'intégration des facteurs humains dans la conception. Une telle démarche se doit de s'intégrer dans un modèle de maturité adapté, comme CMM ou CMMI.

Au-delà de ces premiers référentiels normatifs, en ce qui concerne l'intégration des facteurs humains dans le processus de conception, il est donc nécessaire de poursuivre et d'amplifier les travaux menés actuellement en terme d'ingénierie des facteurs humains (identification des processus et des activités, des compétences et des produits de l'activité), de telle sorte que les facteurs humains soient appréhendés comme discipline d'ingénierie organisés, planifiés et gérés comme les autres disciplines.

Quittons maintenant le monde des normes pour celui de la mesure de l'efficacité qui en est le prolongement opérationnel. Afin d'une part de mieux évaluer la performance de l'homme au sein de l'architecture, que ce soit comme opérateur, superviseur ou décideur, d'autre part d'optimiser la place de l'homme dans le système de systèmes (place a priori de l'homme dans l'architecture, mesure de l'impact des changements de technologies sur les activités, évolution des interfaces ou plus généralement de la place de l'homme suite aux mesures de performance a posteriori), il est souhaitable de disposer de modèles prédictifs et normalisés, et de métriques.

Ces deux attributs posent des difficultés, dans la mesure où le premier insiste sur l'aspect comportemental ce qui, au-delà d'une éventuelle appréhension des processus cognitifs sous-jacents, nécessite d'avoir une idée de la manière dont l'opérateur humain s'acquitterait de la tâche que l'on souhaite lui confier. Or, si ceci est envisageable pour des modes opératoires stéréotypés, comme l'opération de systèmes dédiés pour lesquels le retour d'expérience opérationnel permet de connaître les facteurs de charge, les délais de réaction, etc., cela devient beaucoup délicat pour des tâches de décision, comme la classification de cibles et l'évaluation de situation demandées à l'officier coordinateur tactique lors d'une mission de surveillance maritime ou aérienne. L'aspect normalisé est tout aussi fondamental, car sans lui il n'est pas possible de mener des évaluations comparatives d'architectures sérieuses ; par ailleurs les modèles normalisés se doivent de prendre en compte les divers contextes opérationnels, afin de ne corriger les biais induits par le stress, la fatigue, voire la dimension éthique attachée à certaines prises de décision. On voit là toute la distance qu'il reste à parcourir pour disposer de modèles satisfaisant ces objectifs. Si cette question est déjà importante pour les systèmes, elle devient critique pour les systèmes de systèmes : prenons à titre d'exemple la problématique de réduction des équipages pour assurer des missions complexes comme la défense aérienne. La question de l'automatisation de certaines tâches se pose entre autres au niveau de la détection et de la classification, voire de la décision de mise en œuvre de procédures particulières. Afin de déterminer tant les niveaux précis d'automatisation que l'architecture logique prenant en compte les processus de décision et de transmission de l'information, ces modèles normalisés sont susceptibles d'apporter des éléments

de réponse. La quantification des gains de performance est évidemment complètement dépendante de la validation de ces modèles, ce qui est un autre défi technique.

Pour aborder l'ensemble des aspects ci-dessus, normes, métriques, modèles, il est nécessaire de disposer d'outils à la hauteur de la complexité de la tâche. En effet, loin est le temps où l'architecte pouvait prétendre avoir une vision intégrale et une connaissance détaillée de son système. Ne serait-ce que dans les systèmes d'armes, comme un avion de chasse, les exigences se comptent par dizaines de milliers ; on imagine alors le défi humain à tracer les exigences pour un système de systèmes, à en assurer la cohérence temporelle en termes de gestion de configuration. Ajoutons à cela des environnements et conditions d'emploi variées et changeantes, ainsi que des interfaces multiples avec d'autres systèmes complexes, et la tâche est proprement inhumaine ! Afin de pallier ces difficultés inhérentes à l'ingénierie des systèmes de systèmes, il est essentiel de pouvoir disposer d'une vision intégrée des données d'ingénierie ainsi que de toute donnée technique (liée au système, à un équipement, aux contextes et scénarii d'emploi, aux menaces...) avec les fonctions associées d'archivage, capitalisation, gestion, mise à jour, etc. Sans entrer dans le détail, ceci implique des recours à des standards, méthodes et outils, propres à l'ingénierie et qu'il « suffit » d'appliquer fidèlement et exhaustivement au niveau système de systèmes, en liaison étroite avec des capacités de simulation distribuée [10, 11]. Au-delà de la nécessité technique de tels ateliers d'ingénierie collaborative relevant des concepts récents d'entreprise étendue, leur avantage économique peut également être démontré [12, 18].

Concernant la problématique qui nous intéresse, à savoir l'étude de la spécificité de l'homme, il faut ajouter qu'il n'est pas oublié dans ces divers outils : en partie simulé comportementalement ou phénoménologiquement, quand les données et modèles validés sont disponibles, il est le plus souvent intégré physiquement, en particulier quand sa contribution en tant qu'élément de l'architecture est a priori perçue comme critique. Les technologies facilitatrices sont la réalité augmentée (qui s'oppose à la réalité virtuelle par le fait qu'on ne plonge pas l'homme dans un univers virtuel purement numérique, mais que l'on construit un univers hybride où les constituants matériels sont enrichis ou complétés par le décorum virtuel), ainsi que les maquettes numériques qui gagnent chaque jour en complexité et efficacité suite aux progrès technologiques incessants des calculateurs et moyens de visualisation.

CONCLUSION

Afin de déterminer la place optimale de l'homme au sein de l'architecture du système de systèmes, il devient nécessaire de le considérer stricto sensu comme un élément de cette architecture, c'est-à-dire qu'il a sa place à part entière au même

titre que les autres systèmes composant le système de systèmes dans l'ensemble du processus d'ingénierie : depuis l'analyse globale de la mission et l'expression de besoin, en passant par l'analyse fonctionnelle et l'allocation de fonctions – l'homme apparaît alors comme une solution au même titre que d'autres –, jusqu'à la recherche des compromis résultant de la confrontation de l'analyse et des affectations fonctionnelles et physiques.

Il est licite de se poser à ce niveau la question de savoir si l'homme est alors facteur limitant ou multiplicateur : en fait, dans une telle analyse d'ingénierie globale du système de systèmes, on se pose les mêmes questions que pour toute autre réponse à une question d'architecture : l'analyse du risque de surcharge (capacité de transmission ou de traitement versus flux de données) est la même que pour un élément physique, si ce n'est qu'elle se traduit par un concept a priori plus affectif. Mais abstraction faite de ce caractère, quelle est la différence entre un opérateur dont le facteur de charge est dépassé ce qui entraîne son inefficacité, et un calculateur saturé du fait des trop nombreuses données à traiter et qui du coup subit des dépassements de mémoire ou doit être réinitialisé. Dans les deux cas, l'élément d'architecture concerné n'est plus apte à assurer sa fonction du fait d'une limitation physique, et l'effet s'en fait sentir sur l'ensemble des composantes en interface directe, via diffusion des contraintes. Il en résulte une recherche permanente de la plus-value et une chasse systématique de la moins-value pour chaque élément, homme y compris. Si les facteurs en première approximation sont la capacité de traitement symbolique et de décision pour l'homme, et la vitesse de traitement et de communication d'une information pour la machine, ces caractéristiques ne sont qu'une première approximation, car dans certaines tâches il peut au contraire être préférable d'échanger ces rôles a priori, afin de réserver cette allocation naturelle des rôles pour des tâches à plus large plus-value. L'exercice d'ingénierie doit donc être mené à l'échelle globale, sans choix élémentaires a priori, dans une vision la plus syncrétique possible.

Une erreur fondamentale à éviter est d'utiliser l'homme comme « bouche-trou » pour pallier certaines obsolescences du système, en partant de l'hypothèse que ses facultés cognitives autorisent cela : par exemple en le mettant devant des interfaces obsolètes, quelquefois sous prétexte de continuité du service ou des filières de formation déjà mises en place. Car dans ces conditions, c'est l'efficacité globale qui est diminuée, dans la mesure où certaines des nouvelles composantes ne sont pas exploitées comme elles pourraient l'être. Ici réside le vrai défi des systèmes de systèmes : l'obsolescence n'impacte pas seulement le composant élémentaire, mais du fait de l'intégration étroite de composants de diverses générations, elle impacte les autres systèmes en relation, et par un mécanisme de diffusion le comportement global est susceptible d'être mis en cause.

Pour finir avec une note d'espoir et d'attente vis-à-vis de la communauté de l'ingénierie du facteur humain, notons que la problématique de l'homme au sein des systèmes de systèmes commence à être appréciée à sa juste valeur – ou plus-value, devrait-on dire –, rejetant les deux tendances excessives qui ont grandement nui à sa bonne intégration dans les architectures système et fonctionnelle : d'un côté les technophiles (il faudrait parler, comme les Anglo-saxons, de « techno-frills ») qui s'arrêtent aux limitations physiologiques de l'être humain et le rejettent soit comme opérateur manuel de base soit comme bouche-trou là où la technologie n'est pas encore au rendez-vous ; de l'autre côté, les adorateurs de l'Homme, qui sous prétexte de la suprématie de l'Être sur la Machine, nouvelle incarnation désincarnée du démon destructeur de l'étincelle de vie, se refusent à adopter une vue système du facteur humain. Or c'est commettre un terrible contresens quant à ce qu'est l'ingénierie : revenant à l'étymologie, la racine latine « ingenium » met en avant la nécessaire créativité sous-jacente à cette activité ; l'ingénieur, loin de la vision réductrice de maître d'œuvre d'un projet où les options sont a priori aisément délimitées, est avant tout un « créateur », en ce sens qu'il se doit d'être proactif face aux évolutions ou éventuelles révolutions susceptibles d'impacter son ouvrage. Une telle attitude revient alors à laisser le champ libre, par négligence, aux premiers détracteurs.

BIBLIOGRAPHIE

1. D. Alberts, Garstka, Stein. *Network Centric Warfare*. CCRP Publications, 1999.
2. L. von Bertalanffy. *Théorie générale des systèmes*. Paris, Dunod, 1993.
3. J.H. Brill, J. Chevallier, J.-L. Merchadou. *Manuel des meilleures pratiques pour le développement des projets spatiaux*. Cépaduès-éditions, 2000.
4. G. Donnadieu, M. Karsky. *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Éditions Liaisons, 2002.
5. J. Keegan. *The history of warfare*. Hutchinson, 2003.
6. J.-L. Le Moigne. *La théorie du système général*. Paris, PUF, 1977.
7. J. Lesourne. *Les systèmes du destin*. Dalloz Économie, 1974.
8. D. Luzeaux. *Towards the engineering of complex systems*. Journées Nîmes 98 sur les systèmes complexes, systèmes intelligents et interfaces, Nîmes, mai 1998.
9. D. Luzeaux. *De l'automatique à l'autonomie des systèmes robotisés complexes*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paris XI, 2001.
10. D. Luzeaux, P. Lodeon. *Simulation-based acquisition of the Future Air-Land Combat System*. NATO Modeling and Simulation Conference, Paris, octobre 2002.

11. L. Kam, X. Lecinq, P. Cantot, D. Luzeaux. *ITCS: the Technical M&S Infrastructure for Supporting the SBA Process*. NATO Modeling and Simulation Conference, Paris, octobre 2002.
12. D. Luzeaux. *Cost-efficiency of simulation-based acquisition*. SPIE Aerosense Conference on Enabling Technologies for Simulation Science, Orlando, avril 2003.
13. D. Luzeaux. *La bulle opérationnelle aéroterrestre et la démarche de simulation pour l'acquisition*. Revue de l'Électricité et de l'Électronique, vol. 6-7, juin 2004.
14. S. MacLane. *Categories for the working mathematician*. Springer Verlag, 1971.
15. J.-P. Meinadier. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Éditions Hermès, 1998.
16. J.-P. Meinadier. *Le métier d'intégration des systèmes*. Hermès Lavoisier, 2002.
17. Morin. *La méthode : la nature de la nature*. Paris, Le Seuil, 1977.
18. National Research Council. *Modeling and Simulation in Manufacturing and Defense Systems Acquisition*. Washington D.C., 2002.
19. R. Passet. *L'économique et le vivant*. Payot, 1983.
20. de Rosnay. *Le microscope*. Paris, Le Seuil, 1975.
21. J.-R. Ruault. *Bridging System Engineering and Human Factor Engineering : a step forward*. International INCOSE Conference, Toulouse, juin 2004.
22. Yatchinovsky. *L'approche systémique pour gérer l'incertitude et la complexité*. ESF Éditeurs, 1999.