

Ingénierie des systèmes complexes : au-delà de la simple dimension technique

Dominique Luzeaux
Ministère de la Défense

Une complexité croissante

Il est banal de souligner que les technologies prennent une part croissante dans notre vie quotidienne, et que l'interconnexion de divers systèmes techniques est devenue une occupation quotidienne en vue de faire émerger de nouveaux usages. Plusieurs domaines de recherche ont été constitués en vue d'apporter des réponses quant à la maîtrise de ces problématiques : « systèmes cyber-physiques », « Internet des objets » en sont les fers de lance :

- Les *systèmes cyber-physiques* (comme définis par la *National Science Foundation* aux États-Unis dans ses appels d'offre – National Science Foundation, 2008 à 2014) sont des systèmes intelligents mis en réseau avec des capteurs, des calculateurs et des actionneurs intégrés, permettant de percevoir et d'interagir avec le monde physique, y compris les opérateurs humains, et d'avoir des performances en temps réel et garanties pour des applications critiques en termes de sûreté. L'intégration sans couture, c'est-à-dire l'imbrication au plus bas niveau des aspects « cyber » et « physiques » au sein des composants et l'orchestration de ces composants et systèmes, est sensée permettre l'amélioration notable des capacités en termes d'adaptation, de résilience, de sûreté, de sécurité, de facilité d'utilisation, de changement d'échelle, par rapport aux simples systèmes électroniques intégrés disponibles aujourd'hui.
- L'*Internet des objets* consiste à prolonger la philosophie d'Internet au-delà du monde électronique en franchissant la barrière des objets physiques, étant défini comme un « *réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et sans fil, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données qui s'y rattachent.* » (Benghozi et al., 2009).

Ces domaines sont des instances de ce que l'on peut appeler les « systèmes de systèmes » (abrégié ultérieurement par SdS), où le mot *système* est défini comme : « *un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité* » – cette définition donnée par l'Association Française de l'Ingénierie Système reprend celle des normes habituelles dans le domaine (voir Luzeaux & Ruault, 2008, pour plus de détail sur les différentes normes en ingénierie des systèmes). Sans définir pour l'instant davantage ce qu'un SdS couvre précisément, restons-en à l'application récursive du mot « système » dans l'appellation, en revenant à la définition de ce dernier. Ce qu'il est important de souligner dans cette définition est que les « éléments » peuvent être des

matériels, des logiciels, des personnes, des organisations, des compétences humaines. Ceci est d'autant plus important que les deux définitions rappelées en début d'article, ainsi que la très grande majorité des travaux relevant des deux domaines concernés,



Ciel couvert,
Eugène Boudin (1854)

se focalisent sur les aspects technologiques des composants et les aspects techniques liés principalement à la notion de mise en réseau. Les questions liées au fait que ces systèmes incluent des personnes mais aussi des organisations, et à l'impact que cela pourrait avoir sur le comportement ou la maîtrise des systèmes, sont négligées ; seuls sont regardés éventuellement les impacts sociétaux ou éthiques liés à la dissémination grandissante de tels systèmes dans notre quotidien.

L'objet de cet article est de mettre en évidence d'une part toutes les dimensions non techniques que l'on rencontre dans les systèmes de systèmes, et d'autre part l'impact qu'elles ont sur la dimension technique, qu'il s'agisse de la conception ou de

l'usage dudit SdS. En fait, plus qu'un impact, c'est une véritable interaction entre les dimensions techniques et non techniques, tout au long des divers processus sous-jacents à la conception et à l'usage du SdS, que nous allons mettre en évidence.

Comme nous parlerons dans la suite très souvent de questions organisationnelles, rappelons qu'une *organisation* est un réseau de personnes avec un but commun ; des exemples sont un département dans une entreprise, ou alors un projet, dont le but est de développer, produire, vendre ou maintenir un produit. L'emploi du mot « réseau » sous-entend qu'il ne s'agit pas simplement d'une multitude de personnes mais que cette dernière dispose de règles explicites (des processus) ou implicites de fonctionnement, éventuellement de hiérarchie : en fait le réseau apporte sa topologie spatiale et temporelle, donc une forme pouvant éventuellement varier dans le temps. Selon le contexte, et en particulier quand il s'agit de conduite d'affaires, une organisation sera aussi appelée entreprise.

Qu'est-ce qu'un SdS ?

Il n'y a pas de définition unanimement acceptée de ce qu'est un SdS (dans Luzeaux & Ruault, 2008, nous en avons listé plus d'une quarantaine, et depuis le nombre a encore augmenté !), même si la plus largement citée depuis deux décennies est celle de Maier (1998) ; elle définit le SdS par les caractéristiques suivantes qu'il exhibe habituellement en totalité ou en partie : les systèmes constitutifs peuvent être indépendants sur les plans opérationnel (donc pouvoir être utilisés indépendamment) et managérial (donc avoir leur propre équipe projet, leur propre calendrier, leur propre ligne budgétaire), ils peuvent être distribués géographiquement, ils peuvent évoluer au cours du temps (de nouvelles fonctions ou de nouvelles finalités peuvent être définies), ils peuvent exhiber au niveau de leur comportement des phénomènes d'émergence.

L'inconvénient d'une définition comme celle de Maier est qu'elle est essentiellement technique – et on trouve le même travers dans la grande majorité des travaux autour des systèmes cyber-physiques – et se concentre surtout sur les stades de conception et de développement d'un SdS.

La définition donnée récemment par l'INCOSE (International Council on Systems Engineering) dans la version courante du guide sur l'ingénierie système (Haskins, 2012) est intéressante à plusieurs titres : « *la notion de SdS s'applique à un système d'intérêt dont les éléments sont eux-mêmes des systèmes ; typiquement cela entraîne des problématiques de grande échelle et interdisciplinaires, avec des systèmes multiples, hétérogènes, distribués* ». Une décennie plus tôt, l'INCOSE avait une autre définition : « *le SdS est une collection de systèmes constitutifs en interopération et produisant habituellement des résultats ne pouvant être obtenus par les systèmes individuels* ». On y voit une évolution importante avec la prise en compte de la notion d'interdisciplinarité, et un retour à une définition récursive qui permet de réintroduire (timidement) les aspects liés aux personnes et organisations au niveau conceptuel du SdS (puisque ce dernier est de fait un système par la définition), et de ne pas simplement se concentrer sur l'interconnexion.

Ces dernières années, on a vu apparaître un certain consensus sur une caractérisation récente des systèmes de systèmes en termes de quatre différents niveaux de contrôle principaux, qui tend à modérer un peu les remarques précédentes dans la mesure où on y voit poindre l'aspect sociotechnique :

- SdS dirigés : ils sont créés et gérés en vue de satisfaire des buts spécifiques, et les systèmes constitutifs sont subordonnés ;
- SdS assumés : s'il y a des objectifs communs et un responsable global des ressources, les systèmes constitutifs restent indépendants en termes de propriété, objectifs, financements, gestion de leur cycle de vie ;
- SdS collaboratifs : les systèmes constitutifs interagissent de manière plus ou moins volontaire pour satisfaire des buts sur lesquels il y a un agrément général ;
- SdS virtuels : il n'y a pas d'autorité de gestion centralisée et pas non plus de but sur lequel les différents systèmes constitutifs se sont mis d'accord.

Les aspects d'autorité et de responsabilité, fondamentalement liés aux questions organisationnelles sous un angle managérial mais aussi juridique rentrent donc en lice. Rappelons que l'*autorité* est le pouvoir accordé à une entité pour organiser des ressources identifiées dans un but donné, et pour contrôler l'opération et l'utilisation de ces ressources. Elle peut être déléguée à des entités (personnes, systèmes) rattachées, ou alors transférée complètement à une autre organisation. De cette notion d'autorité dérive la notion d'*autonomie*, qui implique le droit et l'autorité de prendre des décisions indépendantes. En regard de ces deux notions, on a la notion de *responsabilité*, qui est le fait d'être tenu comme redevable, auprès d'une entité, de l'exercice de l'autorité ; c'est une caractéristique que ne peuvent *a priori* posséder que des personnes ou des organisations définies, du fait de considérations légales.

Quand un SdS est opéré, divers modes quant à ces trois aspects peuvent intervenir : l'autorité peut être centralisée ou distribuée, ce qui entraîne alors des délégations ou des transferts de responsabilité (ce qui a des implications sur le plan juridique). D'où alors de nouvelles responsabilités qui échoient à certaines entités. Dans le cas de niveaux d'autonomie variés des composantes du SdS, afin d'évaluer les responsabilités quant aux conséquences d'une prise de décision, il est essentiel d'avoir défini au préalable un certain nombre de règles. Ceci est d'autant plus important quand c'est un système automatique qui exerce cette autonomie ; l'usage veut alors que ce soit la dernière personne ou entité, qui a autorisé l'action du système automatique, qui endosse cette responsabilité.

Ces considérations soulignent la nécessité d'établir une gouvernance claire au niveau de l'opération et de l'utilisation d'un SdS. De manière générale, cette gouvernance, potentiellement traduite sous forme d'une convention entre organisations, va reposer fondamentalement sur une confiance inter-organisationnelle permettant de définir l'autorité sur les ressources (impliquées en particulier au cours de l'opération ou de l'utilisation des systèmes constitutifs), notamment au niveau des interfaces, ce qui permet de gérer les perturbations quotidiennes et les incidents occasionnels, en vue d'atteindre une résilience accrue du système global. La définition claire de la gouvernance et notamment les principes de gestion des conflits sont d'autant plus critiques quand il y a délégation de l'autorité et de la responsabilité au sein du SdS.

Afin d'illustrer ce discours général et de souligner la criticité de ce point de vue non technique sur les SdS, présentons brièvement à présent quelques exemples.

Quelques exemples

La défense anti-missile

L'archétype du SdS, pour des raisons historiques (le concept de SdS a été développé dans la littérature en relation directe avec les études autour de cet exemple), est la défense anti-missile. Le sujet est né au cours de la Guerre Froide, l'objectif étant de protéger un territoire national (les États-Unis, ou plus récemment l'Europe dans le cadre des réflexions menées par l'OTAN) d'une frappe balistique limitée. Sans rentrer dans le détail, précisons que la position de la France était différente de celle de ses partenaires européens, en matière de priorité d'une telle défense, dans la mesure où la France construit sa politique de dissuasion quant à l'intégrité du territoire national sur sa capacité de frappe nucléaire (par contre elle s'intéresse à la protection d'un théâtre d'intervention contre les menaces de type missile balistique). Ceci dit, comme ses partenaires, la France a travaillé et investi sur le sujet. Les conflits de la fin du XX^e siècle ont aussi montré l'actualité de cette menace, dans le domaine des missiles tactiques.

C'est cette application qui a donné naissance au concept de SdS au milieu des années 1990. Les fonctions principales sont de détecter, suivre, intercepter un ou plusieurs vecteurs aériens dirigés vers la zone d'intérêt. Sur le plan technique, le scénario est le suivant : une menace est détectée par des moyens satellitaires ou aériens (c'est le tir du missile qui est détecté), l'objet en vol est suivi par des radars afin de calculer sa trajectoire et déterminer le point d'impact potentiel, l'information sur le point d'impact est transmise via les systèmes d'information et de commandement aux autorités compétentes, la décision quant à la réponse est prise (ne rien faire, ou alors intercepter la menace), la trajectoire de l'objet est suivie par des radars de précision, un tir d'interception est mené. La contrainte essentielle est temporelle : un missile tiré à quelques centaines de kilomètres met quelques minutes à parcourir sa trajectoire, ce qui laisse très peu de temps au traitement de l'information et à la prise de décision, d'autant que cette dernière met en œuvre potentiellement les échelons politiques les plus élevés. L'aspect SdS apparaît naturellement :

- avec l'emploi de systèmes sur étagère (il ne saurait être question d'acquérir des moyens strictement dédiés à ce système pour des raisons budgétaires),
- employés par ailleurs dans le cadre d'autres missions – les vecteurs satellitaires ou aériens de détection, les moyens de suivi de trajectoire, les actionneurs mettant en œuvre l'interception –,

- géographiquement répartis – les moyens de détection satellitaires ou aériens sont manifestement éloignés du théâtre à protéger, mais il en est de même des radars de suivi en fonction de la précision recherchée, et évidemment les centres de décision sont déportés –,
- et utilisés au cours du temps avec des menaces évolutives – missiles balistiques simples, à têtes multiples, voire missiles non balistiques comme les missiles de croisière.

Au-delà des questions techniques, la capacité de défense anti-missile, en particulier balistique, met en évidence des questions politiques, économiques et organisationnelles. Il suffit de voir les tensions entre la Russie d'un côté, les États-Unis et l'OTAN de l'autre, autour de la mise en place de radars d'alerte en Europe ; au-delà des considérations géopolitiques sur les intentions cachées ou pas des uns et des autres, considérons le « simple » cas d'école suivant : un missile serait tiré et il est décidé de l'intercepter via un système d'armes tiré depuis le pays A, l'interception ayant lieu au-dessus du pays B avec des retombées provoquant éventuellement des dommages. On imagine les débats sur les responsabilités et les réparations éventuelles ! Pour compliquer la situation, souvenons-nous qu'en 2007 le président russe proposait au président américain d'utiliser certaines stations radars situées dans d'anciennes républiques soviétiques : que se passerait-il si la décision d'interception et le tir provenaient d'un membre de l'OTAN et les dommages avaient lieu sur un territoire qui n'en ferait pas partie ? Toutes les considérations géopolitiques sont d'ailleurs bien plus prégnantes que la résolution technique du problème (qui sans être évidente n'en est pas moins maîtrisée avec les moyens à disposition), comme elles font l'objet de discussions depuis des années ! Du point de vue économique, il en est de même avec le partage des coûts d'acquisition et de maintenance des moyens, qui est une équation difficile à résoudre (car manifestement l'aspect économique est très dépendant de l'aspect politique...). Et enfin sur le plan organisationnel, il suffit de regarder un organigramme de l'OTAN relatif à cette capacité (appelée ALTBMD en l'occurrence) pour comprendre la complexité des équilibres de pouvoir : on retrouve là une interdépendance avec les aspects politiques.

En résumé, les dimensions non techniques de cet exemple sont cruciales, et en fonction de leur résolution découle un choix de solutions (où placer les différentes composantes du système global et comment les relier entre elles ?) et un choix d'organisations pour la mise en œuvre opérationnelle du système (qui fait quoi ? qui est responsable de quoi ?). On conçoit aisément que des choix géopolitiques variés conduiraient à des solutions techniques et/ou des organisations de mise en œuvre variées également. Et réciproquement, la question ne se poserait pas s'il existait une solution technique qui permît de se passer de toutes ces discussions !

Le système de systèmes Scorpion de l'armée de terre française

Scorpion (Système du COnтакт Renforcé par la Polyvalence et l'InfOvalorisation) est un programme d'équipements du ministère de la défense français devant permettre aux hommes, aux équipements et aux véhicules de travailler de concert en temps réel grâce à

*Concert au casino de
Deauville, Eugène Boudin
(1865)*



une informatisation complète du champ de bataille. Il représente l'avenir de l'armée de terre, avec une nouvelle génération de véhicules et d'équipements destinés à des brigades interarmes polyvalentes et réactives. Il est à noter que d'autres pays (États-Unis, Italie, Allemagne, Grande-Bretagne...) se sont lancés en partie dans des démarches analogues mais pour l'instant la démarche française est la plus aboutie et la plus avancée concrètement.

Lancé en 2010 avec une phase d'élaboration, Scorpion rentre aujourd'hui dans le temps de la réalisation qui doit porter sur toute la décennie, et les mises à jour dureront pendant encore une vingtaine d'années. Élément clé pour accroître l'efficacité opérationnelle des forces, le programme est conduit par étapes successives articulées autour de jalons de validation clairement identifiés et de livraisons au plus tôt, pour permettre une mise à disposition progressive des nouvelles capacités au profit des forces armées. La maîtrise d'ouvrage est assurée par l'État avec une collaboration étroite des divers services (en charge respectivement : de l'expression de besoin capacitaire, de la direction de projets, des finances, de l'utilisation ultérieure), et en s'appuyant initialement sur un fonctionnement en plateau avec un acteur industriel pour les travaux d'architecture d'ensemble.

Le programme ne fait pas table rase de l'existant et prend en compte des équipements actuellement en fin de phase de production ; il prévoit la livraison de véhicules blindés, la rénovation d'une partie du parc existant de chars, un système d'information et de combat mettant en réseau les différentes plates-formes en unifiant et étendant fonctionnellement les systèmes d'information et de communication existants (afin de rationaliser et d'optimiser l'interconnexion avec les échelons hiérarchiques et tactiques supérieurs, notamment dans le cadre d'une coalition internationale), des kits de numérisation pour intégrer une partie de ce système dans les différents véhicules qu'ils soient nouveaux ou anciens et rénovés, des radios logicielles de nouvelle génération capables de faire transiter les flux d'information. L'ensemble a donc pour vocation de devenir le SdS permettant à tous les éléments des unités de dialoguer selon un même langage et une même procédure avec une accélération du tempo de la manœuvre grâce au couplage, à la meilleure gestion de l'information, et donc à la coordination des feux, ainsi qu'une connaissance instantanée des pertes humaines et matérielles.

Cet exemple est instructif car, sur le plan programmatique, Scorpion est aussi géré en tant que SdS : on aurait pu imaginer, comme c'était l'habitude dans les décennies précédentes, d'avoir plusieurs programmes complètement indépendants pour chacune des grandes familles d'équipements, et d'essayer *ex post* de faire en sorte qu'ils inter-opèrent (ce qui aurait été alors principalement un défi technique). Ici, au contraire, la définition du besoin, l'optimisation tant des procédures d'acquisition des sous-ensembles que des architectures techniques, la transformation des structures organisationnelles en vue de se préparer à l'opération de Scorpion au cours du temps, ont été faites dans une vision globale de SdS pour l'ensemble des dimensions techniques, contractuelles, organisationnelles et programmatiques.

De multiples domaines d'application des SdS

Outre les applications historiques des SdS à la défense, au contrôle aérien, à la logistique, à l'approvisionnement énergétique, notamment électrique, il existe des applications naturelles (Barot *et al.*, 2013 ; Haskins, 2012) :

- le domaine du transport, avec l'amélioration des réseaux en particulier pour le défi de l'intégration des transports multimodaux, l'optimisation des consommations énergétiques, les impacts sociétaux comme de nouveaux modes de gestion des transports domicile-travail...
- le défi de la démographie d'une part croissante, d'autre part vieillissante, avec l'accès à tous aux ressources d'éducation, d'énergie, de santé, de logement...
- la sécurité alimentaire, incluant les aspects de gestion des surfaces et quantités, l'approvisionnement, la distribution, la gestion des déchets...
- la sécurité énergétique, de la génération à la distribution en passant par l'optimisation globale de la consommation...
- la gestion des différentes ressources (matérielles ou énergétiques), de l'acquisition au recyclage en passant par la réutilisation, le retraitement, la transformation, le remplacement...
- la sécurité face au terrorisme, au crime organisé, y compris la cybercriminalité ; la réponse d'urgence aux désastres, la gestion des crises environnementales, sanitaires, ou identitaires et sociales...

Un autre domaine plus général identifié par les mêmes références, et que nous avons aussi développé dans Luzeaux *et al.*, (2008), concerne la globalisation de l'économie, avec les impacts sur les structures sociales et culturelles, et les importants gains financiers qui pourraient être obtenus par une analyse SdS (Korsten & Seider, 2010).

Des référentiels normatifs en évolution

La question clé à se poser est alors : comment faire l'ingénierie de tels systèmes, c'est-à-dire comment les concevoir, développer, produire, valider, mettre en service, opérer, maintenir, faire évoluer, retirer du service ? C'est l'objet de toutes les recherches méthodologiques depuis les années suivant la Seconde Guerre Mondiale, qui ont permis de construire dans les années 1960 les premiers référentiels, d'abord à la NASA, et qui ont ensuite diffusé dans les différents domaines applicatifs de par le monde en adaptant ces référentiels aux spécificités techniques et culturelles.

Dans les années 1990, un besoin s'est fait ressentir pour définir un cadre commun décrivant les processus d'ingénierie des systèmes, avec une terminologie partagée et une vision sur l'ensemble du cycle de vie, mais aussi une prise en compte des aspects liés à la gestion de projet et des interactions avec l'organisation ou l'entreprise œuvrant sur ledit système. L'ambition était bien dès le début d'une part de s'intéresser aux systèmes artificiels intégrant du matériel, du logiciel, des humains, des processus, d'autre part de considérer des processus non techniques mais essentiels à la maîtrise du cycle de vie d'un système. Les versions de la norme en 2002, puis en 2008 (ISO/IEC, 2008), soulignent bien quatre ensembles de processus à considérer, respectivement :

- les processus d'entreprise, qui permettent aux organisations d'organiser le portefeuille des projets, de fournir les ressources dont ils ont besoin, et de mener les actions d'amélioration continue de la qualité ;
- les processus de gestion de projet, qui servent à établir, maintenir et faire évoluer les plans du projet, piloter leur exécution, évaluer la progression du projet ;
- les processus contractuels, dont l'objet est de fournir à l'acquéreur un système qui satisfasse aux exigences contractuelles ;
- les processus techniques, utilisés pour exprimer le besoin des utilisateurs, le formaliser en exigences techniques qui sont nécessaires à la conception du système, à sa validation, à son utilisation et à son maintien tout au long de son cycle de vie jusqu'à son démantèlement.

Il est intéressant, sur le plan épistémologique, de noter que les normes précédentes, comme EIA 632 (ANSI/EIA, 1998), avaient aussi identifié les processus contractuels en plus des processus techniques, mais les avaient intégrés comme des sous-processus de ces derniers. Les processus de gestion de projet sont par contre vus comme indépendants, l'ingénierie système étant définie comme un ensemble d'activités ne relevant pas de la gestion de projet. En fait c'est l'importance croissante de la vision d'entreprise intégrée puis en réseau, mouvement prenant de l'ampleur dès les années 1980 avec le développement d'une vision progressivement horizontale de l'entreprise en complément du modèle de l'intégration verticale, qui motive ce changement de perspective. Le développement des démarches de certification ISO 9001, avec l'explicitation des processus structurant les activités de l'entreprise, popularise le fait d'avoir une vue d'ensemble de tous ces processus, avec l'idée qu'ils concourent tous à l'efficacité globale de l'entreprise. D'un schéma de hiérarchisation des activités et processus, on passe ainsi à un schéma de mise à plat basé sur la juxtaposition cohérente. Ce n'est qu'avec les années 2000 que l'interdépendance desdits processus va prendre une importance cruciale, du fait de l'ubiquité des technologies permettant de favoriser

ces interdépendances sur le plan technique, et en parallèle de l'évolution sociétale avec la réticularité croissante du monde de l'entreprise. Le souci est que cette interdépendance *de facto* n'est pas vraiment prise en compte *de jure*. Or il apparaît que cela devient de plus en plus crucial pour la maîtrise des grands systèmes complexes, comme les SdS. Essayons de l'illustrer point par point, en reprenant certains des exemples sur des situations ne correspondant pas nécessairement à la réalité pour des raisons de confidentialité des informations.



La jetée de Trouville
au soleil couchant,
Eugène Boudin (1862)

D'une certaine prééminence des dimensions entreprise et projet sur des choix techniques

Concevoir et réaliser des projets de grande ampleur comme ceux précités est un métier à part entière, et c'est une décision stratégique de s'engager dans ce domaine. Une entreprise doit s'adapter pour y réussir : typiquement en termes de compétences, mais aussi de cohésion, maturité et expérience des équipes impliquées – c'est ce que mettent en évidence les études paramétriques en vue de déterminer les leviers de succès pour la maîtrise des coûts de gestion de tels projets (Lane, 2006). Il est à ce propos instructif de voir que des modèles utilisés pour concevoir l'architecture technique d'un système, comme les matrices de dépendance (DSM, « *design structure matrix* ») (Eppinger & Browning, 2012), sont aussi des modèles efficaces pour représenter les organisations : ils permettent de mettre en évidence les dépendances fortes entre individus ou compétences, les groupes à consolider éventuellement au sein d'une même sous-organisation, les personnes ou compétences transverses...

Pour une entreprise, qu'elle soit publique ou privée, adapter son organisation et son éventail de compétences représente clairement un investissement, et qui prend du temps. Si l'on regarde l'évolution de plusieurs ministères de la défense (États-Unis, France, Canada, Royaume-Uni...) au cours de la décennie passée, on voit que l'organisation a été adaptée pour prendre en compte explicitement la problématique

des SdS : des services en charge de l'ingénierie capacitaire ont été créés, les référentiels internes d'ingénierie système et de conduite de projets ont évolué pour y inclure nominativement les SdS et les aspects spécifiques liés à leur conduite, des programmes de formation ont été mis en place au profit des agents concernés. Le même mouvement s'est fait progressivement chez les grands maîtres d'œuvre industriels systémiers, d'abord dans le domaine de la défense, puis dans celui de l'énergie (essentiellement le nucléaire) et de l'aéronautique.

En effet, il est tout aussi critique pour un client de maîtriser son sujet que d'avoir à disposition quelques fournisseurs qui ont cette capacité, en termes de compétences et d'organisation de ces dernières. Une conséquence pour le client est que la définition du projet éventuel de SdS doit s'adapter à l'environnement vers lequel le client peut se tourner, s'il souhaite en maîtriser les chances de succès. En fonction de la maturité dudit environnement de fournisseurs, certains choix par exemple d'architectures techniques seront à privilégier – ou tout au moins à éviter. À titre d'illustration, en cas de maturité moyenne, il sera préférable d'opter de prime abord pour des solutions plutôt centralisées, voire monolithiques, plutôt que distribuées, alors qu'un tel choix peut ne pas être optimal sur le plan des performances techniques. La conduite des projets de SdS met en exergue un point bien connu : le donneur d'ordre n'est pas tout seul, et pour qu'il réussisse dans l'atteinte de ses objectifs, il doit pouvoir s'appuyer sur des maîtres d'œuvre à la hauteur de ses exigences. Notons qu'une démarche incrémentale dans l'ingénierie du SdS (tant au niveau des capacités qu'il doit satisfaire, que des livraisons du SdS) est une manière pour le client de faire monter en compétence son réseau de fournisseurs, en faisant coïncider le niveau de maturité et son exigence de croissance avec les incréments capacitaires successifs.

De même, l'environnement en termes de fournisseurs de services doit être mature pour le soutien à l'opération d'un SdS : une maturité non compatible avec les enjeux du soutien entraînera *de facto* des surcoûts récurrents importants. Mieux vaut alors contraindre certaines de ces architectures en vue de simplifier les coûts de soutien ultérieurs, même si ces derniers sont supérieurs à ceux qu'aurait engendré une autre architecture « mieux adaptée » au strict contexte technique, plutôt que de constater une inefficacité récurrente du soutien. Cependant le double risque est alors soit de manquer d'innovation ou de créativité, en se réfugiant dans des solutions sous-optimales mais mieux maîtrisées, soit d'avoir une offre trop réduite voire sclérosée en termes de fournisseurs du fait que l'investissement pour acquérir la maturité nécessaire n'est pas à la portée de tous.

En résumé, ces remarques soulignent l'intérêt pour un client de structurer son réseau de fournisseurs pour le mettre au niveau des enjeux des SdS ; et le niveau de structuration existant ou prévisible est un des paramètres importants de choix dans la définition technique des SdS. Cette démarche doit procéder d'une analyse fine et maîtrisée entre les enjeux techniques et non techniques pour être couronnée de succès.

Le rôle accru de l'humain dans les divers processus de gestion des SdS

En fait il n'y a rien de nouveau sous le soleil : les référentiels d'ingénierie des systèmes mentionnés précédemment recensent un certain nombre de processus non techniques de gestion – que l'on peut qualifier de processus d'appui de l'ingénierie technique du système – (gestion des infrastructures, gestion du modèle de cycle de vie, gestion des ressources, gestion de la qualité, gestion du portefeuille de projets, gestion des décisions, gestion des risques, gestion de la configuration, gestion de l'information).

Cependant, on peut souligner que, pour un SdS, tous ces processus ont une importance accrue, du simple fait de la complexité intrinsèque du SdS due à la présence de multiples systèmes, donc de multiples équipes projet, de multiples organisations en charge tant de la conduite du projet lui-même que de la réalisation des systèmes constitutifs ou du soutien d'un certain nombre d'entre eux. Le point d'équilibre, entre les activités relevant des processus techniques et celles relevant des processus de gestion, est déplacé vers les secondes dans le cas du SdS.

Or si l'on regarde ces activités, on voit qu'elles font intervenir de manière prépondérante les personnels des organisations et leurs méthodes de travail. D'où le rôle accru de l'humain dans les processus et l'importance à accorder aux caractéristiques sociotechniques (en plus du fait que ces derniers sont déjà exacerbés par la constatation qu'un SdS fait intervenir et interagir personnes, processus, information et technologie). En particulier dans le cas d'équipes projet appartenant à des nations différentes, tant pour l'acquisition que pour le soutien du SdS (comme cela peut être le cas dans l'exemple de la défense antimissile), cela entraîne des problématiques de management interculturel, qui ont une influence non négligeable sur les activités techniques : en fonction du bagage culturel (sans oublier la diversité des droits dans les pays, qui conduisent à des pratiques professionnelles potentiellement différentes), certains ingénieurs privilégieront une approche holistique, ou alors intégrative, ce qui aura un impact *a priori* sur la conception architecturale et potentiellement sur le processus de convergence vers l'architecture choisie.

Un autre point clé concerne la transformation et le changement organisationnels que vont induire les SdS, de par leur élaboration, leur développement puis leur utilisation. Si la nécessité de transformation accompagne naturellement la genèse même du SdS au sein d'une organisation – poser un problème nouveau est en effet le premier pas vers l'acceptation des conséquences qu'il est susceptible d'impliquer –, cette transformation ne peut avoir une quelconque chance de succès que si le changement de culture de l'organisation concernée est également correctement mené. Cela est directement lié à l'existence d'une composante essentielle de toute organisation, qui ne se laisse pas transformer sans y être préparée : la composante humaine ! D'où l'importance des processus de conduite du changement, avec les activités d'identification des changements, de planification, d'information, de communication, etc. Ceci passe par la mobilisation des parties prenantes clés.

Rappelons que les *parties prenantes* sont des individus, des groupes ou des organisations qui peuvent affecter, être affectés par, ou se percevoir comme étant affectés par l'activité de décision ou le résultat d'un projet (Project Management Institute, 2009). Elles peuvent être internes (sponsor du projet, groupes organisationnels ou fonctionnels de l'entreprise – finances, comptabilité, achat, commercial, système d'information –, gestionnaires de ressources, experts techniques, experts juridiques, direction, groupes de pilotage, bureau de conduite de projets, membres de l'équipe projet, autres chefs de projet...) ou externes (client, investisseurs, utilisateurs finaux, vendeurs, partenaires commerciaux, experts, consultants, fournisseurs, gouvernements, organismes de réglementation, public, groupes d'intérêt, concurrents...). Les parties prenantes peuvent être classées suivant l'intérêt qu'elles ont dans le projet, ou suivant l'influence qu'elles peuvent avoir.

Là encore, l'identification et la gestion des parties prenantes sont des activités à mener au sein de tout projet (Schibi, 2014) ; souvent faites rapidement en tout début de projet et vues comme des tâches contraignantes que le chef de projet se doit d'assumer, mais

jugées comme inutiles par la grande partie de l'équipe de projet (car pensées *a priori* comme n'ayant pas de valeur ajoutée technique), elles prennent une importance certaine pour les SdS, pour deux raisons essentielles. D'une part un projet de SdS n'a pas le déroulement linéaire d'un projet non complexe, du fait qu'il comporte souvent plusieurs systèmes constitutifs mettant en œuvre des décisions d'investissement non nécessairement synchronisées, et aussi qu'il suit souvent une logique incrémentale, d'où des décisions d'investissement pour chaque nouvel incrément. D'autre part, les SdS suscitent des enjeux politiques, économiques (budgétaires et industriels), sociétaux, écologiques, législatifs, en plus des stricts enjeux techniques (nous faisons ici allusion à l'analyse de type PESTEL d'un SdS, voir Luzeaux & Ruault, 2013 pour plus de détail). C'est ce que nous allons voir maintenant, via le rôle clé joué par les processus d'acquisition.

Quand les stratégies d'acquisition bousculent les réflexions techniques

Les SdS mettent en jeu des montants financiers importants, tant à l'occasion de l'acquisition de certains de leurs systèmes constitutifs que pendant leur utilisation. On comprend alors l'enjeu industriel que peut représenter soit la production de certains systèmes constitutifs, soit le soutien en service ou l'opération du SdS. Ces enjeux sont à la hauteur des risques qu'encourt le maître d'œuvre industriel : il n'est que de considérer le SdS de récupération de l'écotaxe, avec ses portiques et ses systèmes d'information et de traitement, déployés il y a quelque temps sur de nombreux axes routiers français, pour lequel un équilibre économique supposait une période d'opération qui n'a jamais eu lieu. Cet exemple souligne bien les enjeux (et les risques) économiques et politiques pour les SdS, au-delà de la conception technique d'une solution réalisant la capacité recherchée. Voyons donc à présent comment ces enjeux peuvent impacter des choix d'architecture technique du SdS ou de certains de ses principaux systèmes constitutifs.

Pour cela, considérons un SdS formé d'une part de nombreux systèmes constitutifs, à fort enjeu industriel au niveau du développement ou de la production (dans le cas de la défense anti-missile, cela pourrait être les radars et les batteries anti-missiles ; dans le cas de Scorpion cela pourrait être une des familles de véhicules considérés), d'autre part d'un système d'information interconnectant un certain nombre des systèmes constitutifs précités. Supposons de plus que le SdS en utilisation ait une valeur stratégique pour un pays (c'est par exemple le cas de la défense anti-missile, ou d'un SdS comme Scorpion qui représente un atout majeur de la force d'intervention de l'armée française ; c'est aussi le cas de la grille électrique à l'échelle d'un pays, ou du SdS de transport aérien). L'élaboration de la stratégie d'acquisition d'un tel SdS peut *a priori* suivre plusieurs schémas qui se situent entre les deux extrêmes suivants – les schémas intermédiaires correspondent aux partitions possibles de l'ensemble composé des systèmes constitutifs, du système d'information et de la couche intégrative – :

- les systèmes constitutifs et le système d'information sont acquis chacun suivant des stratégies d'acquisition indépendantes (donc avec des niveaux d'intervention de maîtrise d'œuvre industrielle potentiellement variés, et des conditions contractuelles potentiellement différentes), puis l'intégration au sein du SdS fait l'objet d'une stratégie d'acquisition ;
- les systèmes constitutifs, le système d'information et la couche intégrative de niveau SdS sont acquis suivant une seule stratégie d'acquisition.

Le défi est de déterminer la ou les stratégies d'acquisition en prenant en compte les référentiels réglementaires et législatifs existants (qui définissent des règles diverses

et variées concernant les recours à la compétition et la nature que cette compétition doit avoir), et les objectifs politiques éventuels quant à la préférence nationale – constatons simplement la résurgence actuelle du protectionnisme industriel dans de nombreux pays suite à la récente crise financière – ou internationale en fonction des enjeux de souveraineté ou de stratégie industrielle (préservation ou développement d'une base industrielle pour un domaine d'activité particulier) souhaités. Dans la mesure où les cadres réglementaires et législatifs prévoient toujours des dérogations, il s'agit en fait de voir comment répondre aux objectifs politiques tout en respectant les référentiels, donc en rentrant dans les champs d'application des dérogations. En effet, en globalisant ou en détaillant certains périmètres, en analysant ces périmètres sous les angles de la propriété ou de la responsabilité, on ouvre le marché à certains acteurs et on le ferme à d'autres. Ceci nécessite donc de savoir découper le projet global de telle ou telle manière, et donc de déterminer des architectures techniques crédibles et performantes vis-à-vis de l'objectif capacitaire recherché au niveau du SdS global.

Une autre situation est celle des projets internationaux complexes, qui ont une contrainte d'équité quant au retour industriel (activités de production) entre partenaires : il est alors nécessaire que l'architecture dont découle la structure de découpage des tâches (plus connue sous son appellation anglo-saxonne de WBS, « *Work Breakdown Structure* ») soit telle que l'affectation des tâches entre les partenaires industriels satisfasse l'équation recherchée quant à l'équilibre de charge industrielle. Il est clair que, dans ce cas, l'architecture technique retenue pourrait être fort différente de celle qui aurait résulté d'un processus d'optimisation de la solution en réponse au besoin, basé sur des critères uniquement techniques.

Les allers et retours entre les différentes dimensions techniques et non techniques apparaissent clairement à la lumière de cet exemple. Ce type de considération n'est pas lié à des exemples particuliers, mais est amené à se reproduire de plus en plus. En effet, auparavant, les acquisitions de systèmes se faisaient en silo, et l'interconnexion ou l'interopérabilité de systèmes était vue ou souhaitée *a posteriori*. Aujourd'hui la question ne se pose plus en ces termes de mise en œuvre commune des systèmes, mais en termes de valeur recherchée dans une chaîne de valeur complexe. Le *focus* n'est donc plus sur le coût des composantes, mais sur la valeur globale apportée par un SdS, ce qui reporte la problématique de l'acquisition sur une optimisation quant à la recherche de valeur. Et dans la constitution de cette valeur interviennent très largement des considérations autres que la performance technique, en particulier le coût, les exigences politiques et économiques, etc.

Conclusion

Nous nous sommes attachés à montrer que l'ingénierie des systèmes complexes comme les SdS ne se posait pas uniquement en termes techniques, voire que les dimensions non techniques influaient fondamentalement sur les éventuels choix techniques à réaliser. Sans aller jusqu'à une quelconque prééminence de telle dimension sur telle autre, force est de constater la nécessité de toutes les regarder simultanément, de comprendre et d'accepter les couplages entre elles, notamment dans la recherche de la solution idéale répondant au besoin initial.

En guise de conclusion, terminons sur un ultime exemple d'actualité, mettant en évidence que l'oubli d'une dimension non technique peut conduire à un échec retentissant : toujours dans l'exemple du SdS de récupération de l'écotaxe, la dimension

sociétale (l'acceptation par une partie des utilisateurs finaux en l'occurrence) n'a manifestement pas été suffisamment prise en compte dans l'architecture globale du projet.

En fin de compte, le contexte des SdS ne fait que renforcer l'aspect interdisciplinaire prôné par l'ingénierie système ! N'oublions pas à ce propos que cette dernière tire son étymologie du mot *ingenium* (il en est de même du mot « ingénieur »), renvoyant à l'inventivité, la créativité, la capacité de dépasser le donné et de saisir des similitudes entre des choses pouvant être éloignées les unes des autres ; or on a peut-être un peu trop tendance à enfermer l'ingénieur, du fait de sa formation majoritairement très technique, dans une vision trop orientée vers l'aspect technologique. La perspective des systèmes complexes est clairement un moyen de réactualiser les concepts originaux ■

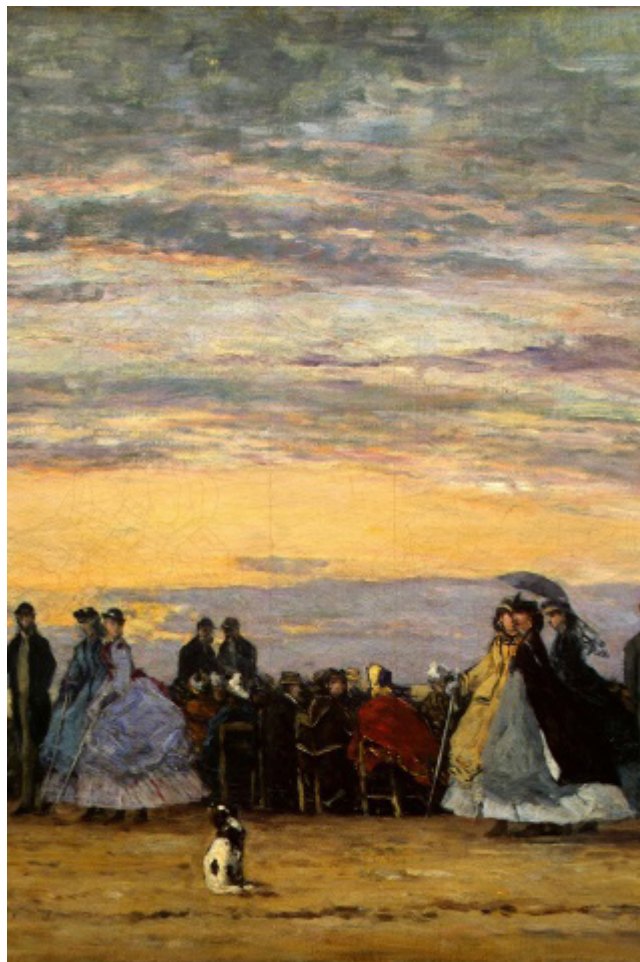
Références

- ANSI/EIA [American National Standards Institute/Electronic Industries Alliance] (1998) *Processes for Engineering a System EIA-632*, Washington DC, ANSI.
- Barot Vishal, Henshaw Michael, Siemieniuch Carys, Sinclair Murray, Ling Lim Soo, Henson Sharon, Jamshidi Mohammad & DeLaurentis Daniel (2013) *State of the Art on Systems of Systems Management and Engineering. Trans-Atlantic Research and Education Agenda in Systems of Systems (T-AREA-SoS) Project*, TAREA-PU-WP2-D-LU-9 v3.0.
- Benghozi Pierre-Jean, Bureau Sylvain & Massit-Folléa Françoise (2009) *L'internet des objets, quels enjeux pour L'Europe ? The Internet of Things, What Challenges for Europe?*, Paris, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme. (<http://books.openedition.org/editionsmsh/84?lang=fr>)
- Eppinger Steven D. & Browning Tyson R. (2012) *Design Structure Matrix Methods and Applications*. Cambridge, The MIT Press.
- Haskins Cecilia (2012) *Incose Systems Engineering Handbook Version 3.2.2. A Guide For Life Cycle Processes and Activities*. San Diego (CA), Incose.
- Henshaw Michael, Ncube Cornelius, Ling Lim Soo, Dogan Huseyin, Jamshidi Mohammad & DeLaurentis Daniel (2013) *The Systems of Systems Engineering Strategic Research Agenda, Trans-Atlantic Research and Education Agenda in Systems of Systems (T-AREA-SoS) Project, TAREA-PU-WP5-R-LU-26, Issue 2*, Loughborough (UK), Loughborough University. (https://www.tareasos.eu/docs/pb/SRA_Issue2.pdf)
- ISO/IEC [International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission] (2008) *Systems Engineering – System life cycle processes (ISO/IEC 15288:2008)*, Genève, International Organization for Standardization.
- Korsten Peter & Seider Christian (2010) *The world's 4 trillion dollar challenge: Using a system-of-systems approach to build a smarter planet*, Somers (NY), IBM Global Services. (<http://www-05.ibm.com/tr/events/ibmcozumlerzirvesi2011/pdf/GBE03278USEN.PDF>)
- Lane Jo Ann (2006) *COSOSIMO parameter definitions*, Los Angeles, the University of Southern California, Center for Systems and Software Engineering.
- Luzeaux Dominique & Ruault Jean-René [eds] (2008) *Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques*, Paris, Hermès Science Lavoisier (Coll. 'IC2 Traité informatique et systèmes d'information').
- Luzeaux Dominique, Ruault Jean-René & Kam Lui (2008) "Mondialisation et impacts systémiques", in Luzeaux Dominique & Ruault Jean-René [eds] *Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques*, Paris, Hermès Science Lavoisier (Coll. 'IC2 Traité informatique et systèmes d'information'), pp. 333-365.
- Luzeaux Dominique & Ruault Jean-René (2013) *L'ingénierie système*, La Plaine Saint-Denis, AFNOR Éditions (Coll. '100 questions pour comprendre et agir').
- Maier Mark W. (1998) "Architecting principles for systems-of-systems", *Systems Engineering*, vol. 1, n° 4, pp. 267-284.

National Science Foundation (2008 à 2014) *Cyber-Physical Systems (CPS): Program Solicitations*, NSF 08-611, NSF 10-515, NSF 11-516, 12-520, NSF 13-502, NSF 14-542.

Project Management Institute (2009, 4th ed) *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*, Newton Square (PA), Project Management Institute.

Schibi Ori (2014) *Managing stakeholder expectations for project success: a knowledge integration framework and value focused approach*, Plantation (FL), J. Ross Publishing.



La plage de Villerville (détail), Eugène Boudin (1864)