

La simulation comme outil d'aide à la décision pour l'ingénierie des systèmes complexes

Dominique Luzeaux

Département Ingénierie des systèmes complexes
Délégation Générale pour l'Armement
8 boulevard Victor, 00303 Armées
dominique.luzeaux@dga.defense.gouv.fr

Résumé. Les systèmes de Défense sont toujours plus complexes, car intégrant davantage de composantes, hétérogènes et de durées de vie très disparates. 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. Au vu de l'évolution du contexte, il apparaît donc nécessaire de faire évoluer les méthodes d'ingénierie des systèmes et de proposer des outils de modélisation et de simulation au service des architectes, pour l'aide à l'analyse, à la conception, à la réalisation, à l'évaluation, voire à la gestion de configurations et à l'entraînement des systèmes de défense du futur. Cette démarche est en cours au sein du ministère de la Défense, appliquée à plusieurs systèmes de systèmes, comme la défense aérienne élargie. Nous développons ces divers points dans les sections ultérieures.

1. Introduction

Avec l'évolution des technologies et les capacités croissantes d'intégration de ces dernières années, les ambitions des concepteurs se sont développées de plus en plus dans les différents domaines applicatifs. Celui de la Défense offre un terrain fertile, dans la mesure où le paysage économique est particulier : les cycles d'acquisition sont très longs en regard des cycles de maturité technologique des composants élémentaires ; par ailleurs, malgré des contraintes économiques mettant en avant la réduction des coûts élémentaires, les commandes globales font que peuvent être envisagés des niveaux de complexité élevée quant aux systèmes conçus.

Cependant, la contrepartie est que les mises à hauteur ou rénovations de tels systèmes se font à des rythmes lents et dans des enveloppes budgétaires réduites, en comparaison avec l'effort initial consenti. D'où une difficulté inhérente à faire concorder les divers cycles de vie, face à des conditions d'utilisation qui sont par nécessité évolutives, voire inventives.

Pour résumer, le contexte des systèmes complexes de Défense offre une disparité importante au niveau des durées de cycle entre système intégrateur et composants élémentaires (opposant décennies à années, voire semestres), et présente une courbe budgétaire où des pics élevés (les étapes de production) succèdent à de longs plateaux (les

stades de conception et de développement, puis le soutien). Une telle forme de courbe en créneaux est intéressante pour répondre à de grandes ambitions le moment venu, mais elle est a priori pénalisante pour incorporer en continu des évolutions de certaines composantes, en particulier si ces dernières impactent potentiellement sur l'architecture système. À titre d'exemple, signalons les compromis changeants entre éléments matériels (cartes électroniques dédiées...) et logiciels (codes enfouis ou non, noyaux plus ou moins dédiés voire systèmes d'exploitation quasi génériques...) dans les systèmes de télécommunication ou les systèmes d'informatique nomade.

Pour pallier cette situation de fait, des tâches relevant de l'ingénierie du système sont essentielles, et elles se doivent de s'appuyer sur des méthodes et outils adéquats et performants, pour prendre les bonnes décisions d'architecture à un moment donné, et en prévision des alternatives à venir potentielles.

2. L'ingénierie des systèmes

Revenant à l'étymologie de l'ingénierie, 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. C'est la méconnaissance de cette dimension qui a malheureusement conduit à une confusion des genres entre la conduite de projet et l'ingénierie de l'architecture système.

Passons donc en revue les diverses tâches liées à l'ingénierie système, telles qu'elles ont été formalisées dans les différents processus normatifs depuis plusieurs décennies (depuis la MIL-STD-499B jusqu'à plus récemment l'ISO/IEC 15288, dernière norme datant de 2002, en passant par EIA/IS-632, ISO-12207, SE-CMM, voire ISO 9000: 2000), en fait depuis la prise de conscience de l'utilité et de la nécessité d'une telle normalisation suite aux grands projets de la NASA et du département de la défense américain des années 1950 et 1960.

Le processus suit une logique de base qui peut ensuite être déclinée ad libitum au gré des responsabilités individuelles et des métiers particuliers. Cette logique est une boucle à quatre temps. Les deux premiers temps constituent la branche descendante du processus, allant du général au particulier : *spécification* et *conception*. Les deux derniers temps, en sens inverse, constituent la partie ascendante du processus : *intégration* et *validation*.

L'important est de voir dans cette boucle l'aspect dynamique des deux parties constitutives : en reliant les diverses branches descendantes tout en progressant vers le plus grand raffinement de l'arbre produit du système (en d'autres termes, en avançant dans la décomposition de la vision globale à celle des constituants élémentaires), puis en faisant de même pour les branches ascendantes dans l'ordre inverse, on reconstitue la figure classique, voire emblématique, du « V », dont les différentes variations (Y, W, etc.) peuvent être facilement interprétées par une modification de ce mécanisme de relation : mise en parallèle des branches liées à des composants élémentaires pouvant être définis et mis au point indépendamment avant l'intégration finale pour le « Y » ; définition d'un niveau intermédiaire dans l'arborescence à partir duquel on repasse aux branches ascendantes, puis ensuite seulement déroulement de l'arbre restant pour former le W propre à une première

itération de développement incrémental, représenté alors par une spirale plutôt que par une succession de V.

Les différents temps ci-dessus correspondent respectivement à :

l'éllicitation des exigences et leur formalisation, en vue de transformer le besoin en données manipulables au niveau considéré ;

la traduction de ces exigences en une solution au niveau considéré ;

la mise ensemble des « constituants » du niveau considéré, c'est-à-dire les produits du niveau de raffinement suivant ;

la recette de l'étape précédente, c'est-à-dire la reconnaissance du fait que le travail a été bien fait et mérite confiance, pour des traitements ultérieurs.

En fait, il convient d'aller au-delà de la sérialité apparente de ces quatre temps, d'où l'importance de la boucle, qui se traduit par des allers-retours (et des compromis) permanents. La spécification se fait en imaginant les plans de validation, afin de savoir si l'exigence traduisant partie du besoin est réellement une bonne formalisation avec une capacité de garantie vis-à-vis d'un intervenant extérieur. Inversement la validation doit se faire en regard d'une couverture exhaustive de la spécification. On retrouve le même mécanisme entre conception et intégration, c'est-à-dire entre la définition d'une solution technique, et l'assemblage de cette dernière.

Revenons à présent à l'aspect diachronique du processus et à ses implications en termes de responsabilités. Chaque boucle traduit l'expression de besoin de la boucle précédente en exigences et solution vérifiable à son niveau, dont certains éléments seront fournis aux niveaux suivants comme nouvelle expression de besoin, en attente des éléments à intégrer. On voit donc apparaître une espèce de transfert de responsabilité au fur et à mesure du parcours de l'arborescence produit, en particulier en termes de risque. D'où le caractère fondamental de la validation, pour se ressaisir de cette responsabilité et la transférer à son tour.

C'est donc en connaissance de cause que doivent être complétées ces différentes étapes, avec des méthodes et outils les plus homogènes possible, tant pour faciliter les allers-retours rapides en cas de défaut à un niveau, que pour accélérer et paralléliser quand c'est possible certaines tâches (démarche couramment qualifiée d'ingénierie concourante, mais que l'on retrouve légèrement différemment sur le plan conceptuel dans les démarches de développement incrémental en spirale). Cet aspect prendra toute son importance dans les sections ultérieures quand nous évoquerons la simulation pour l'ingénierie et l'acquisition de systèmes complexes. La problématique sera d'autant plus notable que le système devra être considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, ce dernier s'étendant sur de longues périodes, pouvant dépasser temporellement les organisations contractuelles de maîtrise d'œuvre. Au déploiement dans l'espace des solutions de l'arborescence produit, se rajoute le déploiement dans le temps de l'ensemble de ces éléments.

Afin d'illustrer la complexité de ce dernier point, voyons à présent les spécificités liées à la problématique de Défense.

3. Les systèmes complexes de Défense

Le contexte des systèmes qui nous intéressent est marqué par les grandes 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 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 certaines 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. 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 du « 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. La *réutilisation* prend alors toute sa mesure.

Afin d'illustrer les propos précédents, quelques exemples peuvent être utiles : une capacité dont on parle beaucoup ces derniers temps est celle de la défense antimissile balistique. Elle concerne la protection d'un théâtre projeté (pour certains pays est également envisagée la protection du territoire), face à des menaces de missiles. 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, tant en termes du nombre de systèmes potentiellement mis en œuvre, de leur disparité géographique, qu'en termes de données transitant, 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 des missiles dont la trajectoire n'est plus nécessairement 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 chacun de ces systèmes est a priori un programme majeur, c'est-à-dire lourd sur le plan budgétaire, et se doit donc d'être utilisé à plusieurs fins pour être justifiable 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 demi-siècle !). Les logiques individuelles des systèmes, ou tout au moins les logiques de diverses capacités les mettant en œuvre, 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 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 très récents, où indépendamment des positions idéologiques des uns et des autres, la difficulté technique apparaît immédiatement.

Voilà brièvement le défi des systèmes de Défense.

4. La simulation pour l'acquisition

Avant toute chose, fixons la terminologie. La notion de modèle est assez claire pour tout le monde, à savoir une approximation, une représentation ou une idéalisation, de la structure, du comportement ou d'autres caractéristiques de la réalité, qu'il s'agisse d'un phénomène physique, d'un système ou d'un processus (cf. norme IEEE 610.12-1990).

Par contre, la notion de simulation souffre de polysémie : elle recouvre en effet tant les activités de *réalisation* de modèles que celles de *mise en œuvre* de modèles en vue d'un objectif donné. Il apparaît que la simulation permet de reproduire les caractéristiques de l'environnement, des systèmes et de certains comportements. Outre ce côté descriptif, elle permet de contrôler des conditions et des situations, et donc de tester des solutions. Évidemment cela se fait avec une souplesse, une sécurité et un niveau de coût que n'offrent pas les expérimentations réelles (pour mémoire, une société comme MBDA avait besoin de l'ordre de 800 tirs réels pour qualifier des missiles il y a quelque 30 ans, contre 6 tirs réels voire moins aujourd'hui). La simulation apporte donc une aide précieuse entre autres sur le plan des équipements, et en parallèle sur le plan des doctrines d'emploi et de mise en œuvre des forces, ainsi que de l'entraînement.

La modélisation et la simulation est la clé du succès du processus d'ingénierie ; c'est l'outil charnière de travail d'une équipe intégrée multidisciplinaire au service de l'intégration de systèmes complexes, rassemblant les diverses parties prenantes : États-Majors, DGA, industrie. Les différents acteurs (intervenant soit en définition, en évaluation, en fabrication, en soutien...) se doivent de partager les informations et données issues des essais et des

simulations, et doivent également identifier les informations nécessaires en matière d'essais et de simulation. C'est d'ailleurs ainsi que la simulation pour l'acquisition a été définie initialement par le département de la défense américain : véritable processus d'acquisition au service des maîtrises d'ouvrage et d'œuvre, avec utilisation robuste et collaborative des technologies de simulation utilisées de manière cohérente et intégrée tout au long des phases d'acquisition des programmes.

La simulation pour l'acquisition consiste à utiliser et réutiliser des outils de simulation et des technologies disponibles sur l'ensemble de la décomposition fonctionnelle du système, des phases de programme, et entre les divers programmes (en particulier pour les systèmes de systèmes). Elle va de pair avec une bien meilleure gestion des ressources de modélisation et de simulation au cours de l'acquisition : d'un simple soutien ponctuel – dans le temps et l'espace – à l'ingénierie du programme, on passe à un processus cohérent et intégré.

La simulation est ainsi mise en perspective : l'acquisition de systèmes comme partie de systèmes de systèmes. Une telle approche accompagne une révolution dans les affaires militaires, dans la mesure où les procédures d'acquisition sont aujourd'hui focalisées sur l'acquisition de systèmes d'armes individuels. Par ailleurs, utilisant ainsi la simulation, il est possible de repousser certains choix architecturaux ou technologiques bien plus loin dans la vie d'un programme (c'est l'aspect virtuel qui est alors exploité largement).

Détaillons les apports potentiels de la simulation au long du cycle de vie :

contribution à la gestion des exigences via :

l'évaluation des concepts d'architecture globale,

l'analyse des compromis entre capacités opérationnelles, performance, coût,

le choix d'une architecture système optimale,

contribution à la gestion des spécifications via :

la démonstration de faisabilité technique avant la réalisation,

la détermination de la meilleure organisation pour le développement,

la formulation de spécifications vérifiables,

contribution à la gestion de la réalisation via :

l'exploration des diverses options de production afin d'optimiser le choix d'une solution sous respect des contraintes de coût et de délai,

contribution à la gestion des évolutions et à l'intégration dans le système d'ordre supérieur via :

la garantie de cohérence tout au long du cycle de vie du système,

la garantie de réutilisation de partie ou totalité des composants et sous-systèmes au sein d'autres systèmes.

L'ensemble de cette démarche est concrétisé par la mise au point itérative de prototypes virtuels immergés dans des environnements synthétiques réalistes, qui permettent d'une part d'aider à développer une vision partagée du système en genèse, d'autre part de fournir les moyens appropriés à une meilleure compréhension des interactions complexes entre les éléments de configuration du système. Faisant œuvrer ensemble les ingénieurs de conception, de réalisation et d'essai, les prototypes élaborés seront plus facilement réalisés et évalués : d'où une baisse du coût global d'acquisition.

Il est possible de quantifier ce gain, dans la mesure où grâce à la simulation au cours de l'acquisition du système, il est possible de réduire les engagements a priori de dépenses dus aux décisions prises (il est fait ici allusion aux 80-20 de la courbe usuelle de Pareto utilisée en conduite de projet : après 20% de dépenses effectives, on a pris les décisions engageant a

priori 80% du budget global). En effet, la simulation permet de gérer simultanément un ensemble large d'alternatives techniques, pour lesquelles des portions plus ou moins longues du cycle de vie peuvent être déroulées virtuellement, et l'impact d'une décision en amont peut ainsi être mesuré en aval, en termes de performance et/ou de coût. Dans cette optique, la simulation contribue essentiellement à la gestion du portefeuille risque du projet.

L'autre facteur de gain économique réside dans la réutilisation des simulations entre les systèmes au sein d'un métasystème ; cette réutilisation ne doit pas se limiter au simple niveau de briques logicielles, mais doit concerner les exigences, les architectures, les patrons de conception, les modèles d'interfaces, les plans de tests, les données, la documentation... De nombreuses études de coût ont permis ces dernières années d'appréhender ce facteur.

On peut d'ailleurs montrer que la simulation pour l'acquisition, bien menée, est rentable dès le premier incident survenant au cours du projet. De plus, la réutilisation entre projets, bien menée également, permet de dégager globalement des économies du même ordre de grandeur que le montant correspondant à la conception du système englobant les systèmes individuels. Ces premières analyses technico-économiques démontrent l'intérêt de l'investissement, et les premiers chiffres dégagés sur des affaires actuellement en cours, confirment ces analyses théoriques.

5. Infrastructure d'ingénierie et de simulation

Au vu de ce qui précède, les informations clé à partager concernent les exigences et spécifications d'une part, les tests d'intégration et les méthodes et données de validation d'autre part. Ces informations se doivent d'être exhaustives et tracées complètement, quant à leur origine et quant à leur configuration. En effet, c'est via ces deux aspects de traçabilité et de gestion de configuration qu'il est possible d'avoir une vue de l'ensemble du système au cours de sa vie. Partager cette vue revient à accéder aux divers choix architecturaux et technologiques, d'où la maîtrise de l'ingénierie du système. Si l'on voulait adopter une lecture plus mathématique du processus global, on pourrait dire que l'on accède ici à une représentation canonique dont le déploiement correspond aux actualisations possibles du système, avec la capacité à tout instant de reconstruire l'état courant dudit système.

Au-delà de ces informations qui fournissent un ensemble d'éléments discrets permettant de reconstruire le système, il est intéressant d'avoir une vision plus continue de la réalisation de chaque niveau et élément architectural, d'où l'intérêt d'un processus outillé, donnant immédiatement accès à une vision globale et comportementale du système, évidemment sous la condition qu'on ait d'une part une capacité d'intégration verticale (caricaturalement : du métasystème au composant et réciproquement), et horizontale (idéalement : sur l'ensemble du cycle de vie, de la genèse de l'idée de système au retrait de service de ce dernier).

En fait, il s'agit bien ici de définir « le » système d'information correspondant au système complexe considéré, qui a pour vocation de servir de référentiel et de mémoire, et qui pourra être connecté aux autres outils susceptibles d'être utilisés, comme ceux liés à la conduite de projet, à la gestion financière, voire à des systèmes génériques d'aide à la logistique pour contribuer par exemple au soutien...

Forts de cette démarche générale, nous avons défini une *infrastructure d'ingénierie*, construite sur l'utilisation cohérente :

d'un outil de formalisation des exigences, avec les fonctions de traçabilité et de gestion de configuration de ces dernières, ainsi que de connexion à des capacités de simulation en vue d'explorer et de justifier des décisions de spécification ;

d'un outil d'aide aux tests d'intégration et à la validation, faisant le lien immédiat avec les exigences telles que manipulées par l'outil précédent, et là encore la capacité de simulation pour contribuer activement à la validation ;

d'un environnement de travail collaboratif, potentiellement distribué géographiquement, donnant accès aux diverses parties intervenant en amont et en aval de chaque niveau, aux informations relatives à ce niveau, pour faciliter les allers-retours et accélérer potentiellement les cascades entre niveaux ; au-delà de cette fonction d'échange sécurisé et gérant l'information en fonction de son niveau de confidentialité et des droits d'accès de chaque utilisateur, un tel environnement devient la structure clé de dialogue au cours de la vie du système.

Les concepts établis plus haut sur les systèmes de systèmes, et leur ingénierie, se retrouvent naturellement sur le modèle de ces systèmes. L'étalement chronologique ou géographique de leurs différentes composantes est tout aussi valable pour les simulations et simulateurs. Leur coût d'acquisition et leur complexité ne permettant pas de les reconstruire à chaque évolution du système de systèmes, il devient nécessaire de travailler sur leur cohérence (verticale et horizontale), pour disposer d'une capacité de simulation du système de systèmes.

Pour parachever cette mise en cohérence, nous avons défini une *infrastructure de simulation*. Au travers d'une architecture technique, basée notamment sur des standards internationaux, elle offre le niveau d'interopérabilité requis entre les modèles, existants ou futurs, et assure les services nécessaires à la conception de simulations globales et souvent géographiquement distribuées : référentiels techniques et méthodologiques partagés, bibliothèques de modèles et d'outils, gestion de configuration des modèles, soutien au processus de validation... Elle donne aussi accès aux méthodes et outils dits d'ingénierie de la modélisation, dont l'objectif est de fournir des cadres conceptuels et indépendants d'implantations spécifiques, pour concevoir des modèles et plus généralement des simulations en fonction des besoins exprimés, la génération in fine de code relatif à une structure d'accueil particulière se faisant de manière quasi-automatique.

Fidèle au processus itératif défendu plus haut, l'infrastructure de simulation (qui est elle-même un système de systèmes) joue alternativement le rôle de catalyseur et de foyer d'une part de la cohérence technique des moyens de simulation acquis au travers des différents programmes d'armement, d'autre part de l'harmonisation des processus dans le nouveau contexte de l'ingénierie de systèmes complexes.

6. Conclusion

L'ensemble de la démarche esquissée précédemment, concrétisée par les infrastructures d'ingénierie et de simulation – qui sont les deux projets majeurs actuels de la mise en place d'une capacité accrue en vue de la maîtrise de l'architecture des systèmes de défense –, doit être accompagné d'une démarche normative, avec constitution des référentiels méthodologiques adéquats et détermination puis appropriation des standards nécessaires, couvrant l'ensemble de la chaîne des informations à manipuler, depuis les données de

description des systèmes et des modèles, les données de validation de ces divers éléments, les données relatives au processus d'ingénierie du système lui-même, les données (voire métadonnées) des infrastructures.

Vision ambitieuse certes, mais facilitée par les développements très récents en ingénierie du logiciel et des systèmes, ainsi que par les efforts normatifs et le souhait d'une vaste communauté internationale, regroupant industriels, académiques et établissements publics et privés, d'avoir une vision cohérente et intégrée des diverses normes en cours (UML2 pour les données de description de modèles, SysML pour les modélisations de systèmes, ISO10303-AP233 pour les échanges de données de description, MDA pour la transformation de modèles et de métamodèles, ISO 12207 pour le processus d'ingénierie logicielle et ISO 15288 pour le processus d'ingénierie système).

Et c'est à ce prix, avec l'aide de ces outils, méthodes, normes et principes qui le guident et l'assistent dans ses prises de décision, que l'art subtil de l'architecte de système deviendra une science sinon accessible à d'autres, du moins entraînant des prises de risques et des dérives de délais et de coûts bien moins importantes.

Références

- [Bertalanffy, 1993] L. von Bertalanffy. *Théorie générale des systèmes*. Paris, Dunod, 1993.
- [Brill et al, 2000] J.H. Brill, J. Chevallier, J.-L. Merchadou. *Manuel des meilleures pratiques pour le développement des projets spatiaux*. Cépaduès-éditions, 2000.
- [Donnadieu et Karsky, 2002] G. Donnadieu, M. Karsky. *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Éditions Liaisons, 2002.
- [Kam et al, 2002] 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.
- [Le Moigne, 1977] J.-L. Le Moigne. *La théorie du système général*. Paris, PUF, 1977.
- [Luzeaux, 1998] D. Luzeaux. *Towards the engineering of complex systems*. Journées Nîmes 98 sur les systèmes complexes, systèmes intelligents et interfaces, Nîmes, mai 1998.
- [Luzeaux, 2003] D. Luzeaux. *Cost-efficiency of simulation-based acquisition*. SPIE Aerosense Conference on Enabling Technologies for Simulation Science, Orlando, avril 2003.
- [Luzeaux et Lodeon, 2002] D. Luzeaux, P. Lodeon. *Simulation-based acquisition of the Future Air-Land Combat System*, NATO Modeling and Simulation Conference, Paris, octobre 2002.
- [Meinadier, 1998] J.-P. Meinadier. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Éditions Hermès, 1998.
- [Meinadier, 2002] J.-P. Meinadier. *Le métier d'intégration des systèmes*. Hermès Lavoisier, 2002.
- [Morin, 1977] E. Morin. *La méthode : la nature de la nature*. Paris, Le Seuil, 1977.
- Feasibility study on M&S technology in support of SBA*, RTO-TR-064 AC/323(NMSG-003)TP/06, NATO Modeling and Simulation Group, février 2003.
- Prefeasibility study on simulation based design and virtual prototyping*, NIAG-D(2000)9 AC/141(NG-6)D/25, NATO Industrial Advisory Group, septembre 2000.

Modeling and Simulation in Manufacturing and Defense Systems Acquisition. National Research Council, Washington D.C., 2002.

J. Printz, C. Deh, B. Mesdon, N. Trèves. *Coûts et durée des projets informatiques*. Hermès, 2001.

Yatchinovsky. *L'approche systémique pour gérer l'incertitude et la complexité*. ESF Éditeurs, 1999.

Summary

The systems of Defense are increasingly more complex, because integrating more components, heterogeneous and very disparate lifespans. The reduction of the risks in the various phases of an armament program (upstream of feasibility until the startup, even with the withdrawal with the increasing taking into account of environmental constraints) then becomes an essential stake for the control of the costs throughout the life of the program. Within sight of the evolution of the context, it thus appears necessary to make evolve the engineering methods of the systems and to propose tools of modeling and simulation to the service of the architects, for the assistance with the analysis, the design, the realization, with the evaluation, even with the management of configurations and the drive of the systems of defense of the future. This step is in hand within the ministry for the Defense, applied to several systems of systems, like widened air defense. We develop these various points in the later sections.