

# Outils d'ingénierie système utilisés chez Dassault Aviation

## Etat de l'art et Perspectives

**Emmanuel Ledinot**

DASSAULT AVIATION  
DGTD/DPR/ESA  
78 Quai Marcel Dassault  
92552 Saint Cloud cedex  
emmanuel.ledinot@dassault-aviation.fr

**Résumé.** Cet article passe en revue, en suivant les étapes d'un processus normalisé de développement de systèmes, les outils d'ingénierie utilisés chez Dassault Aviation pour le développement des systèmes d'avionique militaire. Conformément au thème général de la conférence, on souligne le rôle des systèmes d'information et des outils d'aide à la décision en conception, avec une attention particulière pour quelques outils à caractère scientifique dont l'utilisation opérationnelle est récente. On s'efforce, en guise de conclusion, de dégager quelques leçons tirées des dix dernières années et des tendances pour l'avenir.

## 1. Introduction

Dans un avion, qu'il soit d'armes ou d'affaires, on distingue deux types de systèmes, tous deux relevant de l'ingénierie système : le système principal chargé de la mise en œuvre de la plate-forme avion et de ses missions, et le système de soutien chargé de maintenir l'avion en conditions opérationnelles.

Si les systèmes principaux et de soutien sont en avionique civile principalement achetés sur étagère avec délégation de DASSAULT AVIATION vers ses fournisseurs, en avionique militaire au contraire les systèmes sont conçus sur mesure pour chaque client. En effet, la recherche de performances maximales des capteurs (radar, guerre électronique, etc.) et des armements pour des missions propres au client export concerné, amène ce dernier à choisir lui-même certains équipements ou emports et à demander à DASSAULT AVIATION de les intégrer sur avion dans un système cohérent, à performances garanties, et sûr de fonctionnement.

C'est donc le développement des systèmes principaux (ou SNA pour Systèmes de Navigation et d'Armes) d'avions de combat tels que le Mirage 2000 et le Rafale qui nécessite l'outillage et les méthodes d'ingénierie les plus avancés. Cet article sera limité à cet aspect des activités d'ingénierie système de DASSAULT AVIATION, qui en comportent d'autres. Son propos sera de montrer l'étendue de la panoplie des outils nécessaires au développement des systèmes d'avionique militaire, en soulignant leurs caractéristiques en rapport avec le thème de cette première Journée d'Etude sur les Systèmes d'Information et l'Aide à la Décision en Ingénierie Système (JESIADIS).

On distinguera les outils "Commercial Off The Shelf" (COTS) dont on citera les noms et les fournisseurs sans en décrire les fonctionnalités car elles sont supposées connues de tout le

monde, des outils développés en interne (appelés "outils métiers") dont on détaillera les fonctions sans citer les noms puisqu'ils sont sans intérêt pour le lecteur.

La liste "à la Prévert" des outils d'ingénierie système utilisés pour le développement des SNA des différentes versions du Mirage 2000 et du Rafale est présentée dans cet article en regroupant les outils par étapes du processus de développement système de référence pour la DGA, à savoir :

- Faisabilité
- Définition
- Développement
- Production
- Utilisation

En réalité, pour chaque programme avion sont définis un processus et une méthode de développement, supportés par des outils dont les modèles de données internes ont été paramétrés en fonction du processus et de la méthode de développement retenus.

## 2. Outils d'études de faisabilité

Les études de faisabilité sont principalement menées par des équipes d'avant-projets quand il s'agit de plates-formes nouvelles, ou par des équipes de développement quand il s'agit des premières études de modification de systèmes existants.

Les outils sont principalement des outils de maquettage rapide et de définition du besoin par réalisation de simulations de principe de comportements SNA.

On trouve également des simulateurs d'évaluation d'efficacité d'un SNA au cours d'une mission, ou d'efficacité d'une flotte d'avions au cours d'une campagne aérienne de plusieurs semaines.

Plus récemment sont apparus les outils de résolution de contraintes.

Les outils de recueil d'exigences pourraient être utilisés dans cette phase, mais ils n'ont été en fait introduits que dans la phase de définition.

### 2.1 Outils de maquettage rapide

Le maquettage rapide a déjà une longue tradition d'existence chez DASSAULT AVIATION dans deux domaines où le recueil du besoin est indissociable de la réalisation d'un comportement dynamique répondant à ce besoin :

*l'automatique* appliquée soit aux lois de commande de vol (stabilisation de l'avion, pilotage, guidage, ..), soit aux lois de commande de certains sous-systèmes tels que le système carburant, le système hydraulique, le système électrique, le système de conditionnement d'air ou le système de freinage et dirigeabilité.

*l'interface homme-système*. Il s'agit d'identifier les concepts de dialogue acceptables par les pilotes (modes et commandes, réticules affichés dans les différents écrans de la cabine). On se préoccupe uniquement du rendu graphique et de la dynamique du comportement de l'interface.

Dans le premier cas, les programmes d'étude en Fortran avec sorties graphiques sur des traceurs ont laissé la place aux modèles MATLAB/Simulink avec simulation graphique

interactive sur poste de travail ingénieur (station de travail UNIX puis PC sous Windows, voire sous Linux dans quelques cas). La simulation est fonctionnelle non temps-réel.

Dans le second cas, la simulation est temps-réel mais le fonctionnel peut être incomplet. Le rendu de la cabine et du visuel extérieur peut avoir plusieurs niveaux de réalisme : depuis les manches et manettes virtuels sur l'écran du PC avec les quatre ou cinq visualisations (tête haute, tête moyenne, tête latérale gauche etc.) également sur un unique écran, jusqu'à une cabine représentative. Le premier type de poste de travail est principalement celui de l'ingénieur de conception qui met au point ses premiers concepts d'Interface Homme Système avionique, alors que le second est réservé à un pilote d'essai qui évalue ces concepts.

L'évolution la plus notable dans ce type d'outillage est l'introduction de la programmation orientée objet pour le développement de ces codes de simulation (C++ et OpenGL) et une refonte complète des moyens matériels de simulation temps-réel (remplacement de calculateurs dédiés de type Encore Computer ou Harris par des stations de travail Silicon Graphics, puis par des PC) réduisant les coûts de plus de 30 à 40%, tout en multipliant par 5 à 10 la puissance de calcul disponible. Cette migration des outils de simulation temps-réel vers les PC a permis de profiter de la richesse de cet environnement en outils matériels et logiciels.

## 2.2 Simulateurs d'évaluation d'efficacité

On distingue les objectifs de performance (par exemple rayon d'action, marge de manœuvre etc.), qui sont contractuels, des objectifs d'efficacité d'un système (par exemples sa survivabilité, sa létalité, sa disponibilité) qui ne sont pas contractuels parce que difficiles à mesurer.

Avant de lancer un avant-projet de système, ou une nouvelle version de système, il est important de se donner des objectifs d'efficacité du SNA à l'étude qui le rendent compétitif par rapport à ceux affichés par les systèmes des avions concurrents (identification du meilleur rapport coût/efficacité).

Plusieurs simulateurs sont utilisés pour identifier les performances nécessaires à l'obtention d'un bon niveau d'efficacité. Il y a des simulateurs de niveau engagement qui permettent de simuler les missions d'une plate-forme dans un environnement tactique (ailiers, AWACS, hostiles etc.). Ces simulateurs sont en général spécialisés par type de mission (combat Air-Air, pénétration basse altitude etc.). Il existe également un simulateur de niveau campagne aérienne qui permet d'évaluer sur plusieurs semaines l'efficacité d'un dispositif ami contre un dispositif ennemi.

Ces simulateurs sont :

- le simulateur ICARE conçu pour être générique, est dédié au combat Air-Air multi plates-formes, multi-cibles. Financé par la DGA, il a été développé dans le cadre d'une collaboration entre DASSAULT AVIATION, MATRA et THALES.
- le simulateur MESAPACE évalue la survivabilité des avions dans les missions de pénétration à Basse Altitude. Il a été développé par DASSAULT AVIATION et THALES.
- le simulateur de théâtre opérationnel SECA a été développé par DASSAULT AVIATION.

## 2.3 Outils de résolution de contraintes

Plus récemment encore, et d'une façon qui peut être encore qualifiée de R&D, la modélisation des *performances* et des *ressources* d'un SNA sous forme d'un système d'équations et d'inéquations mathématiques traité par un solveur de contraintes numériques, a été introduite en phase d'avant-projet système. Les performances sont par exemple les portées de détection ou de tir, les précisions ou efficacités de tir, la précision de localisation, de recalage de position, etc. Les ressources sont les capteurs, les calculateurs, les armements et leurs caractéristiques de dimensionnement (watts consommés, frigories requises, CPU, mémoire, bande passante des réseaux de bord ou des liaisons de données, etc.)

La modélisation par ce type d'approche peut être délicate car elle nécessite de ramener une performance résultant de l'état final d'un comportement dynamique complexe sur une certaine durée (par exemple le comportement avion/système/ arme/cible sur plusieurs minutes) à un ensemble d'équations et d'inéquations algébriques pouvant comporter n'importe quelle fonction mathématique, mais pas d'opérateurs de dérivation ou d'intégration (les équations différentielles pourraient être traitées mais ne le sont pas pour le moment).

Le solveur de contraintes réduit les domaines de valeurs admissibles des variables du problème posé par des techniques de propagation d'intervalles sur des nombres réels. On peut donc avec ce type d'outil :

- calculer les fourchettes de performances accessibles par le système une fois fixées les fourchettes des paramètres de dimensionnement de ses ressources. Les outils classiques de dimensionnement et d'analyse de performance (codes Fortran avec études de sensibilité) rendent ce service depuis longtemps.
- calculer les fourchettes de ressources à allouer pour atteindre (si possible) des plages de performances fixées. Ce fonctionnement "à l'envers" (les effets étant fixés, calculer les causes qui les produisent, ce qu'on appelle "problèmes inverses" en calcul scientifique), est par contre plus original et d'un grand intérêt pour un bureau d'étude.
- plus généralement, on peut, avec un solveur de contraintes numériques, étudier les "taux d'échange" entre les variables de dimensionnement d'un système et ses variables de performance. Par taux d'échange on veut signifier les degrés de liberté dans la conception (représentés par la largeur des intervalles calculés par le solveur) et les influences réelles des variables de conception les unes sur les autres (dépendances causales entre variables du modèle, calculées également par l'outil).

Pour en savoir plus sur ce sujet et cet outil développé en interne avec des collaborations extérieures, se reporter à [Kou2002], [Fischer2002], [Zablitz2001]. Il s'agit là d'un outil d'aide à la décision général applicable à l'ingénierie système d'une façon qui semble prometteuse, mais dont la portée réelle reste à cerner compte tenu des difficultés de modélisation évoquées et du manque de recul sur son utilisation.

### 3. Outils de définition

La phase de définition, au sens du référentiel de processus DGA, comporte :

- l'analyse fonctionnelle du système
- les choix d'architecture
- les choix de compromis coût-efficacité sur les points durs
- les choix de coopérants
- la hiérarchie de documents de spécification préliminaire

Les outils utilisés à ce stade chez DASSAULT AVIATION sont d'abord des outils de niveau système, pour capturer les exigences, pour effectuer une analyse fonctionnelle gérée en configuration, puis des outils d'analyse logicielle pour structurer les applicatifs mission intégrés dans les équipements à logiciel prépondérant que sont les Calculateurs Principaux (CP) des Mirage 2000, les Calculateurs de Mission (CM) des premières versions du Rafale et les Ensembles Modulaires de Traitement de l'Information (EMTI) qui équipent le Mirage 2000-9 et le Rafale à partir du standard F2.

#### 3.1 Outils de recueil d'exigences et de traçabilité

Ne pas confondre besoin et solution partout où c'est possible est clairement apparu comme un enjeu majeur en ingénierie système. Le recueil d'exigences et l'analyse outillée d'un texte de Cahier des Charges ou d'Expression de Besoin en amont des premières spécifications de solution de niveau système ou logiciel, ont été introduits dans les processus de développement de systèmes d'avionique militaire de DASSAULT AVIATION à la fin des années 90.

L'outil de recueil d'exigences utilisé est un outil COTS. Il s'agit de DOORS de la société Telelogic. L'utilisation qui en est faite est standard, avec néanmoins une paramétrisation de l'outil pour prendre en compte les particularités du processus, et tirer parti du lien avec Rational Rose (par Roselink) utilisé en analyse logicielle.

Les documents rassemblant les exigences de niveau système sont appelés Principes d'Utilisation Fonctionnelle (PUF).

#### 3.2. Outils d'analyse fonctionnelle système

L'analyse fonctionnelle de plus haut niveau, dont le périmètre est le système d'avionique dans son ensemble, a été faite dans les années 80 et 90 avec un outil supportant la méthode SADT. Cet outil est propriétaire DASSAULT AVIATION. Il est composé d'un diagrammeur de schémas-blocs flots de données, couplé à une base de données. L'analyse fonctionnelle n'est pas "pure" au sens où l'outil permet également de définir les équipements de l'architecture matérielle et de projeter les modules fonctionnels et les informations échangées entre ces modules sur les ressources matérielles qui les supportent. En effet l'architecture matérielle, qui en théorie devrait être définie *après* l'analyse fonctionnelle, est en pratique toujours une donnée a priori qui précède l'analyse fonctionnelle et la conditionne de façon prépondérante. L'outil propriétaire comporte également une gestion de version intégrée.

## Outils d'ingénierie système utilisés chez Dassault Aviation

Les spécifications de niveau système qui sont rédigées dans cette étape sont appelées Définition Fonctionnelle Projetée (DFP). L'outil permet d'éditer des *chaînes fonctionnelles*, c'est à dire des vues partielles de l'analyse fonctionnelle ne présentant que les informations et les traitements pertinents pour réaliser un certain service rendu par le système.

Pour donner un ordre de grandeur, sur un SNA Rafale, il y a au plus haut niveau de décomposition de l'ordre de 100 modules entre lesquels sont échangés environ 20.000 informations fonctionnelles projetées sur des moyens de communication numériques, voire analogiques. Un système d'information, autrement dit un véritable système de gestion de base de données, est donc requis pour gérer l'analyse fonctionnelle système.

Actuellement, en concertation avec THALES Systèmes Aéroportés, est introduite dans les processus Mirage 2000-9 et Rafale une DFP reposant sur une utilisation des diagrammes de séquences (type Message Sequence Charts) de la méthode UML, à l'aide de l'outil Rational Rose. Les barres des diagrammes de séquences représentent les équipements du SNA et les modules de plus haut niveau de l'applicatif mission.

La représentation sous forme de diagrammes de séquence (correspondant à des scénarios ou cas d'utilisation du système) a l'avantage de présenter un caractère *dynamique* que n'ont pas les diagrammes SADT, et de déboucher naturellement sur un plan de tests système. A l'inverse le contrôle de la cohérence des interfaces entre équipements est beaucoup plus difficile à faire avec un outil supportant UML qu'avec un outil supportant SADT.

### 3.3. Outils d'analyse logicielle

Entre le début du développement du système du Rafale C en 1989 et la qualification du standard F3, il se sera écoulé 18 années.

La gestion des modifications est un point critique de l'exercice de la maîtrise d'œuvre dans le développement d'un système.

La gestion des évolutions est faite à trois niveaux :

- au niveau *avion*, avec un système d'information reposant sur Product Manager d'IBM. C'est l'outil des équipes programmes.
- au niveau *SNA*, avec l'outil SmarTeam de DASSAULT SYSTEME qui fait à la fois la gestion des évolutions et des configurations. Il sert de face avant à l'atelier système en donnant accès à tous les éléments de définition d'un SNA et tous les outils qui les contiennent, en explorant un arbre de type arbre produit. Il est utilisé sur les programmes Mirage 2000-9 et Rafale.
- au niveau *logiciel*, avec l'outil Synergy (anciennement Continuus) de la société Telelogic, qui n'est utilisé que sur le programme Mirage 2000D.

De l'ordre de 300 fiches de modification de niveau système sont éditées par an et par SNA de la classe Mirage 2000 ou Rafale.

L'outil DOORS est employé pour définir la traçabilité en général, celle entre les fiches de modification et les exigences fonctionnelles modifiées dans les documents de type PUF en particulier.

## 4. Outils de développement

La phase de développement du référentiel DGA recouvre la conception détaillée à savoir :

- la définition des composants matériels du système
- le développement des logiciels
- la définition des contrats de sous-traitance
- la définition de la maintenance du système
- l'optimisation du système

Les outils d'ingénierie système et encore plus ceux d'ingénierie logicielle utilisés dépendent de façon essentielle de la politique de sous-traitance adoptée et des partenariats techniques entre l'industriel spécificateur et l'industriel réalisateur. DASSAULT AVIATION a une politique de sous-traitance qui dépend principalement du niveau de criticité, au sens de la sûreté de fonctionnement, du sous-système, de l'équipement ou du logiciel considéré.

En règle générale, les calculateurs contenant du logiciel classé Critique Mission (niveau C au sens DO178), et le logiciel lui-même, sont sous-traités.

A l'inverse, le matériel (calculateurs, servo-commandes, ...) et le logiciel du Système de Commandes de Vol (SCV) est réalisé en interne.

Entre ces deux extrêmes, pour certains équipements contenant du logiciel critique (Calculateur d'Élaboration de Trajectoires du Rafale par exemple) ou pour certains logiciels spécifiés dans le détail par DASSAULT AVIATION, une spécification formelle exécutable assortie d'un ensemble de tests est l'interface entre le systémier et l'équipementier réalisateur du calculateur et du logiciel embarqué.

Quelle que soit la politique de sous-traitance adoptée, DASSAULT AVIATION assure les tests d'intégration des systèmes au sol sur bancs, puis au sol sur avions, puis en vol, aux Essais en Vol d'Istres. Sur ce site sont installés une trentaine de bancs d'intégration système.

La continuité du processus entre la phase de spécification et celle de réalisation, forte quand il y a génération automatique de la seconde à partir de la première, faible quand il y a réalisation manuelle, est essentielle pour la réduction des coûts et des délais de développement.

L'effort de test, prépondérant dans les coûts, ne peut être réduit que si des tests peuvent être faits au niveau fonctionnel dès le stade de la spécification, puis peuvent être rejoués automatiquement sur la réalisation.

La mise en place de plateaux de conception communs DASSAULT AVIATION et THALES Systèmes Aéroportés à la fin des années 90 sur les programmes Mirage 2000-9 et Rafale, a eu pour but de mettre en place des processus de développement aussi continus que possible.

### 4.1 Outils de spécification détaillée

Ils sont principalement utilisés pour la conception détaillée des réseaux et de certains logiciels des SNA. Les aspects matériels au sens mécanique sont traités par le logiciel de CAO CATIA.



#### ***4.1.1 Spécification détaillée des réseaux***

La définition des réseaux numériques et électriques assurant la communication entre tous les équipements d'un système est une responsabilité clé de l'intégrateur. La schématique électrique est définie avec un module spécialisé du logiciel CATIA de DASSAULT SYSTEMES

La définition des trames de messages sur les différents réseaux (deux sur les Mirage 2000, sept sur les Rafale) nécessite trois outils développés par DASSAULT AVIATION :

- un outil que l'on peut qualifier d'outil de raffinement de données. Il permet de passer de la représentation SADT abstraite des informations de l'analyse fonctionnelle système à leur représentation concrète en terme de formats de messages bus (digibus, 1553 ou 3910). A titre d'exemple, au niveau fonctionnel système on parle du vecteur d'état avion comme d'une seule information, dont on ne connaît pas le contenu réel ni le type informatique alors qu'au niveau trames réseaux cette même information pourra être représentée par deux messages de 12 octets chacun, l'un contenant les six paramètres de position (latitude, longitude, altitude et les trois angles d'Euler) et l'autre les trois vitesses correspondantes. Sur un Rafale, on passe ainsi des 20.000 informations fonctionnelles abstraites à environ 100.000 informations numériques élémentaires telles que latitude avion ou vitesse de roulis. Cet outil permet de définir la correspondance (raffinement/abstraction) entre les interfaces fonctionnelles des équipements, et leurs interfaces réseaux. Dans les cas favorables il permet d'automatiser cette définition.
- un système d'information (base de données relationnelle avec interface métier) permettant de stocker, consulter, modifier la définition des messages réseaux échangés entre les équipements, dont on vient de voir qu'ils sont nombreux.
- un outil d'aide à l'ordonnancement temporel des messages reposant sur un solveur de contraintes du commerce (Ilog OPL Studio). Dans le cas du Mirage 2000 où les réseaux digibus et 1553 sont saturés (5% de bande passante restante environ), cet outil joue un rôle important pour exploiter les bus au maximum. Pour le Rafale, il est capable d'ordonnancer environ 2500 messages périodiques sur 7 bus synchronisés comportant 4 fréquences, en satisfaisant environ 200 contraintes de précédence, équilibrage des cycles, etc. Le temps de calcul est inférieur à 3 minutes sur un PC ordinaire. En cas d'infaisabilité, l'ingénieur concepteur de trames peut choisir le groupe de contraintes d'ordonnancement qu'il relâche. On a là un outil d'aide à la décision en ingénierie système, couplé à un système d'information.

#### ***4.1.2 Spécification détaillée de logiciels***

La maîtrise de certains logiciels est également un enjeu technique et économique essentiel pour l'avionneur, tout particulièrement quand la sûreté de fonctionnement de l'avion est en cause et quand la connaissance intime de la structure de l'avion, ainsi que de son comportement mécanique et aérodynamique sont nécessaires pour écrire un logiciel sûr. C'est le cas pour les logiciels du SCV Rafale qui sont entièrement réalisés en interne.



Sous la pression de la réduction des coûts, d'importantes modifications de processus et d'outillage sont en cours depuis environ cinq ans pour simplifier le développement des logiciels de commandes de vol et obtenir des gains de productivité de 30% ou plus, tout en maintenant un niveau de qualité égal ou supérieur à celui obtenu avec les méthodes précédentes, et ceci alors que la complexité des applications à développer ne cesse de croître.

La génération de code embarqué directement à partir de la spécification MATLAB/Simulink en utilisant Real Time Workshop de la société The MathWorks, convenablement paramétré, a été expérimentée. De même la spécification formelle graphique d'automates avec génération de code embarqué et preuve formelle de propriétés de sûreté en utilisant le produit ESTEREL Studio de la société ESTEREL Technologies, a été introduite dans le processus de développement des logiciels de commandes de vol.

A terme, il s'agira de passer directement de la spécification fonctionnelle au code embarqué. En effet le processus actuel de développement des logiciels critiques des SCV impose la réalisation d'un logiciel intermédiaire de simulation temps-réel avec obligation, pour atteindre le niveau de sûreté requis, de démontrer que sur 250 heures de simulation explorant tout le domaine de vol de l'avion, la spécification ESTEREL-MATLAB, le code de simulation temps-réel, et le code embarqué dans le SCV, ont un comportement équivalent.

Si le code de simulation temps-réel et le code embarqué deviennent un même code unique généré *automatiquement* à partir de la spécification ESTEREL-MATLAB, des gains de productivité entre 20 et 30% sur l'ensemble du processus sont atteignables et ont commencé d'être observés. Pour couvrir l'élimination des erreurs logicielles non fonctionnelles (overflows, variables non initialisées, débordements de tableaux etc.), l'utilisation d'un analyseur statique de code C tel que celui de la société Polyspace Verifier est indispensable. Une évaluation de cet outil sur l'ensemble de l'applicatif commandes de vol Rafale (environ 50.000 lignes de C) a été effectuée. Cet outil va également être introduit dans le processus de développement.

Il existe deux autres logiciels spécifiés formellement par DASSAULT AVIATION. Leur intégration dans les calculateurs embarqués (Calculateur d'Elaboration de Trajectoire et Boîtiers Générateurs de Symboles, puis EMTI) est sous-traitée à THALES Avionique. Il s'agit :

- des logiciels graphiques spécifiés par un outil métier, l'Atelier Logiciel Graphique (ALG), développé en coopération entre DASSAULT AVIATION et THALES Avionique. Cet outil métier permet de faire une spécification formelle des logiciels graphiques, de la tester, puis de générer automatiquement le code embarqué.

- le logiciel de la Fonction Technique Trajectoire (vol à très basse altitude du Rafale), spécifié dans un sous-langage restreint de C.

Dans les deux cas, le logiciel spécifié formellement est testé chez DASSAULT AVIATION. Dans le premier cas, le processus est continu, avec préservation des tests : le code embarqué est produit automatiquement à partir de la spécification testée.

Ce sont des logiciels de la classe 100 mille lignes de code.

Pour tous les autres logiciels, non critiques, des CP, CM ou EMTI Mirage 2000 ou Rafale, la spécification détaillée de logiciel fournie par DASSAULT AVIATION à THALES Systèmes Aéroportés reste majoritairement en langage naturel, en dépit de tentatives à la fin des années 90 pour mettre en place un processus s'appuyant sur la spécification formelle et la génération de code, analogue à ceux évoqués précédemment.

Pour situer quantitativement la masse de logiciel concernée, la spécification du logiciel du CM Rafale fait de l'ordre de 7500 pages de français écrites en boucle ouverte, dont sont

dérivées en grande partie à la main 700.000 lignes d'Ada, en cours de portage semi-automatique en C++.

## 4.2 Simulateurs d'évaluation de performance

L'ingénierie des systèmes d'avionique militaire nécessite d'autres outils que les outils de maquettage comportemental, de définition d'architecture, ou de conception détaillée de réseaux et de logiciels.

Comme ces systèmes sont vendus avec des performances garanties, les simulations d'évaluation de performance jouent un rôle important.

La caractéristique des avions militaires est d'avoir des performances dépendant d'un grand nombre de facteurs. Prédire ces performances nécessite des modélisations à différents niveaux, dans différentes disciplines scientifiques et parfois pour des classes particulières de missions (Air-Air, Air-Sol). Il en résulte le développement de plusieurs simulateurs.

Prenons juste un exemple, celui de la survivabilité de l'avion en pénétration basse altitude. Elle dépend de la détectabilité de l'avion dont la quantification nécessite des calculs physiques complexes de signatures électromagnétiques et infra-rouges (SER et SIR), et de simuler la dynamique de l'avion dans son contexte (calculs d'intervisibilité en fonction du relief du terrain, de l'attitude de l'avion, et des performances des radars Sol-Air).

Ces outils de simulation font partie intégrante de l'outillage nécessaire à l'ingénierie des systèmes d'avionique militaire et participent à l'aide à la décision en conception.

Quand les performances du SNA en tant que système informatique temps-réel et non plus en tant que système d'armes, sont à évaluer il arrive que DASSAULT AVIATION utilise des simulateurs du commerce tels que SES Workbench ou Modline. Le dimensionnement des réseaux des calculateurs est effectué avec la participation de THALES Systèmes Aéroportés et de THALES Avionique.

Enfin la sûreté de fonctionnement et la disponibilité d'un système d'avionique militaire sont également des performances contractuelles importantes qu'il faut pouvoir calculer. Les méthodes et les outils dans ce domaine évoluent peu. La sûreté de fonctionnement repose toujours sur des modèles simples (voire simplistes) à base d'arbres de défaillance ou d'AMDEC. Les outils sont développés en interne et utilisent des contributions de laboratoires de recherche. La production et la représentativité des arbres de défaillances pour des systèmes à logiciel prépondérant comme les systèmes d'avionique militaire peut encore progresser. Mais il faut pour cela des développements d'outillage coûteux dont le retour sur investissement est difficile à établir.

## 4.3 Outils d'intégration

Enfin on ne peut parler de l'outillage de développement de SNA de DASSAULT AVIATION sans mentionner les bancs d'intégration du site d'Istres.

L'intégration est effectuée en trois étapes :

- le cœur système (EMTI) livré par THALES est d'abord testé dans un centre de simulation hybride situé à Saint Cloud près des ingénieurs de conception. Les capteurs du SNA et l'environnement tactique sont simulés.

- le cœur système et les capteurs réels sont ensuite testés à Istres sur un banc d'intégration. L'environnement tactique reste simulé.
- la dernière étape consiste à faire voler le SNA sur un avion de développement. La mise au point préalable des capteurs se fait en vol sur des avions banc d'essais.

Ces moyens d'essais nécessitent également le développement d'un outillage lourd dont on donne, à titre d'illustration non exhaustive les exemples suivants :

- simulateurs d'environnement et d'armement pour le Rafale.
- outils d'acquisition intégrale digibus
- simulateurs d'environnement avion fourni à THALES pour la mise au point du radar RDY
- etc.

## 5. Perspectives

L'ingénierie des systèmes d'avionique militaire nécessite un outillage lourd pour la définition, l'aide à la conception, l'évaluation des performances et de l'efficacité de ces systèmes en contexte opérationnel, que ce soit au niveau engagement (vu d'un pilote pendant une heure ou deux) ou au niveau campagne aérienne (vu d'un Etat Major pendant plusieurs semaines).

Les évolutions notables de l'outillage d'ingénierie système au cours des 10 à 15 dernières années chez DASSAULT AVIATION sont :

- la mise en place avec nos coopérateurs et sur financements DGA d'outils industriels de conception et d'évaluation de la composante discrétion électromagnétique et infrarouge des systèmes de combat aéroportés.
- la refonte complète des salles de simulation et d'acquisition temps-réel en remplaçant du matériel spécialisé par du matériel banalisé.
- le développement d'un calculateur d'Avionique Modulaire Intégrée à 18 modules de traitement remplaçant à lui seul 5 calculateurs du Rafale.
- l'introduction progressive et partielle des méthodes orientées objet dans la spécification et la programmation des logiciels embarqués et des logiciels de simulation.
- l'introduction ponctuelle mais à forte valeur ajoutée d'outils issus de la recherche et parvenus à maturité industrielle tels que les solveurs de contraintes, les ateliers pour automaticiens ou les outils de spécification et de vérification formelle de logiciel.
- l'introduction de nombreux outils COTS en remplacement ou en complément d'outils développés en interne, en fédérant leur paramétrisation et leur intégration dans un atelier par la définition de processus outillés.
- la refonte des processus et des méthodes avec la mise en place de plateaux de conception répondant aux exigences de l'ingénierie concourante.
- l'abandon de la constitution d'un atelier système par intégration forte des outils autour d'une base de données unique et/ou via un Object Request Broker (ORB)

à la norme CORBA, au profit d'un couplage faible par échanges de fichiers entre outils.

Prédire quelles vont être les évolutions notables des dix prochaines années est un exercice périlleux. Il ne semble pas qu'il y ait de révolution en perspective, en provenance de la recherche notamment. Par contre il y a encore des gains de productivité accessibles partout où les conflits d'intérêt entre coopérants n'entravent pas la mise en place de processus continus.

Ces gains de productivité, notamment sur l'évolutivité et le test des logiciels embarqués, peuvent s'obtenir par une amélioration continue de l'utilisation des outils commerciaux ou de recherche existants, par une amélioration continue des outils eux-mêmes, et, avant tout, par l'emploi d'ingénieurs qualifiés et expérimentés en développement logiciel maîtrisant convenablement cet outillage. L'outil à lui seul ne fait ni l'ouvrier ni la qualité de l'ouvrage quand il s'agit de *créer* des mécanismes analogues à de l'horlogerie de précision.

## 6. Conclusion

L'ingénierie des systèmes informatiques en général, et celle des systèmes d'avionique militaire pour avions de combat en particulier, est une ingénierie lourde dont la maturité scientifique et industrielle devient progressivement comparable à celle de sa sœur aînée, l'ingénierie des systèmes mécaniques couplée au calcul scientifique. On peut même penser que les notions de maquette numérique étendue et de base de données produit (type Virtual Product Manager de DASSAULT SYSTEMES et DELMIA), qui sont centrales en CAO mécanique, vont progressivement incorporer la représentation des systèmes informatiques qui contrôlent les systèmes mécaniques représentés dans ces systèmes d'information.

Les développements à effectuer sont lourds et prendront bien une dizaine d'années, mais l'enjeu d'un système d'information unique présentant différentes vues métier partielles et *cohérentes* est fondamental *aussi* pour l'ingénierie des systèmes informatiques embarqués. La sûreté de fonctionnement, qui construit aujourd'hui "à la main" ses propres modèles à partir de données de définition éparées devrait être, à terme, une des grandes bénéficiaires d'un modèle fédérateur unique en ingénierie système.

## Références

- [Zablit et Zimmer, 2001] P. Zablit, L. Zimmer , Global Aircraft pre-design based on constraint propagation and interval analysis, *CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimization*, page 77-86 25-26 june 2001 Maternushaus Köln, Germany
- [Zimmer, 2001] L. Zimmer, Présentation du projet CO2 *Journées S3P* 15,16 novembre 2001, Bayonne(France).
- [Fischer et al, 2002] X. Fischer, J.P. Nadeau, L. Zimmer, P. Zablit, Outil d'aide à la décision en Conception Inversée Intégrée. *Colloque IPI ; Concevoir et Organiser la Performance Industrielle*, Autrans (France), Janvier 2002.
- [Fanmuy, 2001] G. Fanmuy, Gestion des exigences: vers des processus d'ingénierie système intégrés. Retour d'expérience *Congrès AFIS2001:26-28 juin*
- [Caille, 2001] L. Caille, ODILE: un processus outillé. *Congrès AFIS2001:26-28 juin*

- [Kou, 2002] P. Kou, Use of constraint programming techniques for systems, *EUSEC 2002 21-24 mai et INCOSE 2002 août 2002*)
- [Taisne, 2002] F. Taisne Developing a new pre-development process *EUSEC 2002 21-24 mai*
- [Remilleux, 2001] Y. Remilleux L'utilisation de la simulation en essais. *Revue d'Electricité et d'Electronique No6 p25à27 06/06/2001*.

## Summary

This paper gives an overview of the system engineering tools at work at Dassault Aviation supporting the design of military avionics systems and software. These tools are presented in conformance with the main steps of a typical system development process. We put more emphasis on information systems supporting design decision making, and on innovative scientific tools that recently turned out to be effective. We finish with a few lessons learned during the last ten years, and try to sketch what will be the main stream in system engineering tools for the next ten one.