

LE CARACTERE PERMANENT ET ITERATIF DES INTERACTIONS ENTRE LES ELEMENTS D'UN SYSTEME DANS UNE OPTIQUE INDUSTRIELLE

Patrick FARFAL

PatSys, Conseil et formation en Systèmes

25 rue Jean Leclaire 75017 PARIS - France

Phone/Fax:+33 (0)1 42 52 89 60 - Mob.:+33 (0)6 72 14 82 40

Email: pfarfal.patsys@sfr.fr

* * *

Résumé :

Les définitions généralement admises du « système » mettent avec raison l'accent sur l'interaction dynamique entre ses éléments. Cette propriété caractéristique est en fait ambivalente et susceptible d'une double interprétation : l'une scientifique, classique (échanges de flux : données, énergie, matière), l'autre industrielle, complémentaire (caractère évolutif et itératif des interactions).

Des modifications importantes, des retards significatifs, des échecs, sont imputables à la mauvaise caractérisation d'interactions pourtant inhérentes à la notion de système.

A partir de cas réels, on se propose de développer l'interprétation industrielle, en mettant en lumière les interactions mal caractérisées, donc sources de risques accrus, voire identifiées tardivement et potentiellement causes d'échecs.

L'exposé est illustré par plusieurs exemples tirés des domaines militaire et spatial.

Mots-clés : interaction dynamique, caractérisation, itération, industrie

Abstract:

Commonly used definitions of a system rightly emphasize the dynamic interactions between its constituents. In fact this characteristic property is ambivalent and liable to a double interpretation: one, scientific, usual (flow exchanges: data, energy...), the other industrial, additional (evolutionary and iterative feature of the interactions).

Important changes, significant delays, failures, can be attributed to a poor characterization of interactions, although inherent to the concept of system.

From actual cases, the paper intends to develop the industrial interpretation, by highlighting poorly characterized interactions, which may result in increased risks, or, even, lately identified interactions, which are possible sources of failures.

The presentation is illustrated with several examples from military and space fields.

Keywords: dynamic interaction, characterization, iteration, industry

* * *

0. Introduction

Un système est par essence composé d'éléments en interaction dynamique. On insiste généralement sur le grand nombre d'interactions qui définit le degré de complexité d'un système, lequel le rend plus ou moins difficile à maîtriser. Afin, entre autres, de maîtriser ces interactions, dans les phases de conception, réalisation, validation, dans un but de réduction des risques, les ingénieurs ont inventé, développé (depuis longtemps), théorisé (depuis peu) les méthodes et les outils de l'Ingénierie Système.

L'histoire des grands systèmes militaires et spatiaux montre que les interactions entre les éléments d'un système sont de nature essentiellement évolutive, et cette évolution est permanente au long de la vie des systèmes : c'est l'*un des sens* que l'on peut donner à la notion d'« interaction dynamique ». On est alors conduit à faire une distinction (non disjonctive) entre deux interprétations de la propriété caractéristique des systèmes d'être constitués d'éléments en interaction dynamique : d'une part, les éléments d'un système échangent des flux, de données, de matière, d'énergie (interprétation scientifique, classique, naturelle) ; d'autre part les échanges entre les éléments d'un système, tout en conservant la même nature, peuvent ne pas être caractérisés de la même façon au début du programme et à la fin (caractère changeant et itératif), voire dans les cas extrêmes ne pas être caractérisés du tout au début et être découverts très tardivement (interprétation industrielle).

C'est la deuxième interprétation du terme « dynamique » : le défaut éventuel de caractérisation d'une interaction, conduisant à un constat tardif de non-conformité, donne en effet un nouveau sens au caractère dynamique des interactions.

Précisément, malgré l'existence de méthodes et d'outils d'Ingénierie Système largement éprouvés et répandus, il n'en reste pas moins que des modifications importantes, des retards significatifs, des échecs, sont imputables à la mauvaise caractérisation d'interactions pourtant inhérentes à la notion de système.

Plusieurs cas réels permettent de développer l'interprétation industrielle : des exemples tirés des domaines militaire et spatial illustrent des cas de caractérisation tardive des interactions, source de risques accrus, voire d'identification tardive de ces interactions, potentiellement causes d'échecs.

1. Nature des interactions dans un système

Une définition déjà ancienne du système, proposée par Joël de Rosnay (réf. [1]) et généralement admise, est la suivante : « Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but. » Cette définition lapidaire a l'immense mérite de condenser en une formule ramassée, où tous les mots comptent, l'essence de la définition d'un système, tout en prêtant le flanc à une critique que son auteur reconnaît lui-même, la définition étant trop générale pour être vraiment utile ; remarque reprise par Gérard Donnadiou et Michel Karsky (réf. [2]) : les définitions des systèmes « sont peu opératoires pour l'action... La richesse du concept de système ne se dévoile en effet que par l'utilisation qui en est faite. »

L'ambivalence de l'expression « interaction dynamique », évoquée dans l'introduction, illustre parfaitement la remarque précédente.

D'abord, le terme « dynamique » a dans cette définition un rôle fondamental : un système dans lequel les interactions entre éléments seraient statiques serait un système mort (même dans une construction, immeuble ou cathédrale, par essence statique, les pierres ou les poutres de béton travaillent). Nous retrouvons là l'interprétation scientifique et traditionnelle : les structures des sous-ensembles d'un aéronef, d'un lanceur spatial, travaillent, et travaillent les unes par rapport aux autres (accélération, vibrations, flexions...), plus ou moins intensément selon les phases de vol ; les équipements électroniques de bord échangent des données qui par nature évoluent dans le temps, etc.

On est conduit à une deuxième interprétation du terme « dynamique » lorsque l'on aborde :

- les notions de « boucles système » : un système complexe étant par définition pluridisciplinaire, chaque spécialité itère ses calculs, ses dimensionnements, ses processus, autant de fois que nécessaire, en prenant soin de valider périodiquement la cohérence de ses données d'entrée avec les autres spécialités ; il y a bien là un aspect *dynamique* : c'est au long du cycle de conception-réalisation-validation que se manifeste le caractère évolutif des interactions (voir fig.1)

- les causes de difficultés d'aboutissement (modifications, retards), voire d'échecs, lorsque les « boucles système » ont mal fonctionné ou ont été inexistantes.

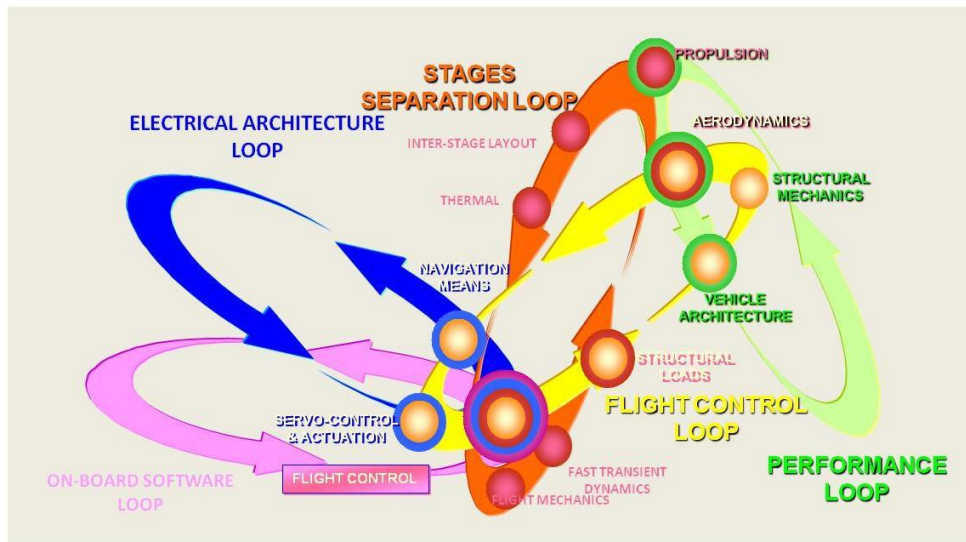


Fig.1 : Les « boucles système » (réf. [3])

Le dernier point exprime qu'en dépit des nombreuses itérations des « boucles système », certaines interactions peuvent échapper à une caractérisation pertinente. Pire, certaines « boucles système » peuvent même n'avoir jamais été activées.

2. Caractérisation tardive des interactions

Il s'agit là d'une interface entre deux éléments du système ou entre le système et son environnement caractérisée dès le début mais mal.

2.1. Exemple du Trident D5 (réf. [4] et [5])

Le *Trident D5* est un missile mer-sol balistique stratégique (MSBS), en anglais *SLBM (Submarine Launched Ballistic Missile)* ou encore *ICBM (InterContinental Ballistic Missile)*, stocké à bord de sous-marins nucléaires de la force américaine de dissuasion.

Le 21 mars 1989, le tir du *PEM-1 (Performance Evaluation Missile n° 1)* du *Trident D5*, premier tir du D5 depuis le sous-marin *Tennessee*, se solde par un échec : après une phase sous-marine en apparence nominale, le premier étage du missile s'allume correctement à l'émergence, mais le missile décrit une série de loopings et s'abîme en mer moins de 10 secondes après la sortie d'eau.

L'attribution de l'échec à l'effet du « jet rentrant », dard d'eau qui se forme en-dessous du missile et l'accompagne dans son ascension avec une vitesse supérieure, conduit à renforcer la tuyère en vue du deuxième tir (*PEM-2*), qui est un succès, le 2 août 1989.

Le *PEM-3*, tiré le 16 août, est un échec.

Les modifications consécutives (reprise de conception, développement, essais), dont quatre modifications importantes du fond arrière, se sont élevées à plus de 100 M\$.

Les essais sous-marins ont repris les 4, 13 et 15 décembre 1989, puis les 15 et 16 janvier 1990, tous avec succès. Le *Trident D5* a été déployé opérationnellement en 1990.

Le *Trident D5* succédait au *Trident C4*, déployé en octobre 1979, qui avait lui-même remplacé le missile sous-marin *Poseidon C3*, déployé en 1977, lequel avait succédé au *Polaris*, déployé en 1960. La question du jet rentrant était donc connue, il ne s'agissait pas pour le D5 de la découverte d'une interaction, mais de la caractérisation tardive de l'interaction de l'environnement sous-marin avec le missile.

2.2. On peut trouver quantité d'exemples d'interactions insuffisamment caractérisées moins spectaculaires, car identifiées avant vol, telle la nécessité d'implanter, quelques mois avant le premier vol d'un lanceur spatial, des réchauffeurs sur des piles, du fait du constat tardif de l'ambiance thermique réelle résultant du choix de la technologie cryotechnique sur un nouvel étage. D'où rapatriement des équipements chez le constructeur afin d'étudier, mettre en œuvre la modification, examen de la nécessité ou non de procéder à un complément de qualification, modification du câblage du lanceur afin de tirer les lignes apportant l'énergie de réchauffage...

Pourtant, les épreuves de qualification des équipements situés à proximité des réservoirs cryotechniques avaient été révisées dès le début du programme.

3. Identification tardive des interactions

3.1. Un cas extrême (mais réel !) est celui de la modification locale d'un équipement, décidée par le responsable du développement de l'équipement, pour des raisons parfaitement avouables (impossibilité d'obtenir la performance requise) ou non (raison de confort : c'est plus simple, moins long, moins cher, de « faire comme ça »), sans préoccupation des conséquences possibles sur le sous-ensemble ou le système auquel appartient l'équipement ; cela existe ! On dit que la personne « n'a pas l'esprit système » ! Ce cas est normalement « piégé » au cours des revues de projet, mais conduit inmanquablement à des reprises, des retards, des surcoûts.

3.2. *Ariane 501* (réf. [6]) : l'échec du premier tir d'*Ariane 5* est largement traité dans tous les exposés d'architecture système ou d'Ingénierie Système ; il illustre le risque lié à la réutilisation d'un équipement (matériel *et* logiciel) ayant donné toute satisfaction sur le programme précédent. La vitesse horizontale d'*Ariane 5* au décollage, sensiblement plus élevée que celle d'*Ariane 4*, a conduit au débordement d'une information du *Système de Référence Inertielle (SRI)*, dans un programme qui ne servait qu'au sol ; le fait fut signalé par une information de diagnostic (profil de bit spécifique de la panne du calculateur du *SRI 2*), interprétée par le calculateur principal comme une donnée fonctionnelle de vol, tandis que le *SRI 1*, redondant, s'était déjà déclaré en panne. Sur la base de ces données, le calculateur principal a commandé un braquage des tuyères incompatible avec les charges aérodynamiques tolérables, entraînant la destruction du lanceur.

Entre autres causes d'échec (fonction logicielle active en vol sans nécessité, absence d'envoi des données fonctionnelles par les *SRI*, panne due à une exception logicielle affectant les deux *SRI* redondants), l'absence de vérification au sol du comportement des *SRI* en présence de trajectoires *Ariane 5* a conduit à ignorer l'interaction qui a été à l'origine de l'échec (non-conformité de l'équipement avec l'application).

3.3. *Mars Climate Orbiter* (réf. [7]) : *Mars Climate orbiter (MCO)*, premier satellite interplanétaire, avait pour mission d'étudier l'atmosphère et le climat martiens ; il devait servir de relais de communication pour une autre sonde américaine, *Mars Polar Lander*, qui serait lancée quelques mois plus tard. Tous deux faisaient partie du programme *Mars Surveyor 98*.

MCO a été lancé le 11 décembre 1998 ; le 23 septembre 1999, le sol enregistre la perte définitive de la communication avec *MCO* alors que la sonde est à proximité de Mars (pas de réapparition de la sonde après l'occultation de la sonde par la planète au début de sa capture par l'atmosphère martienne). L'hypothèse la plus probable est la destruction de la sonde du fait des turbulences et des frottements atmosphériques.

Le coût de la sonde *MCO* (source : Wikipedia) était de 125 M\$, pour un coût total du programme de 328 M\$.

La responsabilité de l'échec a été attribuée à un défaut du processus d'Ingénierie Système de la NASA.

L'échec est dû à une erreur de navigation avant et pendant la mise en orbite autour de Mars. Une première correction a fait réviser à la baisse, de 193 à 140 km, l'altitude de survol prévue ; l'altitude de 140 km a été jugée acceptable, la limite inférieure étant de 85 km. En réalité, la sonde est entrée

dans l'atmosphère de Mars à seulement 57 km : le couloir de survol était beaucoup plus bas que le couloir théorique, et incompatible avec un survol en toute sécurité.

L'enquête a établi une sous-estimation par le logiciel de bord des poussées des propulseurs dans un rapport 4, 45 (*pound-force/newton*).

La sonde envoyait les mesures de navigation au sol en unités métriques ; le sol calculait certains paramètres en unités de mesure anglo-saxonnes (ou *Imperial measurement units*), en l'occurrence des *pound.second*, envoyées sans conversion au module de navigation qui les attendait en unités métriques (*newton.second*).

Outre l'illustration de l'effet domino, cet échec met en évidence l'oubli d'une interaction informationnelle : le processus d'Ingénierie Système n'avait pas spécifié le système d'unités.

4. Conclusion

Les interactions entre les sous-systèmes, les sous-ensembles et les équipements d'un système, l'interaction du système avec son environnement, sont par nature inhérentes à la notion de système.

Ces interactions sont, par nature également, dynamiques, en ce sens que les éléments du système échangent de façon continue des données, de la matière, de l'énergie, pendant leur fonctionnement. La caractérisation de ces échanges, par le traitement des interfaces, matérielles et immatérielles, fait bien entendu partie intégrante de la conception du système.

Les exemples présentés, dont la plupart revêtent un caractère spectaculaire, montrent que les interactions évoluent au cours du développement d'un système, leur caractérisation étant un processus résolument itératif - donc dynamique lui aussi -, et, à l'extrême, les interactions sont identifiées très (trop) tard.

Les méthodes et outils de l'Ingénierie Système ont été mis en place pour maîtriser au mieux ces interactions au cours du développement du système. L'un des soucis d'un chef de programme à la veille d'un tir, inaugural ou non, est que le processus d'Ingénierie Système n'ait oublié aucune interaction et ait suffisamment bien caractérisé les interactions dans les conditions réelles.

L'expérience montre que la « tentation de Laplace », rêvant d'embrasser « dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain... », appliquée à l'Ingénierie Système, sous forme d'un processus qui conduirait inmanquablement au succès du premier coup, et serait garant de la sûreté d'aboutissement des projets, si complexes soient-ils, reste un rêve.

L'Ingénierie Système a des limitations, heureusement rares, même si ces limitations peuvent avoir des conséquences spectaculaires.

La maîtrise de la conception et du développement des systèmes progresse en tirant les leçons de ces exceptions.

5. Références bibliographiques

[1] DE ROSNAY Joël, (1974), *Le Macroscopie*, p. 92, 100-101, Ed. Points

[2] DONNADIEU Gérard/KARSKY Michel, (2004), *La Systémique, penser et agir dans la complexité*, p. 29-30, Ed. Liaisons

[3] MOREY Jean-Claude/ABOUT Gilles, (21-22 juin 2004), *Engineering and Validation on Space Transportation Avionics Systems*, Complex and Safe Systems Engineering (Arcachon)

[4] KOLCUM Edward H., Aviation Week & Space Technology, (March 17, 1989), *Navy Assesses Failure of First Trident 2 Underwater Launch*

[5] KOLCUM Edward H., *Aviation Week & Space Technology*, (January 8, 1990), *Three Successful Launches Verify Design Fixes to Trident 2 C5 ICBM*

[6] Professeur J.-L. LIONS, Président de la Commission, (23 juin 1996) - *Rapport de la Commission d'enquête Ariane 501 - Echec du vol Ariane 501*

[7] (March 13, 2000), *Report on Project Management in NASA by the Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board*

* * *