

# Un cadre méthodologique intégré pour l'architecture et l'optimisation de systèmes

Abdelkrim Doufene  
Massachusetts Institute of Technology  
77 Massachusetts Ave, ESD. E40-227  
Cambridge, MA 02139, USA

Hugo G. Chalé G.  
ALSTOM Transport  
48 rue Albert Dhalenne  
93482 Saint-Ouen Cedex, France

Alain Dauron  
RENAULT  
1 avenue du Golf  
78288 Guyancourt, France

Daniel Krob  
Ecole Polytechnique  
Laboratoire d'Informatique (LIX)  
91128 Palaiseau Cedex, France

**Résumé.** Le présent article porte sur une approche de conception basée sur un cadre d'architecture de systèmes complexes, combinée avec des modèles d'optimisation. Cette étude montre l'importance et l'utilité d'utiliser un cadre d'architecture afin d'organiser et de structurer tous les points de vue qui permettent l'étude d'un système industriel complexe avec une approche holistique. Les modèles d'optimisation multi-objectifs et d'équilibre (au sens de la théorie des jeux) aident considérablement dans le processus d'analyse des compromis et la prise de décisions. Les données utilisées dans ces problèmes d'optimisation sont issues des descriptions du système faites suivant le cadre d'architecture. Ce dernier sépare clairement la définition du problème et la conception des solutions grâce notamment à l'abstraction. D'autre part, cette étude montre l'importance de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du système à concevoir et des systèmes externes dans la modélisation des problèmes d'optimisation. L'évaluation des propriétés des cycles de vie fait ressortir certains paramètres qui contribuent efficacement à l'intégration du système dans son environnement. Nous avons illustré cette approche à travers des exemples pratiques liés aux véhicules électriques.<sup>1</sup>

*“Là où naît l'ordre, naît le bien-être.” Le Corbusier.*

**Mots clés :** *Architecture des systèmes complexes, optimisation multi-objectifs et multidisciplinaire, théorie des jeux, Pareto, équilibre architectural.*

## 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Des analyses de compromis lors de la conception des systèmes industriels complexes sont inévitables. Ils sont utiles et nécessaires pour prendre la quasi-totalité des décisions en termes de choix de conception et de dimensionnement des systèmes tout au long du processus de conception. Différents types de décisions peuvent être considérés. On peut imaginer, par exemple, beaucoup de compromis tenant compte des besoins des parties prenantes, du coût total de possession du système, des propriétés de son cycle de vie telles que la qualité, la fiabilité, la sécurité, la flexibilité, la robustesse, la durabilité, l'évolutivité, etc. Sur un autre registre, des études de faisabilité politique, économique, sociétale, technologique, environnementale et légale sont indispensables afin de satisfaire au mieux tous les besoins des parties prenantes autour du système.

Dans la pratique industrielle, afin de concevoir un système industriel complexe, il faut en effet prendre en compte plusieurs objectifs et contraintes multidisciplinaires. Faire des analyses, définir les bons critères et évaluer les alternatives possibles sont cependant des tâches difficiles. Cette difficulté est due en particulier au fait que la séparation entre la définition du problème et la conception de la solution est souvent floue. L'utilisation d'un cadre d'architecture pourrait considérablement contribuer à combler cette lacune et à clarifier le lien entre les contraintes de conception et les variables de conception, souvent mélangées dans la pratique.

Un cadre d'architecture offre en outre des guides et des règles pour structurer et organiser les architectures systèmes. Les points de vue qui permettent de couvrir l'ensemble des architectures du système et les différents niveaux d'abstraction clarifient davantage la définition du problème et les processus de conception des solutions. L'utilisation d'un cadre d'architecture devrait ainsi aider à parvenir à une modélisation complète du système.

---

<sup>1</sup> **NB.** *Cette démarche de conception est expliquée en détail et illustrée par des exemples pratiques liés aux véhicules électriques dans la thèse de doctorat du premier auteur [Doufene, 2013].*

L'étude du système étape par étape, réalisée de manière itérative, met en évidence des éléments tels que la définition du système et de son environnement, l'objectif du projet, les missions du système et les parties prenantes. Une fois ces éléments clairement identifiés, nous pouvons alors concevoir le système et le décrire selon des points de vue différents. Dans notre étude, nous utilisons trois principaux points de vue d'analyse: opérationnel, fonctionnel et structurel, décrits dans la section §2.1.

Par ailleurs, la combinaison de la démarche d'architecture des systèmes avec des modèles d'optimisation, en tenant compte du cycle de vie des systèmes, est indispensable pour construire des dossiers de conception système complets, justifiés, vérifiés et validés, réutilisables, capitalisables et facilement transférables d'un projet à un autre. Ceci contribuerait à la réduction du ticket d'entrée ingénierie, les coûts et les délais des études, à l'adaptation des solutions selon les modèles d'affaire associés dans différents contextes ou marchés, et aussi à la réduction du délai d'entrée sur le marché des produits. En général, pour la conception d'un système industriel complexe, nous estimons que deux types de modèles d'optimisation sont complémentaires et nécessaires. Ces modèles tiennent compte des types de décision qui entrent en jeu dans le choix des solutions.

- Des modèles **d'optimisation multi-objectifs et multidisciplinaires** pour la recherche des meilleures solutions d'architecture du système étudié étant donné les besoins et contraintes des parties prenantes, et du contexte d'utilisation du système. Ces solutions correspondent à différentes options ou variantes « optimales » du système. Les modèles d'optimisation multi-objectifs et multidisciplinaires sont utiles pour des décisions `indépendantes`, dans le sens où elles ne dépendent que des choix (ou des préférences) du concepteur du système. Ces décisions sont basées sur des facteurs endogènes aux choix du concepteur. Nous avons présenté un exemple pratique liée aux véhicules électriques dans [Doufene et al., 2012].
- Des modèles **d'optimisation d'équilibres** pour la recherche des meilleurs compromis entre les intérêts des différentes parties prenantes autour du système étudié dont les résultats correspondent à différentes solutions « d'équilibre » architectural (dans le sens où l'on cherche à aligner différentes solutions d'architecture système aux intérêts des parties prenantes.) Les modèles d'optimisation d'équilibres sont utiles pour des décisions `interdépendantes` basées sur des facteurs endogènes et exogènes, qui dépendent non seulement des choix du concepteur du système étudié mais aussi des autres parties prenantes dans leurs cycles de vie. Nous avons présenté un exemple pratique liée aux véhicules électriques dans [Doufene et al., 2013].

On peut considérer enfin qu'un équilibre architectural d'un système donné a un impact sur sa conception, donc sur les décisions indépendantes. L'équilibre architectural donne les premières orientations des choix qui se font tout au long du processus de conception. Des contraintes de conception préliminaires résultent du choix de l'équilibre architectural.

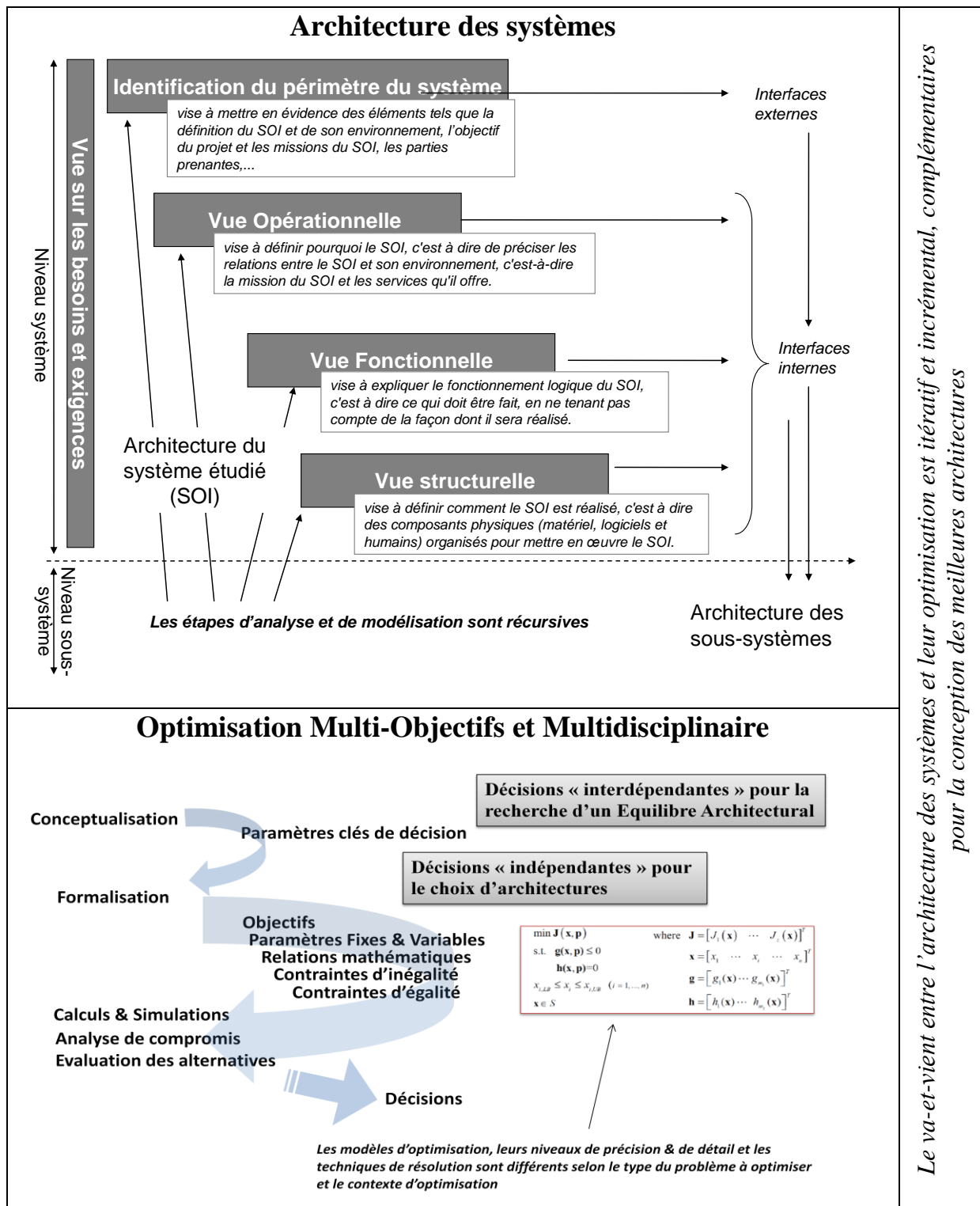
Nous présentons dans cet article une démarche de conception qui combine l'utilisation d'un cadre de conception d'architecture avec des modèles d'optimisation afin de concevoir des solutions systèmes adéquates selon leur contexte de définition.

## 2. DÉMARCHE DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION

Pour la définition des concepts, nous nous référons dans cet article aux guides [INCOSE, 2010] et [AFIS. 2009] pour la définition de l'Ingénierie Systèmes (IS). Celle-ci est inspirée des normes IEEE 1220 : Standard for application and Management of the Systems Engineering Process, EIA 632 : Processes for Engineering a System, ISO 15288 : Systems Engineering – System Life-Cycle Processes. Dans le présent article, nous nous intéressons aux systèmes sociotechniques complexes, comme définis dans [de Weck et al., 2011].

La figure 1 montre globalement les étapes principales de notre démarche de conception et d'optimisation. À partir des analyses système, suivant le cadre d'architecture, avec la prise en compte du cycle de vie du système étudié et des systèmes externes, nous modélisons des problèmes d'optimisation. Ceci, à travers l'identification de mesures, paramètres fixes et variables, fonctions objectifs, contraintes d'égalité ou d'inégalité et des relations mathématiques entre ces données qui permettent d'évaluer les différentes alternatives de conception possibles. Grâce à des modèles mathématiques d'optimisation multi-objectifs ou d'équilibre, nous pouvons faire des simulations, trouver les meilleures valeurs pré-dimensionnant les variables de conception dans des contextes bien définis, et qui permettent de satisfaire au mieux les différents objectifs. Les résultats de simulation peuvent faire ressortir d'autres choix utiles dans d'autres contextes (nouvelle variante de système pour un autre segment de marché, par exemple). Le processus d'architecture des systèmes et celui de leur optimisation sont

complémentaires pour la conception des meilleures architectures. Le lien entre ces deux processus est récursif et incrémental. Les modèles d'optimisation, leurs niveaux de précision et de détail, et les techniques de résolution sont différents selon le type du problème à optimiser et le contexte d'optimisation. Dans les paragraphes suivants, nous mettons l'accent sur les liens entre ces deux processus : architecture et optimisation.



*Le va-et-vient entre l'architecture des systèmes et leur optimisation est itératif et incrémental, complémentaire pour la conception des meilleures architectures*

Figure 1. Cadre général de notre démarche de conception et d'optimisation d'architectures

## 2.1. Conception d'architecture

Au delà de la structuration des données, un cadre de référence et un langage de modélisation contribuent considérablement à l'organisation et à la clarté dans le travail collaboratif. Il supporte aussi l'exhaustivité et la traçabilité des justifications, utiles pour la capitalisation et la réutilisation. La structure d'un système complexe et son comportement dynamique sont en effet difficiles à comprendre et à décrire sans passer par différents niveaux d'analyse. L'absence de niveaux d'abstraction mélange rapidement le monde du problème avec celui de la solution. Ne pas comprendre attentivement les niveaux appropriés d'analyse peut conduire à une conception partielle du système étudié, ou même déformée, qui remet en cause son intégration, voire son utilité.

Pour concevoir des systèmes complexes, certains domaines industriels ont défini des cadres d'architecture qui fournissent des guides et des règles pour structurer, classer et organiser les architectures du système étudié. Par exemple, on peut citer le cadre d'architecture du département américain de la défense (DODAF) et le cadre d'architecture du ministère britannique de la défense (MODAF). Il serait utile de faire référence aussi à la revue de littérature réalisée dans [Bartolomei, 2011] où on donne des exemples de cadres de référence. On y cite Design Structure Matrix; Domain Mapping Matrix; Axiomatic Design; Unified Program Planning; Quality Functional Deployment/House of Quality; CLIOS (Complex, Large-scale, Interconnected, Open, Sociotechnical System). Un cadre de conception d'architecture devrait servir de référence pour organiser toutes les composantes de l'architecture d'un système selon plusieurs points de vue. Les vues d'architecture sont importantes pour couvrir la totalité de l'architecture du système.

Nous utilisons un cadre de conception d'architectures inspiré de la méthode SAGACE initialement proposée dans [Penalva, 1997]. SAGACE s'articule autour de trois grands principes: une approche de modélisation, une représentation des points de vue (une matrice de neuf points de vue) et un langage de modélisation graphique. Afin de parvenir à une modélisation complète d'un système, il préconise son étude par étapes, avec une manière incrémentale et itérative. Les différentes étapes mettent en évidence des éléments tels que la définition du système étudié et de son environnement, l'objectif du projet et les missions du système étudié, les parties prenantes, etc. Une fois ces éléments clairement identifiés, nous pouvons alors concevoir le système et le décrire dans la matrice de neuf points de vue: vues opérationnelle, fonctionnelle et structurelle, toutes affinées par trois perspectives de temps [Meinadier, 1998 et 2002]. Dans notre étude, nous utilisons également ces trois principaux points de vue d'analyse, mais affinés par une perspective comportementale (Figure 1 – partie Architecture) – et non par une perspective temporelle comme dans SAGACE – ce qui nous permet de les modéliser en utilisant le langage de modélisation SysML comme expliqué dans [Krob, 2009, 2010 et 2012].

Le langage de modélisation des systèmes SysML est un langage de modélisation normalisé géré par l'OMG™ (pour Object Management Group). SysML a été développé en partenariat entre l'OMG et INCOSE et est basé sur le langage UML version 2.0. SysML offre un ensemble supplémentaire de diagrammes pour modéliser des systèmes. Il est important de noter que l'UML et SysML ne sont pas des méthodes, mais bien des langages de modélisation. L'utilisation de ce type de langages de modélisation standardisés devrait permettre de communiquer et collaborer entre différents acteurs d'une manière plus efficace. Nous utilisons dans notre étude le langage de modélisation OMG SysML™ décrit en détail dans [Friedenthal, 2008; Weilkens, 2008]. L'utilisation de chaque diagramme dans le cadre d'architecture est expliquée dans [Krob, 2009 et 2010] et [Doufene, 2013]. Par ailleurs, un travail d'instanciation et d'adaptation de ce cadre au contexte de l'automobile a été réalisé et présenté dans [Chalé Góngora et al., 2012]. Le tableau 1 en donne un aperçu.

Tableau 1. Utilisation des digrammes SysML dans la matrice d'analyse.

	Description des états	Description statique	Description du comportement dynamique
➤ <b>Vue opérationnelle</b>	Les diagrammes d'états pour décrire les contextes opérationnels.	Les diagrammes de cas d'utilisation pour décrire l'utilisation du système.	Les diagrammes de séquence pour décrire les scénarios.
➤ <b>Vue fonctionnelle</b>	Les diagrammes d'états pour décrire les modes de fonctionnement.	Les diagrammes d'activité pour décrire les fonctions.	Les diagrammes d'activité pour décrire le fonctionnement.
➤ <b>Vue structurelle</b>	Les diagrammes d'états pour décrire les états des constituants.	Les diagrammes de définition de bloc pour décrire la liste des constituants.	Les diagrammes de blocs internes pour décrire la structure et les interfaces internes entre constituants.
➤ <b>Pour la modélisation de l'environnement et des interfaces externes</b> , nous utilisons respectivement des diagrammes de définition de bloc et des diagrammes de blocs internes.			

## 2.2. Optimisation

Les modèles d'optimisation aident considérablement dans l'analyse des compromis et la prise de décisions. Les données utilisées dans ces problèmes d'optimisation viennent des descriptions du système faites suivant le cadre d'architecture. Ce cadre sépare clairement la définition du problème et la conception des solutions, ce qui permet d'identifier facilement les contraintes de conception par rapport aux variables de conception. D'autre part, l'évaluation des propriétés du cycle de vie peut faire ressortir certains paramètres qui contribueraient efficacement à l'intégration du système dans son environnement [de Weck et al., 2011]. Comme expliqué précédemment, il est très utile d'utiliser un cadre d'architecture pour l'aide à la prise de décision lors du processus de conception pour le choix et le pré-dimensionnement des architectures du système étudié. Pour expliquer cette assertion, nous présentons dans cette section l'apport des modèles d'optimisation multi-objectifs dans le processus de conception et de prise de décision, et le lien avec le cadre d'architecture. Nous présentons, dans deux sous-sections, l'optimisation pour le choix d'architecture et l'optimisation pour le choix d'équilibres architecturaux.

### 2.2.1. Niveau d'abstraction du problème d'optimisation

Le niveau d'abstraction du problème d'optimisation est étroitement lié au niveau d'abstraction dans l'analyse du système étudié. Pour comprendre la notion d'abstraction dans le monde de l'optimisation, prenons l'exemple d'un appartement dans un immeuble dans un quartier résidentiel d'une ville. Pour optimiser la consommation de l'énergie du gaz, par exemple, le propriétaire de l'appartement peut installer un réseau de chauffage centralisé. Si l'on voulait optimiser la consommation de l'énergie au niveau de l'immeuble, le choix de l'architecture du réseau de chauffage serait différent et, de même, si on voulait optimiser la consommation de l'énergie du gaz au niveau de la ville. En prenant un peu de recul, on pourrait finalement décider d'utiliser l'énergie électrique pour le chauffage au lieu du gaz. On pourrait réfléchir également, du moment que le besoin est de se chauffer, à travailler sur l'isolation thermique des bâtiments, etc. À travers cet exemple, nous voulons mettre l'accent sur un certain nombre de points importants dans notre démarche. La difficulté, notamment dans la pratique industrielle, est l'identification des objectifs adéquats, les contraintes et les variables de conception, et des relations entre celles-ci. Quels sont les critères nécessaires et utiles pour évaluer les alternatives? Y a-t-il des priorités? Quand et qui prend les décisions? Il est primordial en effet de comprendre d'abord le contexte de décision.

Le contexte de décision est étroitement lié au contexte de conception. Les décisions peuvent être indépendantes ou interdépendantes. Dans la définition d'un système par exemple, la connaissance des attentes des parties prenantes est indispensable. Pour réussir l'intégration du système dans son environnement, la partie prenante responsable de la conception de ce système est amenée à prendre les décisions de choix de conception pour optimiser ses propriétés et de les faire accepter par les autres parties prenantes. Il y a donc des décisions interdépendantes, du moment que l'intégration du système dans son environnement dépend des décisions prises par toutes les parties prenantes et non seulement du concepteur du système, et là nous cherchons des équilibres garants de la stabilité de cet environnement et des relations entre les parties prenantes. Il y a aussi des décisions indépendantes du point de vue de la partie prenante responsable de la conception du système étudié. Ces décisions sont contraintes, entre autres, par les choix déjà faits suite à la négociation des équilibres qui découlent des décisions interdépendantes. Donc, en résumé, il faut d'abord comprendre (voire d'anticiper) les attentes des parties prenantes (besoins des systèmes externes), de bien les quantifier, de bien négocier ou faire des compromis du moment que les besoins peuvent être antagonistes. La déclinaison de ces besoins en exigences que doit satisfaire le système représente la première étape qui fait ressortir les contraintes et variables de conception. Au fur et à mesure qu'on avance dans le processus de conception, et à chaque étape où une décision est prise, quelques variables de conception deviennent des contraintes de conception, et d'autres variables et/ou contraintes vont resurgir. Elles seront prises en considération par la suite, dans le processus de conception. Mais à un moment donné, il se peut qu'une contrainte de conception redevienne une variable de conception si des incompatibilités ou indisponibilités (technologiques ou autres) sont avérées, par exemple. Toutes ces données (variables et contraintes) vont servir dans des modèles d'optimisation pour évaluer des choix d'architectures et afin de les optimiser, en considérant des objectifs d'optimisation bien définis.

Un autre point important aussi est le fait d'évaluer les alternatives de choix d'architectures en tenant compte des propriétés du cycle de vie du système étudié et celles des systèmes externes avec qui il interagit. L'exemple d'une centrale nucléaire bien conçue, sécurisée, résistante, de haute performance mais qu'on ne sait pas recycler ou démanteler est un exemple frappant. Il faut en effet avoir en tête toujours que tel ou tel système a un cycle de vie et que les choix de conception pris aujourd'hui auront un impact tout au long de son cycle de vie.

Indépendamment du nombre d'objectifs à optimiser, deux catégories de méthodes d'optimisation y sont distinguées: les méthodes déterministes et les méthodes aléatoires (encore appelées stochastiques ou méta-

heuristiques). L'objectif de cette communication n'est pas de proposer de nouvelles méthodes d'optimisation mais plutôt d'établir un lien entre l'architecture des systèmes et la modélisation des problèmes d'optimisation.

### 2.2.2. Modélisation du problème d'optimisation multi-objectif

Objectifs, contraintes de conception, variables de conception, relations mathématiques, alternatives, évaluation, décisions et architectures sont autant de notions importantes dans l'architecture et l'optimisation des systèmes complexes. Ce qui est couramment vrai dans la pratique industrielle est que les alternatives de conception sont évaluées en tenant compte de plusieurs objectifs (ou critères) souvent encadrés dans quatre catégories: coûts, qualité, délais, performances. Etant donné la multitude de besoins autour du système étudié et la multidisciplinarité dans les décisions, la modélisation en problèmes d'optimisation multi-objectif semble être la mieux indiquée. En effet, l'optimisation multi-objectifs (MOO pour Multi-Objective Optimization) dans le contexte de l'ingénierie et la conception de systèmes complexes est très utile dans l'analyse des compromis et la prise de décision. Il permet de prendre en considération des objectifs pluridisciplinaires tels que la performance, les coûts, le planning, le risque, etc. Un aperçu rapide sur la MOO et les méthodes les plus populaires sont présentés dans [de Weck, 2006]. Un problème d'optimisation multi-objectif peut être formalisé d'une manière mathématique comme suit [Marler et Arora, 2004]:

$$\text{On cherche à } \mathbf{Minimiser } F(x)=[F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T$$

$$\text{Sachant } \mathbf{g}_j(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, m. \text{ et } \mathbf{h}_i(x) = 0, i=1, 2, \dots, e$$

où  $k$  est le nombre de fonctions objectifs,  $m$  est le nombre des contraintes d'inégalité, et  $e$  est le nombre de contraintes d'égalité.  $x \in E^n$  est le vecteur des variables de conception (appelées aussi variables de décision), où  $n$  est le nombre de variables indépendantes  $x_i$ .  $F(x) \in E^k$  est le vecteur de fonctions objectifs  $F_i(x) : E^n \rightarrow E^1$ .  $F_i(x)$  sont aussi appelés objectifs, critères, fonctions gains, fonctions coûts, ...  $x_i^*$  est le point qui minimise la fonction objectif  $F_i(x)$ . L'espace de décisions faisable  $X$  est défini comme étant un ensemble  $\{x | g_j(x) \leq 0, j=1, 2, \dots, m ; \text{ et } h_i(x)=0, i=1, 2, \dots, e\}$ . L'espace des objectifs faisable  $Z$  est défini comme étant un ensemble  $\{F(x) | x \in X\}$ .

La notion de préférence des preneurs de décision et les priorités entre objectifs d'optimisation influencent le choix des méthodes de résolution d'un problème MOO. L'étude des concepts et méthodes de MOO présentée dans [de Weck 2006] classe les méthodes en dans deux catégories: Les méthodes avec expression des préférences *a priori* et les méthodes Pareto (expression des préférences *a posteriori*). Le choix des méthodes de résolution est différent aussi selon que les problèmes sont des problèmes linéaires ou non linéaires, à variables continues ou discrètes, etc. Le lecteur peut se référer aux études sur les méthodes de MOO dans [Coello, 2010] pour d'autres références. En général, les préférences des preneurs de décisions sont difficilement quantifiables et dépendent de plusieurs paramètres difficiles à cerner dans les organisations. Plusieurs problèmes de décision dans le contexte d'IS ne peuvent être vus comme des problèmes de décisions d'un seul agent. En effet, plusieurs parties prenantes autour du système étudié (architectes, ingénieurs, managers, financiers, chefs de projets, chefs de programme) peuvent avoir des préférences différentes difficilement quantifiables et, souvent, difficiles à faire converger [Lawson, 2008]. Nous n'aborderons pas dans cet article la modélisation des préférences et nous nous focaliserons sur la modélisation des problèmes MOO sans articulation de préférences *a priori*.

### 2.2.3. Optimisation pour le choix d'architectures

L'identification du périmètre du système et l'analyse opérationnelle parallèlement à une analyse de besoins définissent clairement le système étudié. C'est au cours de ces étapes que les mesures de l'efficacité globale (MOEs) du système étudié sont identifiées. Celles-ci sont des mesures de succès liées étroitement à la réalisation de la mission et la façon dont la solution atteint le but recherché. En outre, nous mettons en évidence quelques mesures de performances (MOPs) pour définir les principales caractéristiques de performance que le système devrait avoir pour opérer et fonctionner dans son environnement prévu. Les MOPs sont utilisées pour évaluer si le système étudié répond aux exigences de performance qui sont nécessaires pour satisfaire les MOEs. Les performances peuvent être d'ordre économique, technique, perçues par l'utilisateur et ainsi de suite. La différenciation entre ces deux mesures est importante en vue de résoudre les problèmes MOO. Ces deux mesures peuvent être vues comme des objectifs à optimiser dans les problèmes MOO.

Dans un problème MOO, il n'y a pas de solution globale et unique, et il est souvent nécessaire de déterminer un ensemble de points qui sont tous conformes à la définition d'un optimum. Le concept prédominant dans la définition d'un point optimal est celui de Pareto optimalité [Marler et Arora, 2004]. Voici une définition mathématique d'un optimum de Pareto.

Un point  $x^* \in X$  est un optimum de Pareto si et seulement si il n'existe pas un autre point  $x \in X$  tel que  $F(x) \leq F(x^*)$  et  $F_i(x) < F_i(x^*)$  pour au moins une fonction. Les points optimaux de Pareto forment la frontière de l'espace des objectifs faisables  $Z$  qu'on appelle la frontière de Pareto.

Les solutions qui ne sont pas des optimaux de Pareto mais qui respectent les autres contraintes sont appelées des optimaux de Pareto faibles (Weakly Pareto Optimal). Un point  $x^* \in X$  est un optimum de Pareto faible si et seulement si il n'existe pas un autre point  $x \in X$  tel que  $F(x) \leq F(x^*)$ . Autrement dit, un point est un optimum de Pareto faible s'il n'existe pas un autre point qui améliore toutes les fonctions objectifs simultanément. Un point est un optimum de Pareto s'il n'existe pas un autre point qui améliore au moins une fonction objectif au détriment d'une autre fonction objectif.

Des travaux de recherche ont été réalisés en utilisant la modélisation de Pareto dans le contexte de l'architecture des systèmes. [Smaling 2005] introduit, entre autres, le concept de *Fuzzy Pareto Optimality*. Il préconise, lors de la conception d'un système, de garder quelques solutions qualifiées de presque optimales (*near Pareto frontier solutions*). En effet, en cas d'incertitude, il faut prendre en compte, en plus des solutions optimales de type Pareto, d'autres solutions pour anticiper l'exclusion involontaire de solutions viables et peut-être même souhaitable à cause notamment des influences externes imprévues ou imprévisibles dans un environnement incertain.

Quand on dispose d'un ensemble de points optimaux de type Pareto, si le preneur de décision est le concepteur (au sens large du terme) du système, il peut alors préférer telle ou telle solution, en articulant *a posteriori* ses préférences. Par exemple, pour deux cibles de marché différentes, il peut choisir deux points (solutions) se trouvant à deux endroits différents sur la frontière de Pareto. On parle dans ce cas de décisions pour le choix d'architectures ou décisions indépendantes. Nous avons présenté un exemple pratique dans [Doufene et al., 2012] et [Doufene, 2013] où le système d'intérêt est le groupe motopropulseur d'un véhicule électrique. Cependant, dans le cas où la décision dépend de plusieurs parties prenantes autour du système étudié, on cherchera plutôt des équilibres architecturaux que nous expliquons dans la sous-section suivante.

#### 2.2.4. Optimisation pour l'équilibre architectural

Dans la phase de définition de la raison d'être d'un système donné, l'identification de toutes les parties prenantes dont la participation est indispensable pour la réussite de ce système est très importante. Les décisions prises à ce stade du processus de conception garantissent (ou, malheureusement, pourraient mettre en péril) la réussite de l'intégration de ce système dans son environnement. Différents types de décisions peuvent être considérés. On peut imaginer beaucoup de décisions possibles en tenant compte des besoins des parties prenantes, de leurs stratégies souvent interdépendantes, du coût total de possession du système, etc. Comme établi précédemment, les décisions prises à ce stade du processus de conception engendrent les premières orientations de choix d'architectures et des niveaux de maturité à atteindre en termes des propriétés du cycle de vie du système. En effet, l'intégration d'un nouveau système dans un environnement donné peut perturber la stabilité de cet environnement et déclencher des événements indésirables ou non attendus, qui à leur tour peuvent entraver la réussite de cette intégration. Cette intégration devient de plus en plus complexe du fait de la complexité du système étudié et de son environnement.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons dans ce chapitre une brique supplémentaire à notre approche de conception, basée sur l'analyse système et la théorie des jeux pour l'identification d'équilibres architecturaux garants de la stabilité de l'environnement post-intégration du nouveau système. Ceci a été montré à travers un exemple pratique sur les véhicules électriques dans [Doufene et al., 2013] et [Doufene, 2013]. Nous nous basons sur une analyse système pour la compréhension de l'environnement des systèmes que nous voulons étudier (les véhicules électriques) et leur environnement (les parties prenantes dans leur écosystème), sur tout le long de leurs cycles de vie. L'objectif est de trouver des équilibres globaux entre les systèmes externes (les parties prenantes), qui satisferaient leurs besoins (arrangeraient leurs stratégies), tout en tenant compte des contraintes de faisabilité (économiques, technologiques, réglementaires, sociétales. Etc.), ce qui devrait garantir une meilleure intégration des systèmes étudiés et la stabilité de leur environnement. Ceci est modélisé sous forme d'un jeu au sens de la théorie des jeux pour permettre, entre autres, d'anticiper le changement dans un environnement incertain (départ ou arrivée d'une partie prenante, apparition ou modification de besoins, etc.)

La théorie des jeux est une théorie de décision (rationnelle) d'agents stratégiquement interdépendants, c'est-à-dire qui s'influencent les uns les autres et qui ont conscience de ces influences réciproques. Les jeux sont des situations de décisions interactives dans lesquelles l'utilité (bien-être) de chaque individu dépend des décisions

des autres individus [Koessler, 2008]. Selon [Guerrien, 2010], les ingrédients d'un jeu sont une liste de  $n$  individus appelés joueurs, ayant pour but de maximiser une fonction-objectif ou des gains chiffrés d'une façon ou d'une autre, compte tenu de l'information dont ils disposent (conditions de rationalité des joueurs, un joueur rationnel étant celui qui veut des gains maximaux). On dispose alors de  $n$  ensembles, un par joueur, dont les éléments sont appelés stratégies. En outre, on dispose d'une fonction mathématique qui fait correspondre à chacune des combinaisons possibles des stratégies dont disposent les  $n$  joueurs une issue du jeu. Cette fonction est souvent représentée - notamment dans les exemples numériques - par les valeurs qu'elle prend à chacune des issues possibles du jeu, les gains des  $n$  joueurs à cette issue. En effet, un dénouement du jeu est une combinaison de stratégies. Enfin, on parle d'équilibre (un point de repos, qui peut être le point d'aboutissement d'un processus) lorsque les joueurs annoncent leurs choix et aucun ne regrette son choix au vu des choix des autres. L'équilibre de Nash en est un exemple. Si l'ensemble des stratégies est fini (borné) et le jeu peut comporter des stratégies mixtes, alors le jeu admet au moins une solution d'équilibre de Nash [Guerrien, 2010].

### ***Lien entre architecture et théorie des jeux***

La modélisation de l'environnement d'un système permet d'avoir la vue la plus claire possible de ses interfaces externes avant de plonger dans l'optimisation de ses architectures internes. Chaque système externe a ses propres attentes tout au long du cycle de vie du système, que le concepteur doit anticiper et satisfaire. Cependant, ces besoins sont souvent interdépendants et une analyse de compromis est indispensable si des besoins sont antagonistes. On peut considérer que pour tirer le maximum de profits du système à réaliser, chaque partie prenante pose certaines stratégies. Ainsi on arrive dans une situation où le concepteur doit chercher des compromis à des fins de stabilité pour pouvoir proposer des équilibres architecturaux qui devraient satisfaire toutes ces parties prenantes et garantir un environnement stable tout au long du cycle de vie du système.

En reprenant le vocabulaire de l'IS et de la théorie des jeux, on suppose que chaque partie prenante, qu'on peut considérer comme un joueur, autour d'un système est rationnelle. Chacune a ses propres stratégies pour maximiser ses gains, qui représentent la satisfaction de ses propres besoins. Cependant, le concepteur doit chercher à satisfaire au mieux toutes les parties prenantes (les joueurs) tout en s'assurant que l'architecture du système choisie représente un équilibre architectural dans le sens où elle garantit une stabilité de l'environnement tout au long du cycle de vie du système étudié et des cycles de vie des parties prenantes. Finalement, on peut dire que le pré-dimensionnement de cet équilibre est une solution d'un jeu où les parties prenantes sont les joueurs. Si on considère que les parties prenantes peuvent créer des coalitions dans le sens où ils combinent leurs choix, on parle alors de jeu coopératif. Sinon, on est dans un jeu non-coopératif.

L'utilisation de la théorie des jeux dans le contexte de l'ingénierie des systèmes et son lien avec les cadres d'architecture a été mentionnée dans [Bartolomei et al., 2001], où les auteurs proposent un cadre dénommé *Engineering Systems Multiple-Domain Matrix (ES-MDM)*. La cadre est basé sur l'utilisation de plusieurs domaines différents (environnemental, social, fonctionnel, technique, processus) et des matrices (concepteur/décideur, parties prenantes, objectifs, fonctions, objets, activités). Ensuite les auteurs proposent de croiser les matrices entre elles et selon les domaines. Par exemple, la matrice des parties prenantes autour d'un système étudié représentant le domaine social. Les parties prenantes sont des entités humaines qui contribuent aux objectifs du système et au contrôle des composants du système. L'étendue de leur contrôle du système définit le périmètre du système. Pour l'identification des parties prenantes d'un système donné, il est utile de poser les questions suivantes (cf. Maier et Rechtin (2000) dans [Bartolomei et al., 2011]) : Qui en bénéficie? Qui paie? Qui fournit? Et qui perd? Ensuite, les auteurs proposent une combinaison des matrices, par exemple celle des parties prenantes avec celles des objectifs. Chaque partie prenante a ses propres objectifs, et les autres parties prenantes peuvent déclarer leur appui, leur opposition, ou leur indifférence. Ce cadre permet de stocker des informations sur les positions des diverses parties prenantes qui peuvent être utilisées dans un modèle de jeu, pour analyser les stratégies et afin d'aligner leurs intérêts (cf. Dixit et Skeath, (2003) dans [Bartolomei et al., 2001]) sur un tutoriel sur la théorie des jeux et des applications dans le monde réel. Dans notre démarche, nous proposons un processus d'analyse de l'interdépendance pour l'identification des équilibres comme suit:

1. Analyse de l'environnement du système étudié,
2. Identification des parties prenantes,
3. Analyse des besoins des parties prenantes et identification des MOEs (leurs enjeux stratégiques selon leurs points de vue respectifs),
4. Identification et explication de l'interdépendance entre les stratégies, donc entre les parties prenantes,
5. Analyse du cycle de vie du système étudié et de son coût total de possession,
6. Réalisation d'une grille de distribution → la forme normale ou extensive du jeu.



7. Définition de quelques / plusieurs scénarios de distribution,
8. Recherche d'équilibres,
9. Si possible, proposition de coalitions entre des parties prenantes. Aller à 7.
10. Faire valoir les solutions d'équilibre.

Logiquement, le choix d'un équilibre architectural a un impact sur la conception du système étudié. Ce choix donne les premières orientations des choix qui se font tout au long du processus de conception. Il est garant à la fois de la stabilité de l'environnement après l'intégration du nouveau système et de la viabilité de ce dernier, notamment la viabilité économique par exemple. Cependant, une première difficulté dans la recherche d'équilibre est le fait qu'il n'est pas évident d'observer empiriquement l'émergence de comportements en adéquation avec un équilibre en stratégies mixtes. En effet, il n'y a aucune incitation stricte qu'un acteur joue la stratégie d'équilibre, et l'utilisation de stratégies aléatoires sous-entend l'utilisation d'hypothèses sur l'utilité espérée et d'hypothèses sur l'aversion vis-à-vis du risque [Koessler, 2008]. Une autre difficulté liée à la résolution des jeux est la disposition d'informations complètes ou d'informations incomplètes. Il n'est pas évident pour un joueur de connaître toutes les stratégies des autres joueurs sans passer des contrats de coopération. De plus, il est très difficile de formaliser les fonctions gains. On peut même être en face de gains non formalisables, tels que l'image de marque par exemple, où la notion de perception (empreinte de subjectivité) est importante. On peut aussi considérer l'apparition probable de nouveaux enjeux qui nous amène clairement dans des situations de décisions dans l'incertain.

Par ailleurs, la recherche d'équilibres architecturaux peut contribuer efficacement dans des projets de recherche industriels avancés. En effet, dans ce type de projets qui commencent presque d'une feuille blanche, la connaissance de toutes les parties prenantes autour du système qu'on veut concevoir tout au long de son cycle de vie n'est pas triviale alors qu'elle est primordiale. Pour chacune de ces parties prenantes, l'information sur ses attentes, premièrement et principalement stratégiques, pourrait alors être remplacée par une « connaissance » issue de modèles ou de simulations basées sur l'analyse de « l'histoire » des parties prenantes pressenties ou par un ensemble d'hypothèses raisonnablement prévisibles. On pourrait alors avoir autant de scénarios de combinaisons de stratégies que les outils informatiques le permettent. Cette étape sert comme base solide pour la définition du problème qu'on veut résoudre (les missions du système, à quoi servira-t-il) et ce n'est qu'à partir de là qu'on peut commencer la recherche de solutions.

### 3. CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

*“Mettre tout en équilibre, c'est bien ; mettre tout en harmonie, c'est mieux.”* Victor Hugo.

Nous avons présenté dans cet article un aperçu sur une approche de conception basée sur un cadre d'architecture de systèmes complexes, combinée avec des modèles d'optimisation. Cette démarche montre l'importance et l'utilité d'utiliser un cadre de conception d'architecture afin d'organiser et de structurer tous les points de vue qui permettent l'étude d'un système sociotechnique complexe avec une approche holistique sur tout son cycle de vie. Les modèles d'optimisation multi-objectifs et d'équilibre aident considérablement dans l'analyse des compromis et la prise de décisions. Les données utilisées dans ces problèmes d'optimisation sont issues des activités du processus d'Ingénierie Système. Elles sont formalisées dans les descriptions du système faites suivant le cadre d'architecture. Ce cadre sépare clairement la définition du problème et la conception des solutions grâce notamment à l'abstraction, où les contraintes de conception sont facilement identifiables par rapport aux variables de conception. D'autre part, cette approche montre l'importance de prendre en compte le cycle de vie du système dans la modélisation des problèmes d'optimisation. L'évaluation des propriétés du cycle de vie donne certains paramètres qui contribueraient efficacement à l'intégration du système dans son environnement. Nous avons illustré, dans d'autres articles, cette approche à travers des exemples pratiques liés aux véhicules électriques.

Cette approche permet aussi de réduire le coût des études d'ingénierie par l'utilisation de modèles de simulation capitalisables et réutilisables, cohérents avec les architectures opérationnelles, fonctionnelles et structurelles du système étudié, et par l'utilisation des méthodes d'optimisation. Ceci aide considérablement dans la gestion des variantes de conception et à l'adaptation des solutions aux contextes de leurs utilisations, et des marchés cibles, en réduisant le temps de conception ou le temps de mise sur le marché en général.

#### 4. RÉFÉRENCES

AFIS, 2009. Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. deuxième version expérimentale, ouvrage collectif AFIS (Association Française d'Ingénierie Système). Version 5.05 –9 janvier 2009

Bartolomei J.E., Hastings D. E., de Neufville R. et Rhodes D. H.: Engineering systems multiple-domain matrix: An organizing framework for modeling large-scale complex systems ; MIT, Accepted 24 février 2011, Publié en ligne 10 octobre 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

Chalé Góngora H. G., Dauron A. et Gaudré T.: A commonsense-driven architecture framework - Part 1: A car manufacturer's (naïve) take on MBSE ; in proceedings of the INCOSE International Symposium (Rome, IT). San Diego: INCOSE, 2012.

Coello Coello, C.A., Multiobjective Optimization Website and Archive: <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/> (dernière mise à jour le 23 février 2010)

de Weck, O.L. 2006. "Multiobjective optimization: History and promise". in China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, s. d.

de Weck, O.L., Roos D. and Magee C.L.2011. Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World. The MIT Press, octobre 2011.

Doufene A., Chalé-Góngora H. G. et Krob D.: Complex systems architecture framework. extension to multi-objective optimization ; International conference, Complex Systems Design and Management, CSDM, Paris décembre 2012. Proceedings published in the "Science and Engineering" series by Springer.

Doufene A., Chalé-Góngora H. G. et Krob D. Sharing the total cost of ownership of electric vehicles: A study on the application of game theory; 23rd Annual INCOSE International Symposium, 2013, Philadelphie, USA.

Doufene A.: Architecture des systèmes complexes et optimisation. Application aux véhicules électrique ; Thèse de Doctorat, École Polytechnique, mars 2013.

Friedenthal S., Moore A. et Steiner R.: A practical guide to SysML - The Systems Modeling Language, Morgan Kaufmann, 2008.

Guerrien B.: La théorie des jeux ; Economica, Collection « Poches », 4e édition parue en 2010.

INCOSE, Systems Engineering Handbook. A guide for system lifecycle processes and activities. International Council on Systems Engineering (INCOSE), janvier 2010.

Koessler F. 2008, Théorie des jeux, support de formation. Ecole polytechnique, 2008. disponible sur <https://sites.google.com/site/frederickoessler/teaching> (accès juin 2012).

Krob D., Eléments d'architecture des systèmes complexes, in "Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques", A. Appriou, Ed., 179-207, CNRS Editions, 2009.

Krob D., Enterprise Architecture, Modules 1-10, École Polytechnique, 2009-2010 (communication personnelle).

Krob D., Eléments de systémique - Architecture de systèmes, [in Complexité-Simplexité, A. Berthoz - J.L. Petit, Eds.], Editions Odile Jacob, 2012 (à paraître)

Lawson, C. M., 2008. Group decision making in a prototype engineering system : the Federal Open Market Committee. Dissertation de thèse, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

Meinadier J.-P.: Ingénierie et intégration de systèmes ; Hermès, 1998.

Meinadier J.-P.: Le métier d'intégration de systèmes ; Hermès-Lavoisier, 2002.

Marler, R.T., et Arora J.S. 2004. "Survey of multi-objective optimization methods for engineering". Structural and multidisciplinary optimization 26, no. 6 p. 369–395.

Penalva J.M., La modélisation par les systèmes en situations complexes, PhD Thesis, Université de Paris 11, Orsay, France. 1997.

Smaling R. M.: System architecture analysis and selection under uncertainty". PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005..

Weilkiens T., Systems Engineering with SysML / UML – Modeling, Analysis, Design. Morgan Kaufmann Publishers, 2008.

## Biographies des auteurs



**Abdelkrim Doufene** est actuellement (2014) en post-doc au sein de Engineering Systems Division au MIT (USA). Son travail actuel se focalise sur l'architecture des systèmes sociotechniques complexes à très grande échelle, particulièrement la désalinisation de l'eau de mer et l'énergie solaire. Ses intérêts de recherche portent sur l'architecture de systèmes complexes, systèmes d'aide à la décision, systèmes d'information géographique, optimisation multidisciplinaire, théorie des jeux, analyse de données, etc.

Abdelkrim Doufene a obtenu un doctorat de l'École Polytechnique en France en 2013. Il est aussi diplômé du programme doctoral en management de ParisTech - ENPC. Il possède un diplôme de Master 2 - systèmes d'information et de décision de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, l'ESSEC et CNAM. Il est également diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Informatique en Algérie en tant qu'ingénieur des systèmes d'information. Il a travaillé en tant qu'ingénieur de recherche dans le département R&D (Programme Véhicules Électriques) pour le constructeur automobile Renault (2010-2013). Il a également enseigné dans plusieurs universités et écoles.



**Hugo Guillermo Chalé Góngora** est Ingénieur Système chez ALSTOM Transport, où il participe également au développement et au déploiement de l'Ingénierie Système à base de modèles (MBSE). Il a plus de 12 années d'expérience dans la définition et l'adaptation des processus, méthodes et outils de l'IS à la conception de produits et systèmes complexes. Parmi ses thèmes d'intérêt, on peut citer les systèmes critiques, les méthodes formelles, les langages de description d'architectures et, plus récemment, les systèmes autonomes. Le Dr Chalé est l'ancien leader et fondateur du Groupe de Travail Automobile de l'INCOSE.



**Alain Dauron** est ingénieur de l'École Polytechnique. Diplômé en 1984. Il a obtenu par la suite un doctorat à l'Université de Paris IX Dauphine dans le domaine de l'automatique appliquée au contrôle du moteur à combustion interne. C'était son premier emploi en tant qu'ingénieur de recherche Renault, dans le cadre d'une collaboration avec l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique). Il a ensuite construit et dirigé un groupe de recherche en charge des activités d'automatique pour des projets de recherche et études avancées (R&AE). Après avoir rejoint la division de la mécanique en 1998, il a eu plusieurs postes d'encadrement dans le domaine du contrôle et de la mise au point du groupe motopropulseur, puis il est devenu chef du département développant les systèmes de contrôle du groupe motopropulseur. Revenu en 2007 en R&AE, il a dirigé le service d'ingénierie des systèmes en amont, visant à appliquer l'ingénierie des systèmes (IS) dans des projets R&AE et à améliorer les méthodes et outils IS. De 2011 à 2013, il a également piloté un projet de recherche sur la mobilité à long rayon d'action à base de véhicules électriques. Il est maintenant responsable d'un service en charge des processus, méthodes et outils pour l'IS. Ses principaux intérêts dans le domaine de l'IS sont ingénierie des exigences, V&V des systèmes, IS et lignes de produits, MBSE, et le couplage de l'IS avec le calcul / optimisation. Il représente Renault au conseil d'administration de l'AFIS (chapitre français de l'INCOSE), et est l'un des deux "co-chairs" du groupe de travail "Automobile" à l'INCOSE.



Ancien élève de l'École Normale Supérieure (1981-1986), agrégé de mathématiques (1983), docteur en informatique de l'université Paris 7 (1988), habilité à diriger des recherches en informatique de l'université Paris 7 (1991), **Daniel Krob** est à la fois professeur de l'École Polytechnique (depuis 2000) et directeur de recherche au CNRS – en poste dans le Laboratoire d'Informatique de l'École Polytechnique (LIX ; UMR 7061).

Daniel Krob a exercé de nombreuses responsabilités dans le domaine académique : il a ainsi été secrétaire scientifique de la 7ème section (Sciences et technologies de l'information) du Comité National de la Recherche Scientifique (1991/95), directeur des deux groupements de recherche du CNRS « Mathématiques et informatique » (1995) et « Algorithmique, Modèles et Infographie » (1996-1997), et fondateur du « Laboratoire d'Informatique Algorithmique : Fondements et Applications » (CNRS et Université Paris 7) qu'il a dirigé de 1997 à 2002. Il a également mis en place en 2001 & dirigé

jusqu'en 2007 l'ensemble des masters spécialisés de l'Ecole Pour l'Informatique et les Techniques Avancées (EPITA), l'une des grandes écoles d'ingénieur françaises de référence en informatique.

Daniel Krob dirige actuellement la chaire d'« Ingénierie des systèmes complexes » de l'Ecole Polytechnique dans le cadre d'un partenariat entre la société Thales et l'Ecole Polytechnique. C'est dans cette chaire qu'il travaille sur des problématiques de modélisation & d'architecture de systèmes et de conception & d'organisation industrielle qui sont maintenant au cœur de son activité scientifique. Il pilote notamment dans cette logique le master « Conception & Management des Systèmes Informatiques Complexes » qu'il a créé en 2005. Il est également président de l'association C.E.S.A.M.E.S. qui est une émanation de la chaire en charge de la promotion de l'Architecture des Systèmes dans le monde professionnel comme outil au service de la maîtrise des délais & des risques des grands projets technologiques. Sa biographie complète est disponible sur son site web <http://www.lix.polytechnique.fr/~dk/>