



HAL
open science

Modèles de spécification fonctionnelle de la commande des systèmes de production : synthèse de trois études de cas

Laurent Piétrac, Guy Timon, Bruno Denis, Jean-Jacques Lesage, Jean-Marc Roussel

► To cite this version:

Laurent Piétrac, Guy Timon, Bruno Denis, Jean-Jacques Lesage, Jean-Marc Roussel. Modèles de spécification fonctionnelle de la commande des systèmes de production : synthèse de trois études de cas. Journée PRIMECA - Les systèmes de production 1994, Dec 1994, Aubière, France. pp.41-48. hal-03744964

HAL Id: hal-03744964

<https://hal.science/hal-03744964>

Submitted on 3 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODÈLES DE SPÉCIFICATION FONCTIONNELLE DE LA COMMANDE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION : SYNTHÈSE DE TROIS ÉTUDES DE CAS.

Laurent PIETRAC, Guy TIMON, Bruno DENIS,
Jean-Jacques LESAGE et Jean-Marc ROUSSEL
Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
61, avenue du président Wilson 94235 Cachan cedex FRANCE
Tél. : (33-1) 47-40-22-15, FAX : (33-1) 47-40-22-20.

RÉSUMÉ :

Cet article présente la synthèse de trois études de cas portant sur la modélisation des spécifications fonctionnelles de systèmes de production. Ces études ont été réalisées par le LURPA, deux pour le compte de l'EXERA (SEDEM-91 et RAFALE-X54), et une pour EDF - Direction des Etudes et Recherches (RCV). Après avoir succinctement présenté les systèmes étudiés, nous dégagons les enseignements de chacune de ces études, puis une conclusion générale portant sur l'ensemble des trois études est proposée.

INTRODUCTION

Dans tous les domaines de la conception, qu'il s'agisse de systèmes mécaniques, de systèmes informatiques... la phase de spécification fonctionnelle est depuis longtemps identifiée comme étant particulièrement stratégique, sur le plan technique comme sur le plan économique. La conception de la commande des systèmes de production n'échappe pas à cette règle, et de ce fait de nombreuses énergies de recherche sont consacrées à l'amélioration de l'efficacité de la spécification fonctionnelle, tant dans le milieu universitaire que dans le milieu industriel. Ce thème est l'un des domaines d'intérêt du LURPA, et depuis 1991 deux contrats de recherche ont été menés en collaboration avec l'industrie de manière à parfaire la perception des réels problèmes posés par le traitement d'études de cas. C'est le contexte et les conclusions générales de ces études de cas que nous allons exposer dans la suite de cet article. Les modèles, résultats de nos études, ne sauraient être développés in extenso dans cet article. C'est pourquoi, plutôt que d'en donner une vue très parcelaire, et donc réductrice, nous ne développons que les conclusions générales des études de cas en renvoyant le lecteur aux rapports de fin de contrat.

Depuis 1985, les industriels de la Commission Technique (CT) Systèmes d'Automatisation de la Production (SAP) de l'EXERA travaillent sur les problèmes d'intégration des systèmes, en particulier au stade de la conception. Dans le cadre de ses travaux, la commission a confié au LURPA la réalisation de deux études de cas destinées à rechercher des techniques de modélisation propres à assister la phase de «structuration fonctionnelle». Le but de cette phase est de permettre une vérification de la complétude (complétude relative, c'est-à-dire vérifier qu'aucune donnée essentielle à la conception n'a été négligée) et de la cohérence de l'expression des besoins. Pour cela l'expression textuelle des besoins est traduite en une représentation fonctionnelle structurée et formalisée, reflétant la compréhension du concepteur sur ce que doit réaliser le futur système. Pour ce faire, des techniques de modélisation venant de domaines scientifiques divers (automatique, informatique de gestion ou scientifique, temps réel, ...) ont été évaluées alors qu'elles étaient appliquées à des systèmes parfois situés bien loin de leur domaine privilégié. Ces deux études de cas sont :

- l'étude du contrôle-commande d'un procédé à dominante continue : SEDEM-91 qui est une usine de dessalement d'eau de mer [1] ;
- l'étude du pilotage et supervision d'un processus manufacturier : RAFALE-X54 qui est une ligne de montage d'équipements automobiles en «rafales» [2].

Pour sa part, ELECTRICITE DE FRANCE mène actuellement un important programme de structuration et de formalisation du cycle de développement de la commande de ses installations nucléaires. A la suite de la parution des résultats des études de cas précédentes, EDF a demandé

au LURPA de constituer une base documentaire permettant d'évaluer l'intérêt et les limites des méthodes d'analyse fonctionnelle pour la modélisation des parties mécaniques [3] et du contrôle-commande [4] de ses installations nucléaires et thermiques classiques. La partie de cette étude présentée ici porte sur le contrôle-commande du circuit de contrôle chimique et volumétrique (RCV) [5].

Dans la suite de cet article nous allons tenter de dégager les apports de ces trois études de cas. Nous allons tout d'abord présenter successivement les différents systèmes étudiés et les enseignements à en tirer. Nous présenterons ensuite une conclusion relative à l'ensemble de ces trois études.

Il est important de préciser que toutes les techniques utilisées ont été choisies en particulier sur le critère d'existence d'un outil informatique d'édition et d'analyse syntaxique des modèles.

SEDEM-91

Présentation du système

Le processus étudié est une unité de dessalement d'eau de mer par électrodialyse. Il peut être représenté par la figure 1 qui montre la circulation des fluides (eau courante, eau de mer, eau dessalée et eau chargée de résidus) dans les différents circuits (primaire, secondaire et de rinçage) ainsi que les cuves et l'électrodialyseur. Le processus est découpé en quatre zones fonctionnelles : le stockage des produits, le stockage des résidus, les circuits, et l'électrodialyse.

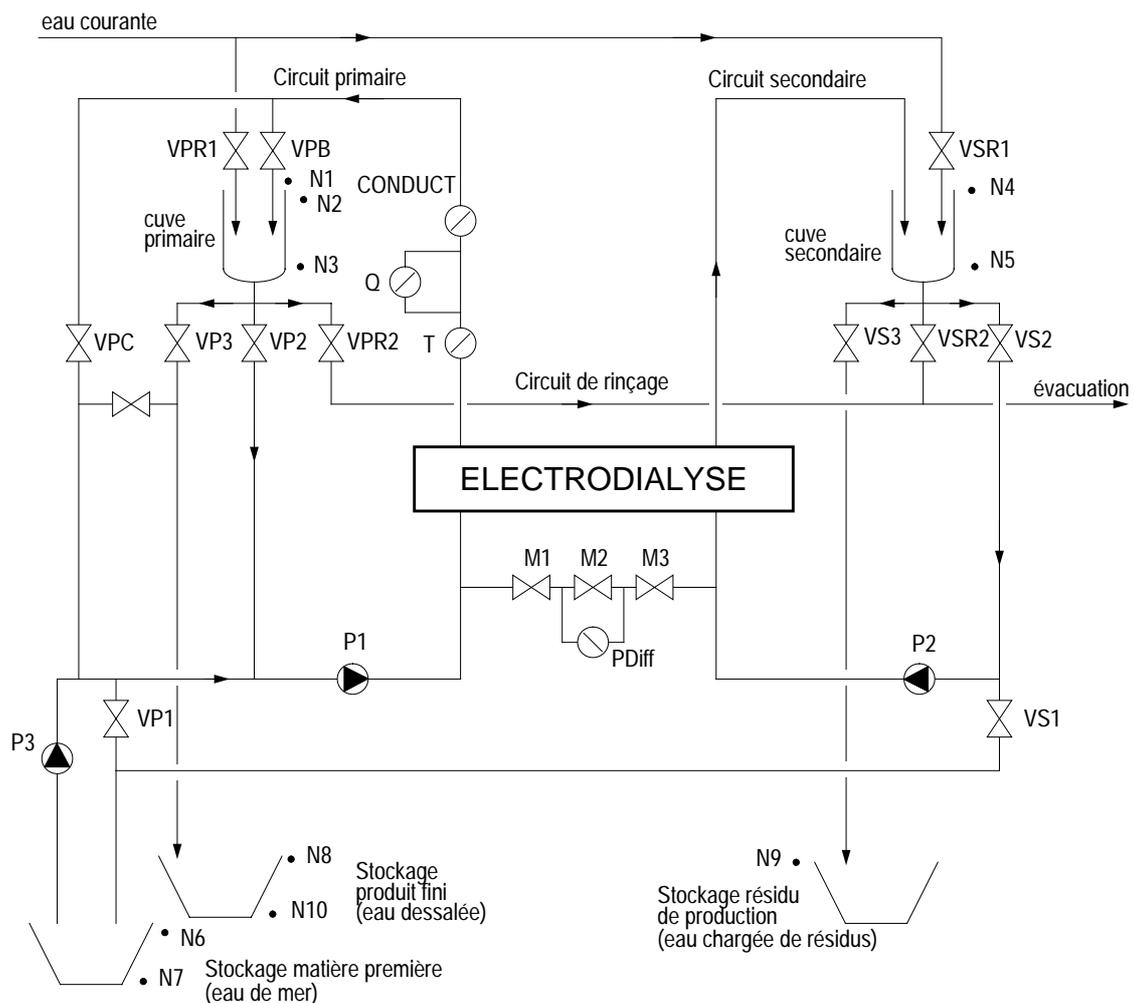


Fig. 1 : processus de SEDEM-91

La production normale s'effectue par quantités finies de matière première appelées lots et s'articule autour de trois phases : la phase d'initialisation qui n'est possible qu'à partir de l'état repos normal, puis la phase de traitement et enfin la phase de récupération du produit fini. Un certain nombre de modes opératoires normaux (manuel, automatique, semi-automatique, et pas à pas) sont prévus ainsi que divers transitoires (mise en arrêt normal...) essentiellement pour le début et la fin de journée. Quatre situations d'incident sont répertoriées (arrêt d'urgence, arrêt sur défauts capteurs-actionneurs, surveillance de la pression différentielle et surveillance de la température) et pour chacune d'entre elles des procédures d'intervention et de reprise sont définies.

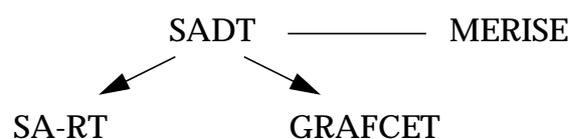
Toutes ces caractéristiques du fonctionnement du processus montrent que, bien que le procédé soit de type batch, les procédures de fonctionnement sont séquentielles. En d'autres termes la modélisation dynamique de la partie «Système à événements discrets» de ce système de production revêt une importance particulière.

Conclusions de l'étude

La commission SAP de l'EXERA a souhaité pour cette étude examiner en priorité l'apport des techniques de modélisation les plus largement utilisées sur le marché français par la communauté des automaticiens et des informaticiens. Les techniques de modélisation retenues ont été SADT [6], SA-RT [7], MERISE (MCD et MCT) [8], et GRAFCET [9].

Notre étude a corroboré le fait qu'aucune des techniques de modélisation couramment utilisées ne permet d'appréhender tous les aspects de la commande d'un SAP. Il est cependant important de constater que SADT, GRAFCET et MERISE ont apporté des points de vues complémentaires. Le cas de SA-RT est spécifique puisque la couverture de modélisation de cette méthode est particulièrement large.

Les techniques de modélisation retenues sont donc plus complémentaires que concurrentes (hormis pour SA-RT qui aborde tous les points de vue mais qui est plus destinée à la conception qu'à la spécification). Le choix délibéré d'appliquer ces techniques en parallèle a mis en évidence des difficultés pour démarrer certains modèles (syndrome de la feuille blanche). Une démarche chronologique d'utilisation de ces techniques pourrait conduire à une meilleure exploitation de leur complémentarité. Cette démarche serait la suivante : dans un premier temps, une analyse fonctionnelle et une analyse du système d'information peuvent être menées en parallèle (SADT et MERISE) pour dégager des éléments structurant de haut niveau, et élaborer dans un deuxième temps les modèles SA-RT et GRAFCET qui permettent une modélisation d'une finesse plus grande.



Les conclusions relatives à chaque technique de modélisation sont les suivantes :

- l'intérêt d'une modélisation GRAFCET pour ce SAP «batch» est finalement plus grand qu'initialement espéré. L'aspect dynamique de cette installation étant en fait prépondérant dans le cahier des charges. Toutefois, les difficultés rencontrées pour la prise en compte des modes de marche nous conduisent à préconiser l'emploi d'un outil tel que le GEMMA ;
- SADT semble être le complément indispensable pour donner une vue à la fois formelle et «lisible» du cahier des charges d'un SAP ;
- SA-RT ne nous est pas apparue aussi performante en conception de SAP qu'en génie logiciel. L'intégration de cette méthode ne nous a pas semblé déterminante par rapport à l'emploi conjoint de SADT, MERISE et GRAFCET ;
- les spécificités de SEDEM-91 (essentiellement le peu de poids accordé dans le cahier des charges au système d'information) n'ont pas permis de révéler les possibilités de la méthode MERISE (dans sa phase conceptuelle). Néanmoins, cette étude nous a permis de mettre en

évidence que, pour la phase de structuration fonctionnelle, les apports des MCD et des MCT sont relativement disjoints. En effet, si un modèle de données, construit en utilisant le formalisme du MCD, peut toujours être élaboré et présente un intérêt certain pour la structuration fonctionnelle, un modèle des traitements, construit en utilisant le formalisme du MCT, ne présente de réel intérêt que si le cahier des charges du SAP modélisé consacre une plus large part à la description des manipulations des données.

RAFALE - X54

Présentation du système

Le processus étudié est cette fois un atelier de montage de trains arrières de véhicules automobiles. Cet atelier, illustré au niveau de sa structure par la figure 2, comprend une ligne principale de montage et deux sous-ensembles de préparation, pour un total de 21 postes d'assemblage et de contrôle. La production y est organisée par lots appelés rafales. Cet atelier est sous le contrôle d'un superviseur, dont le rôle est essentiellement d'assurer le lancement et le suivi de la production en liaison avec le système de gestion de production. Ce processus peut être considéré comme étant représentatif des systèmes manufacturiers.

Les aspects essentiellement décrits dans le cahier des charges sont relatifs :

- au rôle des différents postes qui constituent l'atelier de montage en termes de moyens utilisés, de principes et modalités de fonctionnement et d'informations échangées avec le superviseur ;
- au fonctionnement spécifié du processus au travers principalement des modes de marche de l'atelier et du superviseur ;
- aux liens avec la gestion de production.

Pour le fonctionnement spécifié du processus, il est explicitement indiqué que la production sur la ligne de montage doit pouvoir se poursuivre en cas d'arrêt du superviseur. Ce qui implique d'autres moyens de lancement qui seront manuels. Ceci a également pour conséquence des fonctionnements «indépendants» du superviseur et de l'atelier de montage.

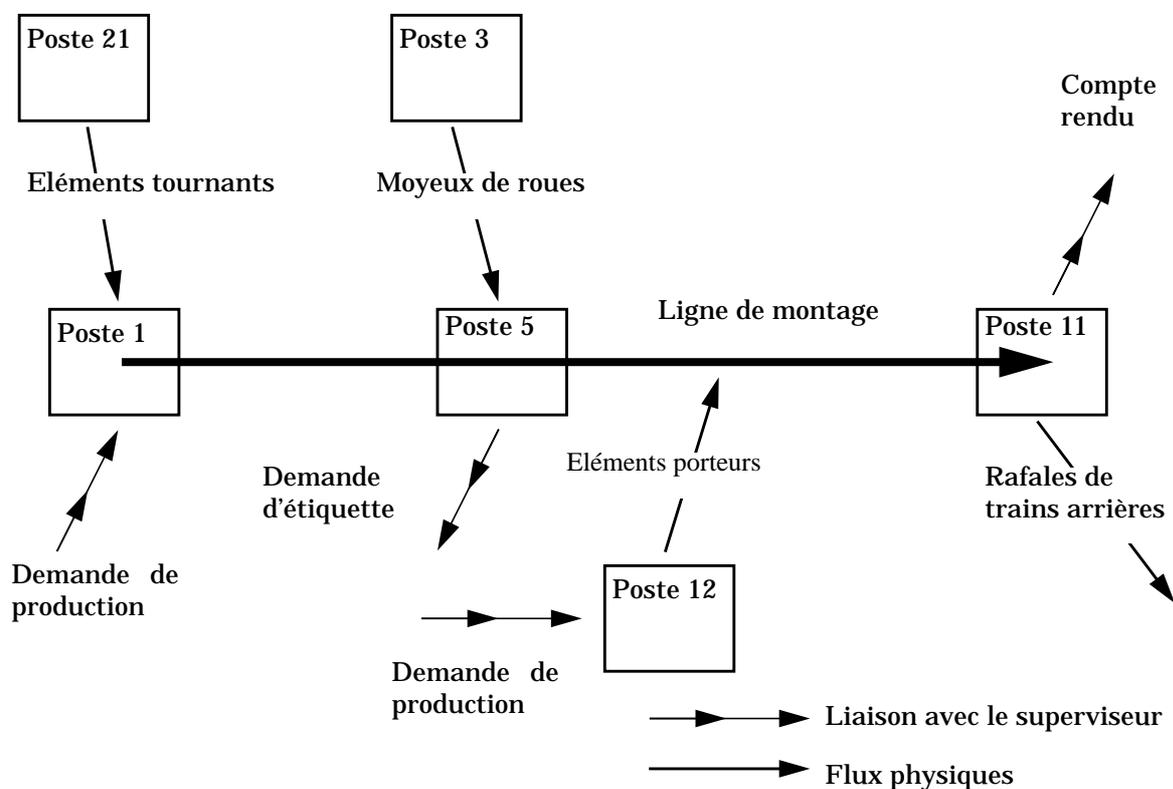


Fig. 2 : structure schématique de la ligne de montage

Le lien entre le superviseur et la gestion de production décrit essentiellement la forme sous laquelle sont définis les programmes journaliers de livraison à l'usine cliente. Ces programmes déclarés de manière anticipée (à J+2 et J+3) sont découpés en tranches horaires auxquelles correspond un certain nombre d'unités de livraison (rafales de trains arrières à produire). C'est à partir de ces programmes que le superviseur élabore le plan de lancement de la production dont il gère lui-même l'exécution par l'envoi de demandes de production et le suivi de divers comptes-rendus.

Conclusions de l'étude

Après avoir examiné dans la première étude de cas l'apport des techniques de modélisation les plus largement utilisées sur le marché français par la communauté des automaticiens et des informaticiens, la commission SAP a souhaité compléter cette étude en abordant deux techniques de modélisation complémentaires aux précédentes : le GEMMA [10] et l'APPROCHE OBJET [11]. Par contre, suite aux conclusions de SEDEM-91, le GRAFCET et SA-RT n'ont pas été retenus. Les techniques de modélisation utilisées ont donc été SADT, OBJET (Coad et Yourdon) MERISE et GEMMA.

Cette seconde étude a confirmé le fait qu'aucune des techniques de modélisation couramment utilisées ne permet d'appréhender tous les aspects d'un SAP. Pour le cas RAFALE-X54, SADT, GEMMA et MERISE ont apporté des points de vues complémentaires sur l'installation. Le cas de l'Approche OBJET est spécifique puisque la couverture de modélisation de cette technique est particulièrement large.

Les points essentiels des conclusions relatives à chacune des techniques de modélisation employées au cours de cette étude sont les suivants :

- il se confirme que SADT semble être le complément indispensable pour donner une vue à la fois formelle et «lisible» du cahier des charges d'un SAP, essentiellement à un haut niveau d'abstraction ;
- le grand nombre d'objets non organiques (relatifs au système d'information) a rendu délicat le processus de modélisation par l'approche objet adoptée (Coad et Yourdon). Cependant, le modèle produit semble intéressant à ce niveau de l'étude. En effet les objets étant des entités très autonomes, il est relativement aisé d'évaluer les conséquences de l'affectation d'un objet dans un élément d'une architecture opérationnelle ;
- à l'opposé des conclusions relatives à SEDEM-91, la méthode MERISE (dans sa phase conceptuelle) a montré tout le potentiel que l'on peut tirer d'une description des données, d'une part, et des traitements d'autre part (à l'opposé de l'Approche Objet qui regroupe ces mêmes notions sur un modèle unique). La présence de contraintes organisationnelles et d'éléments de choix de conception (organisation temporelle de la liaison entre la gestion de production et le superviseur par exemple) a conduit l'analyste à présenter également un Modèle Organisationnel des Traitements pour représenter ces informations ;
- l'utilisation du GEMMA sur cette étude de cas s'est avérée intéressante pour un système dont on ne connaît pas encore l'architecture de conduite. De par la structure du guide graphique GEMMA, cette méthode constitue un excellent moyen pour vérifier la complétude de la description des modes de marche fournie dans l'expression textuelle des besoins.

LE CIRCUIT RCV

Présentation du système

Le circuit RCV (fig. 3) étudié est intégré au sein des centrales à eau pressurisée à deux circuits principaux (primaire et secondaire) dites de type REP, de puissance électrique 900 MW par tranche. Le RCV fait partie des nombreux circuits auxiliaires ou de sauvegarde (de l'ordre de 200 circuits) nécessaires pour assurer la disponibilité et la sûreté du fonctionnement d'une tranche. De part son importance, le circuit RCV ne comporte pas de lien inter-tranches (les interactions entre les différentes tranches n'ont donc pas été prises en compte dans notre étude).

Le fonctionnement d'une tranche nucléaire est bâti autour du circuit de refroidissement primaire (RCP). Le RCP transfère la chaleur engendrée dans le cœur du réacteur vers le généra-

teur de vapeur où elle est utilisée pour vaporiser l'eau du circuit secondaire et produire ainsi la vapeur destinée à entraîner la turbine. Le circuit RCV a pour fonctions principales la régulation d'eau dans le RCP, le contrôle chimique du fluide primaire (concentration en bore, teneur en gaz dissous, produits de corrosion...) et l'étanchéité des pompes primaires ; il est donc typiquement continu. Cependant, les fonctions à assurer par le RCV changent suivant les différents états de la tranche et de ses composants. De même, les fonctions des organes du RCV évoluent suivant les états du circuit RCV et des autres circuits. De plus une fonction peut au même moment être assurée par plusieurs organes, un organe donné pouvant lui-même assurer plusieurs fonctions en même temps.

La commande des actionneurs et la surveillance du fonctionnement du circuit RCV s'effectuent en général depuis la salle de commande (SdC) ou parfois - pour les organes les plus importants - depuis le panneau de repli (PdR). La partie commande ne comporte que très peu d'automatismes séquentiels ou d'asservissements, elle n'est en fait qu'une énorme «boîte à boutons», où chaque bouton correspond à la commande d'un actionneur. Cependant les ordres donnés par l'opérateur sont conditionnés par des procédures de conduite indiquant la façon de réagir suivant les problèmes rencontrés ou les états à atteindre. Ces procédures sont actuellement présentées sous forme textuelle.

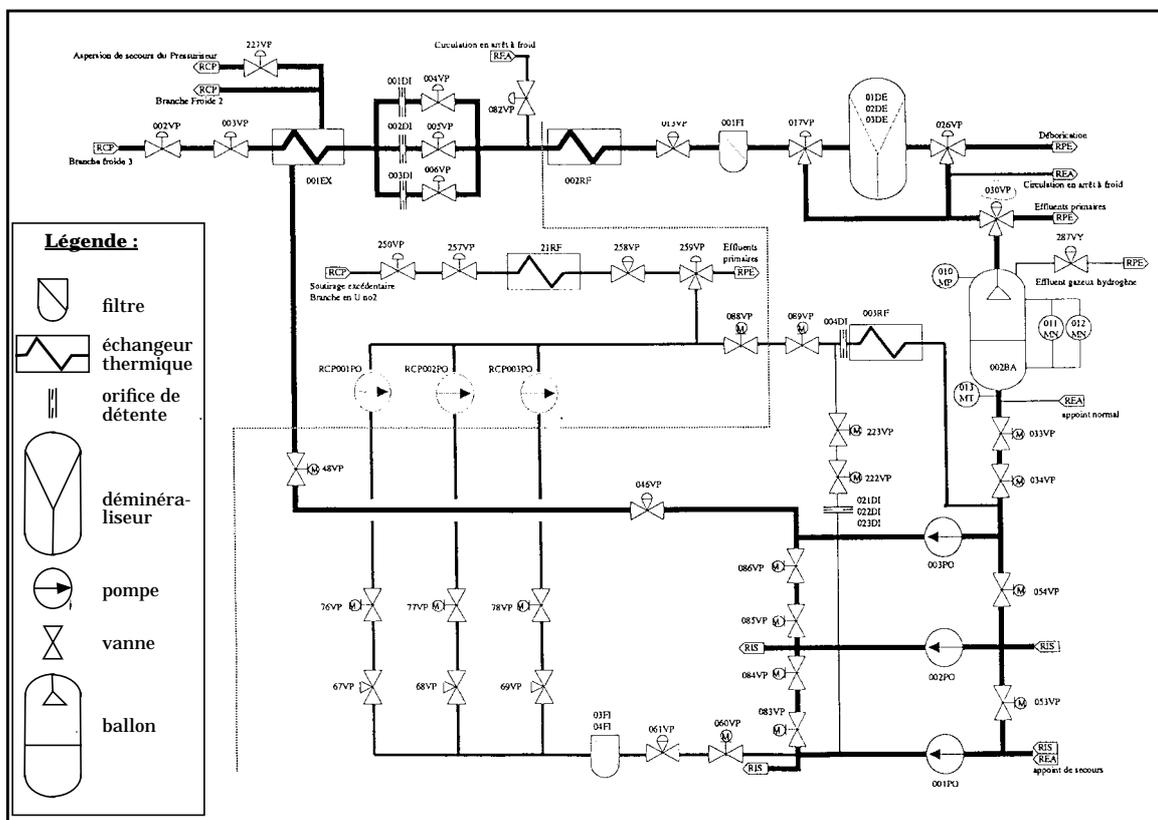


Fig. 3 : schéma simplifié du RCV

Conclusions de l'étude

EDF souhaitait constituer une base documentaire permettant d'évaluer l'intérêt et les limites des techniques d'analyse fonctionnelle pour la modélisation des parties opératives et du contrôle-commande. Suite à la parution des rapports de SEDEM-91 et RAFALE-X54, EDF a donc demandé au LURPA de modéliser le contrôle-commande du RCV en utilisant les techniques déjà utilisées dans ces deux études : SADT, GEMMA, GRAFCET, OBJET et SA-RT.

Les conclusions relatives à l'utilisation des techniques de modélisation pour le circuit RCV ont été

les suivantes :

- il a été établi dans cette étude que SADT ne permet pas de représenter efficacement des systèmes multi-fonctionnels et multi-états. En effet même en ayant fait le choix de ne modéliser le système que dans un état choisi (le fonctionnement normal), il a été très difficile de représenter toutes les fonctions du RCV, de ses composants et surtout de représenter les liens entre les différentes fonctions. De plus, l'indépendance des différentes fonctions nous a conduit à construire des modèles dont les activités ne partagent que les données d'entrée et de contrôle : il n'y a pratiquement pas de flux de données entre elles ;
- deux approches d'utilisation du GEMMA ont été envisagées pour la modélisation du contrôle-commande de RCV. La première a consisté à modéliser les automatismes du contrôle-commande. Ces automatismes sont indépendants des régimes de fonctionnement, le modèle obtenu représente donc des fonctions sans tenir compte des états. Ceci ne nous semble pas correspondre à la meilleure utilisation possible d'un modèle d'états. La deuxième approche, plus classique, a consisté à modéliser les évolutions du système entre et dans ses différents états. Le problème a alors été de remplir les rectangles du GEMMA, puisque le contrôle-commande a peu d'automatismes ;
- tous les grafjets représentant le contrôle-commande d'un organe du RCV ne comportent qu'un nombre limité d'étapes et des réceptivités finalement assez simples, ils sont donc très lisibles. Le modèle représentant le contrôle-commande du RCV dans sa totalité ne permettrait cependant pas de fournir une vue synthétique de ce contrôle-commande car il serait composé d'un grand nombre de grafjets partiels sans liens structurels ou fonctionnels. Néanmoins le GRAFCET a l'avantage d'être évaluable par des outils informatiques permettant de vérifier la cohérence et la complétude des modèles par rapport aux spécifications [12] ;
- les modèles OBJET réalisés fournissent une modélisation très proche de la structure physique du contrôle-commande. Cependant les seules fonctions représentées sont les fonctions techniques des objets (au sens de l'analyse fonctionnelle [13]), fonctions qui sont représentées sous forme de services rendus par les objets. Ces modèles sont donc de peu d'intérêt dans une phase de spécification fonctionnelle ;
- SA-RT permet, grâce aux diagrammes SA, une description fonctionnelle du système modélisé. Cette description s'est avérée relativement aisée en raison de l'absence de contraintes comme celles des actigrammes de SADT (trois à six activités, données en entrée, contrôle,...). Pour la partie explorée du modèle (qui n'est pas exhaustif, vu l'ampleur du système), l'absence quasi générale de condition d'enchaînement et de description de commande séquentielle nous a conduit à ne pas utiliser de flux de contrôle. L'utilisation de SA-RT nous a semblé intéressante sur deux points essentiels : la possibilité de conserver la structure des diagrammes de flots de données de haut niveau pour l'étude de la partie opérative et de la partie commande, ainsi que la structuration aisée des spécifications des process terminaux ;
- les modèles de données réalisés illustrent les capacités du MCD à proposer une expression rigoureuse de tous les aspects statiques d'un système d'information. De plus la généralité des modèles construits permet d'envisager une utilisation «universelle» dans le cadre des centrales EDF. Le MOT nous a permis d'exprimer clairement le contexte des traitements réalisés par le contrôle-commande. Les modèles de traitement sont spécifiques à chaque composant, on peut noter toutefois, qu'une trame quasi-générique peut être définie au travers de procédures génériques. Pour conclure sur ces modèles de données et de traitements de données, il convient d'indiquer que nous avons pu dans cette étude suivre le déroulement naturel de la méthode MERISE, bien qu'appliquée dans ce cas précis à un système d'information technologique destiné au contrôle-commande d'un système hybride.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce papier a présenté la synthèse des conclusions sur l'apport de techniques de modélisation pour la structuration fonctionnelle du contrôle-commande de systèmes de production, appliquées à trois études de cas. Ces trois cas d'application présentent l'intérêt d'appartenir chacun à des domaines particuliers : processus manufacturier, processus batch automatisé de petite ampleur et processus continu peu automatisé de très grande ampleur.

Ces trois études nous ont permis d'évaluer les possibilités de modélisation fonctionnelle de chacune des techniques utilisées pour des systèmes différents. Il a ainsi été mis en évidence qu'aucune de ces techniques ne peut prétendre répondre à l'ensemble des besoins pour l'étude de la commande d'un système complexe. Par contre les trois études ont mis en évidence la complémentarité de diverses techniques qui, utilisées en parallèle, permettent d'aborder plusieurs aspects du système ou, utilisées successivement, permettent d'approfondir, d'affiner l'analyse.

Dans tous les cas, l'utilisation conjointe de plusieurs techniques de modélisation dans une même méthode de spécification pose l'important problème de l'intégration entre les modèles réalisés. Deux approches différentes sont actuellement étudiées au LURPA pour résoudre ce problème :

- l'utilisation d'un formalisme unique pour constituer l'ensemble des spécifications d'une commande ; c'est l'objectif d'une étude en cours avec EDF - Direction des Etudes et Recherches ;
- l'intégration de divers modèles de spécification par méta-modélisation [14] [15].

BIBLIOGRAPHIE

[1] DENIS (Bruno), LESAGE (Jean-Jacques), ROUSSEL (Jean-Marc) et TIMON (Guy). — *Rapport de fin d'étude : SEDEM-91*. — Document EXERA N°S3609X92, avril 1992.

[2] DENIS (Bruno), LESAGE (Jean-Jacques), ROUSSEL (Jean-Marc) et TIMON (Guy). — *Rapport de fin d'étude : RAFALE-X54*. — Document EXERA, mai 1993.

[3] LESAGE (Jean-Jacques), PIETRAC (Laurent) et TIMON (Guy). — *Modélisation fonctionnelle des parties mécaniques des tranches nucléaires, analyse bibliographique et étude de cas RCV*. — Rapport de fin d'étude, contrat N°2L1117/EP619 entre EDF et le LURPA, septembre 1993.

[4] PIETRAC (Laurent) et TIMON (Guy). — *Modélisation fonctionnelle du contrôle-commande des tranches nucléaires, analyse bibliographique et étude de cas RCV*. — Rapport de fin d'étude, contrat N°2L1117/EP619 entre EDF et le LURPA, décembre 1993.

[5] PIETRAC (Laurent), LESAGE (Jean-Jacques), TIMON (Guy), CHERIAUX (François) et BRUNET (Marc). — *Spécification fonctionnelle du contrôle-commande de tranche nucléaire*. Actes du symposium international ADPM'94. — Bruxelles, 23-24 novembre 1994.

[6] IGL Technology. — *SADT : un langage pour communiquer*. — Ed. EYROLLES, 1989.

[7] HATLEY (Derek J.) et PIRBHAI (Imtiaz A.). — *Strategies for Real-Time System Specification*. — Dorset House Publishing, 1988

[8] TARDIEU (Hubert), ROCHFELD (Arnold) et COLLETTI (René). — *Méthode MERISE, Tome 1 : Principes et Outils*. — Editions d'Organisation, Paris, 1983.

[9] AFCET - ADEPA. — *Le GRAFCET*. — CEPADUES Editions, 1992.

[10] *GEMMA : Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts*. — Brochure éditée par l'ADEPA (Edition 2).

[11] COAD (Peter) et YOURDON (Ed). — *Object-Oriented Analysis*. — Prentice Hall, 1991, 2nd édition.

[12] ROUSSEL (Jean-Marc). — *Analyse de grafjets par génération logique de l'automate équivalent*. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. — A paraître, décembre 1994.

[13] AFNOR. — NF X 50 150. *Analyse de la valeur, Analyse fonctionnelle. Vocabulaire*. — Août 1990.

[14] DENIS (Bruno), LESAGE (Jean-Jacques) et TIMON (Guy). — *Toward a theory of integrated modelling*. Science et technique de la conception. — Vol. 2, n°1, 1993, pp. 87-96.

[15] LESAGE (Jean-Jacques), DENIS (Bruno) et TIMON (Guy). — *Une approche formelle de la modélisation*. Actes du symposium international «La conception en 2000 et au-delà, outils et technologies». — Strasbourg, 24-27 novembre 1992.