

# Formalisation d'une approche structurée de modélisation d'un système industriel complexe par Réseaux de Petri : application aux systèmes de production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds

F. Pérès<sup>1</sup>, S. Verron<sup>1</sup>, J.-P. Dejean<sup>2</sup> et D. Averbuch<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47, avenue d'Azereix, 65016 Tarbes Cedex - France

<sup>2</sup> Institut français du pétrole, IFP, Hélioparc, 2, avenue du Président Angot, 64000 Pau - France

<sup>3</sup> Institut français du pétrole, IFP, 1 et 4, avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

e-mail : francois.peres@enit.fr - sylvain.verron@enit.fr - j-pascal.dejean@ifp.fr - daniel.averbuch@ifp.fr

**Résumé — Formalisation d'une approche structurée de modélisation d'un système industriel complexe par Réseaux de Petri : application aux systèmes de production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds** — Le travail présenté dans ce papier a pour objectif de proposer une méthodologie de modélisation permettant de combiner au sein d'un même modèle différents processus (solicitation, défaillance, réparation, approvisionnement, etc.) concernant le système principal et son système de soutien. L'approche linéaire classiquement suivie dans la conduite de cet exercice met en évidence une difficulté de modélisation certaine due à la complexité et au nombre des aspects mis en jeu. Bien que l'approche apparaisse probante sur le plan des résultats, l'absence de structuration réduit la confiance susceptible d'être accordée aux modèles et implique en conséquence une attention accrue de la part du modélisateur. Pour résoudre ce problème, nous proposons une démarche structurée conduisant à la réalisation de Réseaux de Petri capables de prendre en compte à la fois l'aspect physique des systèmes étudiés mais aussi des notions plus immatérielles liées aux stratégies mises en place. La finalité de cette approche est l'évaluation globale de la performance technico-économique d'un système dans sa phase d'exploitation pour l'identification des meilleures solutions sur le plan de l'architecture des systèmes mais aussi de l'organisation mise en place pour les faire fonctionner. La démarche de structuration de la modélisation par Réseaux de Petri est d'abord présentée avant d'être appliquée au cas d'un système industriel.

**Abstract — Formalization of a Structured Approach for the Modelling of a Complex Industrial System by the Use of Petri Nets: Application to Ultra Deep Oil Production Systems** — The work presented in this paper aims to propose a methodology of modelling allowing to combine into a single model different processes (solicitation, failure, repair, supply, etc.) dealing with the main system but also with the logistic support system. The classical linear approach has to cope with a difficulty of modelling due to the complexity and the number of parameters of concern. Although the approach seems to be effective in term of results, the lack of structure reduces the confidence likely to be granted to the models and consequently implies an increased attention from the expert. In order to solve this problem, we propose a methodology leading to the building of Petri nets able to take into account both the physical aspects of the system and also more immaterial concepts related to actual strategies. The final goal of this approach is the global evaluation of the technico-economical performance of the system during its working period in order to identify the best solutions in term of system configuration and organization. The Petri nets modelling structured approach is first introduced before being applied to an industrial system.

## INTRODUCTION

L'évaluation de la performance technico-économique des systèmes complexes est rendue difficile par la multiplication des processus mis en jeu dans sa phase de vie utile. Tout système étant sujet à défaillance, les politiques de production doivent cohabiter avec des stratégies de maintien en conditions opérationnelles, elles-mêmes faisant appel à des logiques de soutien. Cette imbrication des processus rend l'évaluation de performance particulièrement délicate à modéliser par des voies analytiques classiques. Les approches traditionnellement considérées dans ce domaine s'appuient sur des logiques de découplage entre processus et des hypothèses simplificatrices conduisant à des résultats souvent peu représentatifs. La voie de la simulation par Réseaux de Petri s'affranchit de cette complexité analytique. La souplesse offerte par cet outil rend possible en outre l'intégration de phénomènes déterministes mais aussi, grâce à son association avec la simulation de Monte-Carlo, la prise en compte de processus stochastiques. Cette capacité à combiner différents types d'événements est particulièrement appréciable dans le cadre de la modélisation d'un système complexe dont la dynamique d'évolution dépend tout autant de décisions certaines comme de situations aléatoires. Les Réseaux de Petri stochastiques ont ainsi fait leur apparition en *Sûreté de Fonctionnement*. Le développement des concepts d'ingénierie concourante ayant contribué à l'introduction dès la phase de conception des systèmes de stratégies de maintenance mais aussi de soutien des installations rend malgré tout l'exercice de modélisation délicat. Un besoin de structuration se fait sentir. Ce papier a pour objectif de répondre à ce besoin en proposant une démarche organisée conduisant à la réalisation de Réseaux de Petri capables de prendre en compte à la fois l'aspect physique des systèmes étudiés mais aussi des notions plus immatérielles liées aux stratégies mises en place. La finalité de cette approche est l'évaluation globale de la performance technico-économique d'un système dans sa phase d'exploitation pour l'identification des meilleures solutions sur le plan de l'architecture des systèmes mais aussi de l'organisation mise en place pour les faire fonctionner. Le papier est divisé en trois parties. Une première partie est consacrée à un parcours bibliographique permettant de mettre en évidence l'originalité de notre approche. La démarche de structuration de la modélisation par Réseaux de Petri est ensuite abordée de façon générique puis dédiée respectivement en deuxième puis troisième partie. L'approche développée est finalement appliquée en quatrième et dernière partie dans le cadre de la modélisation des systèmes de production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds.

## 1 POSITIONNEMENT BIBLIOGRAPHIQUE

Si la simulation de Monte-Carlo et les Réseaux de Petri sont aujourd'hui répandus en *Sûreté de Fonctionnement*, peu de

travaux, à notre connaissance, les utilisent pour établir des modèles complets d'évaluation globale de la performance technico-économique d'un système. Les aspects de gestion du soutien logistique ne sont en particulier que très rarement pris en compte. Dans la majorité des cas, ils sont limités à l'évaluation du nombre de réparateurs à mettre en place pour assurer la disponibilité d'une installation. Ereau propose une description simple du soutien logistique d'une constellation de satellites (Ereau 1997). Signoret propose également le concept de mobilisation logistique pour des plates-formes pétrolières (Signoret 1996). Force est cependant de constater que la représentation du circuit d'approvisionnement logistique peut être beaucoup plus complexe. Van der Aalst a proposé dans cet esprit des modèles pour les systèmes logistiques de distribution (Aalst 1992). Chabot a, pour sa part, pris en compte l'intervention des équipes et les facteurs humains associés, non pas dans le cas d'opération de maintenance, mais dans le cas somme toute assez proche, d'intervention pour l'extinction d'incendie dans une centrale nucléaire (Chabot 1998). Il a, par ailleurs, couplé avec succès le logiciel de simulation de Réseaux de Petri stochastiques MOCA-RP, au code FLAMMES\_S, de simulation continue de la propagation de l'incendie, réalisant ainsi une simulation hybride.

Nous avons, pour l'heure, identifié trois cas où le Soutien Logistique est modélisé en tant que tel. Il s'agit d'abord des travaux de thèse de Jean-Christophe Grenouilleau (Grenouilleau 1999) qui a étudié des politiques d'approvisionnement en éléments de rechange pour le laboratoire orbital Columbus de la Station Spatiale Internationale. Il a d'abord modélisé le système lui-même qualifié de Segment Vol avec ses aspects dysfonctionnels puis intégré le soutien logistique via un Segment Transport prenant en compte les contraintes de chargement d'une navette spatiale et un Segment Sol caractérisant les différentes politiques de constitutions du stock de rechanges. Ces trois sous-modèles ont été représentés par Réseaux de Petri et assemblés dans un réseau global qui a été saisi et simulé. L'outil est actuellement utilisé par les décideurs de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le choix de la politique de ravitaillement optimal.

Dans la continuité des travaux de Grenouilleau et dans le cadre de la modélisation de la logistique de pièces de rechange des centrales nucléaires chinoises, Robert Garnier, de Schneider Electric, a effectué des développements récents prenant en compte en particulier des problèmes de péremption des rechanges stockés, de leur test et de leur éventuelle réparation (Garnier 2001).

Enfin il faut également citer le travail de thèse de Sylvain Perron (Perron 2002) dont une partie de la contribution est résumée dans ce travail. Mis à part cette dernière référence donc, les travaux que nous avons cités jusqu' alors, bien que probants sur le plan des résultats, demeurent relativement brouillons dans l'approche considérée pour mener à bien la modélisation des systèmes et de leur environnement. Cette

absence de structuration est préjudiciable à la confiance susceptible d'être accordée aux modèles et implique par voie de conséquence une attention accrue de la part du modélisateur. C'est pour résoudre ce problème que nous proposons dans ce papier une démarche structurée de modélisation de systèmes industriels complexes par Réseaux de Petri.

## 2 STRUCTURATION DE LA DÉMARCHE DE MODÉLISATION

Il apparaît clairement que la complexité des systèmes à représenter impose de structurer les modèles afin qu'ils satisfassent à des obligations d'évolutivité, d'intuitivité et d'aptitude à la validation. C'est ce à quoi nous nous attachons dans le cadre du paragraphe suivant. Dans un esprit scientifique et pour une utilisation par le plus grand nombre de notre approche, nous nous sommes efforcés de définir une structure générique, suffisamment flexible pour intégrer les spécificités de tout système industriel.

### 2.1 Concepts de couches et modules

Dans le cadre d'une évaluation globale des performances d'un système industriel, il apparaît intéressant de dissocier les processus représentatifs de la dynamique propre au système, de ceux induits par les politiques qui lui sont appliquées : stratégies d'exploitation, de maintenance, de soutien, etc. Afin de procéder à cette différenciation, nous faisons apparaître le concept de couches de modélisation. Il paraît intéressant en particulier de distinguer en les dissociant :

- une *Couche Structurelle*, représentative des moyens : ressources ou acteurs, du système principal et du système de soutien ;
- une *Couche Opérationnelle*, caractéristique de l'ensemble des activités mises en œuvre par le système et de ses interactions avec le milieu extérieur pendant sa vie utile ;
- une troisième couche, en marge des deux autres est finalement introduite. Cette couche ne traduit pas un aspect physique ou comportemental du système mais est superposée au modèle afin de procéder à une évaluation de certaines performances non directement accessibles par Réseaux de Petri comme par exemple les flux financiers. Nous qualifions cette couche de *Couche Économique*.

Notons que si les couches structurelle et opérationnelle sont modélisées par Réseaux de Petri Stochastiques, la couche économique forme quant à elle un sous-modèle qui ne s'appuie pas sur cet outil, mais sur une arborescence des coûts gérée dans un tableur.

L'intérêt d'un modèle est en partie lié à sa capacité d'évoluer avec la situation qu'il représente. Le modèle étant l'image d'un système industriel, il doit s'enrichir continuellement de son évolution. En phase de développement, il doit être capable d'intégrer rapidement les nombreux changements

susceptibles d'intervenir dans la définition du système. L'évaluation qui en découle permet alors de juger de la pertinence du choix de telle ou telle alternative de conception. En phase d'utilisation, le modèle doit être également en mesure d'intégrer le retour d'expérience issu de l'observation du comportement du système. Les analyses prévisionnelles *a priori* peuvent alors être progressivement affinées par des données *a posteriori*, par définition plus représentatives de la réalité et conduisant donc à des interprétations plus réalistes des résultats de l'évaluation.

Une autre qualité recherchée dans un modèle concerne son intuitivité c'est-à-dire sa faculté à être compris par une personne qui ne serait pas le modélisateur ou sa capacité à être repris après une période suffisamment longue sans que le risque d'oubli de la symbolique utilisée, de la terminologie ou de la forme de modélisation n'apparaisse.

Finalement, l'aptitude à la validation est un atout indéniable dans le cadre d'une modélisation saine. Elle est le résultat d'un déverminage du modèle afin de garantir sa représentativité sur le plan fonctionnel et dysfonctionnel. La détection des éventuelles incohérences et des erreurs potentielles d'interprétation d'une situation existante ou imaginée, permet d'accorder une légitime confiance aux résultats issus du traitement du modèle correspondant.

La décomposition en couches bien qu'apportant une amélioration incontestable à ces besoins d'évolutivité, d'intuitivité et d'aptitude à la validation, apparaît cependant comme insuffisante. Une décomposition supplémentaire est nécessaire au sein des couches structurelle et opérationnelle. Ceci conduit à introduire la notion de modules.

La conception modulaire présente de nombreux avantages.

Chaque module peut en effet être considéré comme une «boîte noire», vis-à-vis du reste du système. Il est perçu par les données échangées avec les autres modules constitutifs du modèle. La modification d'un module peut donc se faire sans remettre en cause le reste du modèle dans la mesure où les entrées et les sorties du module modifié restent identiques. Le gain en souplesse de modélisation est ainsi très important : de nouvelles politiques d'exploitation et de maintenance ou des changements d'architecture peuvent ainsi être rapidement modélisés. Le degré d'intelligibilité du modèle se trouve également renforcé par la modularité puisque le découpage correspond à une articulation logique du comportement du système.

Finalement, la conception modulaire accélère et consolide le déverminage du modèle. Une dissociation est faite entre un niveau local de validation relatif à chaque module et un niveau global correspondant à la réunion des différents modules. Le modélisateur valide donc d'abord chaque module en s'assurant sur des cas simples ou dans le cadre de situations connues que les résultats en sortie sont conformes à ce qui était attendu au regard des données introduites. L'utilisation de logiciels disposant de modes pas à pas peut être utile à ce niveau. Le modélisateur vérifie ensuite que les

échanges entre les modules sont corrects. Des cas tests où la vérification des comportements aux limites (fiabilité modélisée comme infinie, puis nulle par des instanciations judicieusement choisies des taux de défaillance par exemple) peuvent aussi être utilisés.

Nous décrivons à la suite les couches structurelle et opérationnelle ainsi que les modules qui leur sont attachés.

## 2.2 La couche structurelle et les modules associés

La *Couche Structurelle* traduit le comportement dysfonctionnel du système global en se limitant à tout ce qui lui est intrinsèque. Elle permet :

- d'une part de représenter l'ensemble des ressources ;
- d'autre part de déterminer leur état : marche/panne pour des ressources réparables comme les composants du système principal ou disponible/indisponible pour les acteurs et les ressources consommables (auxquels sont parfois associés certains éléments du soutien : pièces de rechange, outillages, documentation technique, etc.).

Cette couche met en jeu des paramètres déterministes mais aussi stochastiques puisqu'elle intègre les aspects probabilistes liés à l'occurrence des défaillances. Pour assurer la représentation exhaustive de tous les moyens, cette couche reprend la structure physique du système industriel, telle qu'elle est décrite dans son arborescence logistique. La finesse de décomposition dépend de la nature du système et du niveau d'analyse qui est attendu de l'outil d'aide à la décision. S'il est envisageable de décrire le système jusqu'aux Unités Remplaçables en Atelier, plus petit constituant dont l'exploitant maîtrise la maintenance (Blanchard 1992), il paraît plus raisonnable de se limiter à un niveau supérieur de décomposition pour éviter des problèmes d'explosion du nombre de places, rendant la validation du modèle plus complexe et augmentant de façon sensible le temps de traitement et d'obtention des résultats de la simulation.

Le modélisateur doit envisager de faire des agrégations des éléments constitutifs du système. Le niveau d'agrégation est à étudier au cas par cas et est lié à la nature des phénomènes qui doivent être caractérisés. En cas de doute sur le niveau de granularité à considérer, ce qui arrive parfois dans les premières phases de développement du modèle, le modélisateur doit, par défaut, choisir le niveau d'agrégation le plus macroscopique. L'expérience montre en effet qu'il est plus aisé de descendre *a posteriori* le niveau d'agrégation que de simplifier un modèle trop lourd.

La *Couche Structurelle* utilise deux classes de modules :

- Les *Modules Physiques* : ils déterminent l'état des composants élémentaires du système principal (marche, panne, mode dégradé de fonctionnement, etc.).
- Les *Modules de Synthèse* : ils établissent l'état des sous-ensembles, à partir des données de sortie des *Modules*

*Physiques* ou de *Modules de Synthèse* du niveau inférieur. Le niveau zéro de la décomposition est caractérisé par un *Module Activité* représentatif de l'état de fonctionnement du système industriel global.

### 2.2.1 Les modules physiques

À chaque Module Physique est associé un sous-réseau de Petri élémentaire, dont la structure en forme de boucle est toujours identique. Chaque boucle caractérise l'état de fonctionnement du composant élémentaire à partir de trois places : élément en état de marche nominal, en attente de réparation ou en réparation (*fig. 1*).

Les états d'attente de réparation et de réparation correspondent logiquement à l'état de panne du système. Cependant, à la lumière des travaux de Signoret (Signoret 2002) et de notre propre expérience, représenter l'état de panne par une unique place peut nuire à une évaluation précise des sources de dysfonctionnement. Cela impose en effet de confondre la réparation intrinsèque de l'élément avec toutes les opérations administratives et logistiques qui lui sont associées.

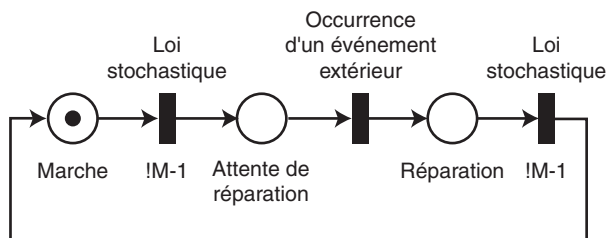


Figure 1

Représentation d'un Module Physique.  
*Representation of a Physical Module.*

Le tir de la transition entre les places Marche et Attente de Réparation correspond à l'occurrence d'une défaillance. Cette transition est donc associée à une loi stochastique (distributions exponentielle, Weibull, Normale, etc.). Le caractère aléatoire des durées de réparation impose également d'utiliser ce type de loi dans la transition entre les places Réparation et Marche.

Le passage de l'état Attente de Réparation à l'état Réparation se fait lorsque les conditions nécessaires à l'opération de soutien sont toutes réunies. Il peut s'agir de la présence de l'équipe de maintenance, la disponibilité de l'élément de rechange ou de tout autre élément caractéristique du soutien logistique. Ces conditions ne sont pas régies par des lois. La sensibilisation de la transition correspondante se fait à l'occurrence d'un événement extérieur. Cet aspect peut être modélisé en conditionnant la transition par la réception de



message(s) ou/et en ajoutant des places en partage de ressources (Cf. § 2.4). La notion de messages émis (!M) et reçus (?M) par les transitions est spécifique au logiciel Moca RP que nous avons utilisé. Cette astuce de modélisation permet de synchroniser des sous-réseaux indépendants. Les messages reçus participent, lorsqu'ils sont « vrais » à la validation de la transition lorsqu'elle est tirée ; les messages émis le sont dans l'état « vrais ». La symbolique utilisée est telle qu'un message est affecté d'un nombre positif lorsqu'il est vrai et d'un nombre négatif lorsqu'il est faux. L'émission de ces messages et la gestion de ces places sont effectuées dans la *Couche Opérationnelle*.

Par ailleurs, à chaque *Module Physique* est associé l'émission d'un message qui permet l'identification à tout moment de l'état de fonctionnement du composant modélisé. Ce message est initialement Vrai, puis passe à Faux lorsque la transition Marche vers Attente de Réparation est franchie. Il est remis à Vrai lorsque la transition Réparation vers Marche est à nouveau validée.

L'ensemble de ces messages renseigne sur l'état des *Modules Physiques*. Ces informations sont alors reprises au niveau des *Modules de Synthèse*, qui vont maintenant être présentés.

### 2.2.2 Les modules de synthèse

Les Modules de Synthèse permettent de réunir les informations issues des Modules Physiques ou de Modules de Synthèse du niveau inférieur afin de déterminer le fonctionnement global des sous-systèmes ou du système le cas échéant.

Il n'existe pas de structure de référence pour les *Modules de Synthèse* comme c'est le cas pour les *Modules Physiques*. En effet, la diversité des cas envisageables rend toute généralisation délicate. Nous limitons donc notre propos à la présentation de deux exemples de structure : la modélisation d'une redondance active et la modélisation des modes de fonctionnement dégradé.

Considérons une redondance active de deux composants représentés chacun par un *Module Physique*. Lorsque l'un des deux est défaillant, la fonction assurée par le sous-ensemble qu'il représente reste remplie (sous-ensemble en état de « marche »). Ce n'est que lorsque les deux composants sont en panne, que la perte de la fonction est observée (sous-ensemble en état de « panne »). Le sous-ensemble est donc modélisé par une boucle composée de deux places (Fig. 2), Marche et Panne, et de deux transitions. La transition Marche vers Panne est associée à une loi de Dirac de paramètre 0 car le tir de la transition ne dépend pas du temps mais de l'état des deux composants. La condition de franchissement est que les messages 1 et 2 soient faux : ?M-1 -2 (c'est-à-dire panne du composant 1 et panne du composant 2). Il y a alors émission du message 3 à faux qui signifie que la fonction n'est plus remplie.

De façon identique, la condition de franchissement de la transition Panne vers Marche est que le message 1 ou 2 soit vrai : ?M1 ou 2 (c'est-à-dire marche du composant 1 ou marche du composant 2). Il y a alors émission du message 3 à vrai signifiant le retour à l'état de marche de la fonction.

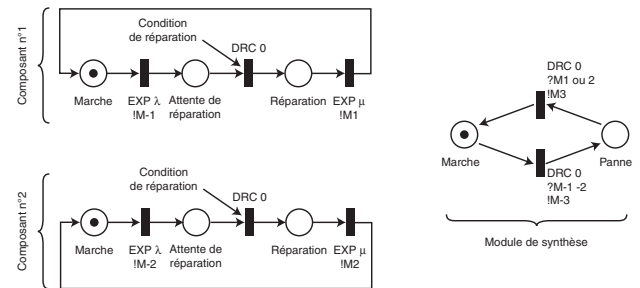


Figure 2

Module Activité d'une Redondance Active.  
Activity Module of an Active Redundancy.

Les *Modules de Synthèse* peuvent également servir à la modélisation des modes de fonctionnement dégradés. Considérons par exemple une fonction remplie par deux composants. Trois niveaux de performance sont observés et affectés d'une place et d'un message : 100 % de performance (ou performance nominale) associé à M5, 50 % de performance associé à M4, 0 % de performance (ou panne) associé à M3.

Les conditions d'entrées dans les places sont établies à partir des messages émis lors du franchissement des transitions de défaillances des composants. Les trois niveaux de performance sont mutuellement exclusifs, c'est-à-dire que l'on ne peut être que dans un état à la fois. L'entrée dans un état doit donc exclure les autres possibilités. Pour cela, les messages 3, 4 et 5 sont utilisés comme message de synchronisation et sont émis lors de l'entrée dans un état (!M X -Y -Z). Lorsque les conditions d'entrée dans un autre état sont réunies, l'entrée dans le nouvel état invalide le précédent, en mettant son message associé à Faux ce qui entraîne le retrait du jeton de cette place (Pérès 2002). Dans l'exemple de la Figure 3, si tous les éléments fonctionnent alors le système entre dans l'état dont le niveau de performance est 100 % ; si un des deux éléments fonctionne, elle n'est que de 50 % (le ou utilisé ici est un ou exclusif) pour finalement tomber à 0 % dans l'hypothèse où tous les composants deviennent défaillants.

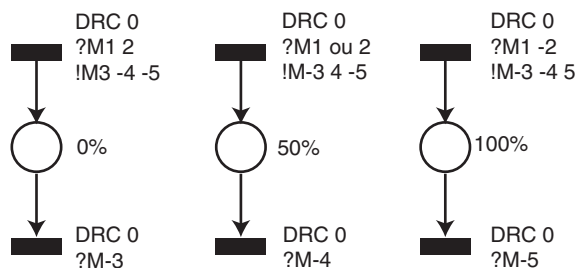


Figure 3

Module Activité d'un mode de fonctionnement dégradé.  
*Activity Module of a degraded mode.*

## 2.3 La couche opérationnelle et les modules associés

La *Couche Opérationnelle* traduit en fait le comportement fonctionnel du système global en intégrant tout ce qui lui est extrinsèque. Elle permet :

- d'une part de représenter exhaustivement l'ensemble des activités, éventuellement regroupées en processus, et l'ensemble des interactions possibles avec le milieu extérieur ;
- d'autre part de coordonner ces activités entre elles et d'évaluer les effets de leur réalisation sur le système global et son environnement.

Cette couche représente notamment les politiques d'exploitation et de soutien en tenant compte des interactions identifiées avec l'environnement extérieur. Elle utilise trois classes de modules :

- les modules activités ;
- les modules de coordination ;
- les modules contextuels.

La spécificité des politiques susceptibles d'être appliquées aux systèmes industriels rend impossible l'identification de modules génériques. En revanche, des principes généraux permettant de les construire ont été établis. Nous les commentons à la suite.

### 2.3.1 Les modules activités

En préliminaire à toute modélisation, le modélisateur doit établir une liste des activités à représenter et identifier, pour chacune d'elles, les ressources, acteurs ou informations nécessaires à sa réalisation. Ces entrées peuvent venir des *Modules Physiques* ou de synthèse de la *Couche Structurale* ou des autres modules de la *Couche Opérationnelle*.

À chaque activité, est associé un module dit *Module d'Activité* constitué d'un ou plusieurs Réseaux de Petri stochastiques. L'objectif est que ces réseaux restent suffisam-

ment simples (le nombre de places ne doit pas dépasser quelques dizaines) pour être facilement appréhendables par le modélisateur. L'activité est décomposée en tâches élémentaires à effectuer, auxquelles sont associées les variations d'états induits du système.

Des exemples classiques de *Modules d'Activité* sont pour le soutien d'une installation : la mobilisation d'une équipe de maintenance, l'approvisionnement en pièce de rechange, la mise à disposition d'un banc de test, la réalisation d'opérations de maintenance, la vérification de bon fonctionnement, etc. Les activités d'exploitation mettent en jeu des activités de type : l'approvisionnement en matières premières, la mise en fonctionnement des outils de production, l'assemblage de composants, l'usinage, le contrôle qualité du produit, le stockage, la distribution, etc.

### 2.3.2 Les modules de coordination

Le plus souvent, le système principal est coordonné par le Plan Directeur de Production qui représente la politique d'Exploitation et le système de soutien est coordonné par le Plan de Maintenance qui est l'image de la politique de maintien.

Des modules qualifiés de *Modules de Coordination* sont utilisés pour représenter ces données stratégiques. À chaque module est associé un ou plusieurs Réseaux de Petri. En fonction, entre autres, des états émanant de la *Couche Structurale*, de la disponibilité des moyens nécessaires aux activités en cours, ces modules vont déterminer la ou les actions à mettre en œuvre. Ce flux sortant, dit flux d'action, est envoyé aux modules activités qui opèrent suivant les ordres reçus, consommant alors acteurs et ressources. Leur structure est bien-sûr très variable, mais en règle générale, ce sont des réseaux complexes car ils sont en interaction avec l'ensemble des autres modules des couches structurales et opérationnelles.

Les *Modules de Coordination* permettent de planifier l'exécution des activités dans le temps. Ils s'appuient sur une référence représentative de la progression dans le temps. Cette « horloge » fournit aux *Modules de Coordination* les repères temporels (heure, jour, semaine, etc.) qui leur sont utiles.

### 2.3.3 Les modules contextuels

Jusqu'ici, la modélisation des aspects environnementaux n'a pas été explicitée. Leur prise en considération incombe à des modules spécifiques dits *Modules Contextuels*. Ces *Modules Contextuels* peuvent représenter une grande variété d'éléments mais le périmètre du système industriel est tel que ces éléments doivent être acceptés comme tels sans qu'il soit possible de modifier leur structure ou la forme d'occurrence des phénomènes qu'ils induisent.

La première utilisation de ce type de modules concerne la prise en compte de phénomènes susceptibles d'affecter le

système industriel sous des formes naturelles. Un *Module Contextuel* peut par exemple servir à la modélisation de phénomènes météorologiques. S'appuyant sur une horloge renseignant sur la saison en cours, ce module permettra de déterminer l'occurrence des orages, à partir de lois stochastiques dont la probabilité dépend de la saison.

La deuxième utilisation des *Modules Contextuels* est attachée à la représentation d'entités externes au système industriel. Dans ce cas, en fonction de leur nature, les *Modules Contextuels* seront susceptibles de mettre en jeu des *Modules Physiques*, de *Synthèse*, d'*Activités* ou de *Coordination*. La flotte des camions d'un fournisseur de matière première peut par exemple être représentée sous cette forme. À chaque camion est associé un *Module Physique*. Un *Module Activité* permet alors d'évaluer la capacité de livraison en fonction du nombre de camions en état de fonctionnement. Un *Module d'Activité* représente l'approvisionnement du système industriel en matières premières. Le module contextuel prend ici la forme d'un système à part entière mais externe à la structure du système industriel étudié.

## 2.4 Les moyens d'échanges entre les couches

Les deux couches et l'ensemble des modules qui les constituent sont en perpétuelle interaction et doivent échanger des flux d'acteurs, de ressources, d'informations et d'actions.

Pour les flux de moyens, c'est-à-dire de ressources ou d'acteurs, ces échanges sont principalement représentés par des flux de jetons grâce à l'utilisation de places dites en partage de ressources. Chaque jeton représente le moyen en tant que tel. Les modules devant échanger ont en commun cette place partagée. L'ajout ou le retrait de jeton dans cette place par l'un ou l'autre des modules représente la mobilisation, la consommation ou la production de la ressource échangée.

L'exemple présenté ci-dessous est constitué d'un *Module Physique* et de deux *Modules d'Activités* correspondant à la gestion des rechanges et à la gestion des équipes de maintenance. Le module concernant les rechanges est très simplement constitué d'une place, numérotée place 20 dans le modèle, représentant le stock de rechanges et d'une transition en amont permettant d'alimenter ce stock d'une pièce toutes les 100 heures. Le module concernant les équipes de maintenance est réduit à sa plus simple expression : une place, numérotée place 10, dont le marquage équivaut au nombre d'équipes de maintenance disponibles.

Pour réparer le composant modélisé, il est nécessaire de disposer d'un élément de rechange et d'une équipe de maintenance. Ce sont les conditions pour valider la transition Attente de Réparation vers Réparation. Cette transition ne doit être valide que si un jeton est disponible dans la place 20, et son tir implique la consommation de ce jeton représentant la pièce de rechange. Cela est rendu possible par le fait que la place 20 est commune au *Module Physique* et au *Module Activité* concerné. Pour des raisons de lisibilité, un renvoi de place est utilisé, matérialisé par le chiffre 20.

Il en est de même pour le *Module Activité* de gestion des équipes de maintenance qui partage la place 10 avec le *Module Physique*. En revanche, les équipes de maintenance ne sont pas consommées (elles ne disparaissent pas après leur utilisation !) mais mobilisées. Le jeton correspondant à l'équipe mobilisée est donc replacé dans la place 10 une fois la réparation effectuée.

Pour les flux d'informations et d'action, ces échanges sont principalement représentés par des messages booléens. À chaque message est associée une information comme «Composant en état de marche» ou une action comme «Réalisation des Maintenances Préventives». Il appartient au modèle de faire vivre ce message en le mettant à Vrai ou à Faux suivant les situations rencontrées. Les messages ont la

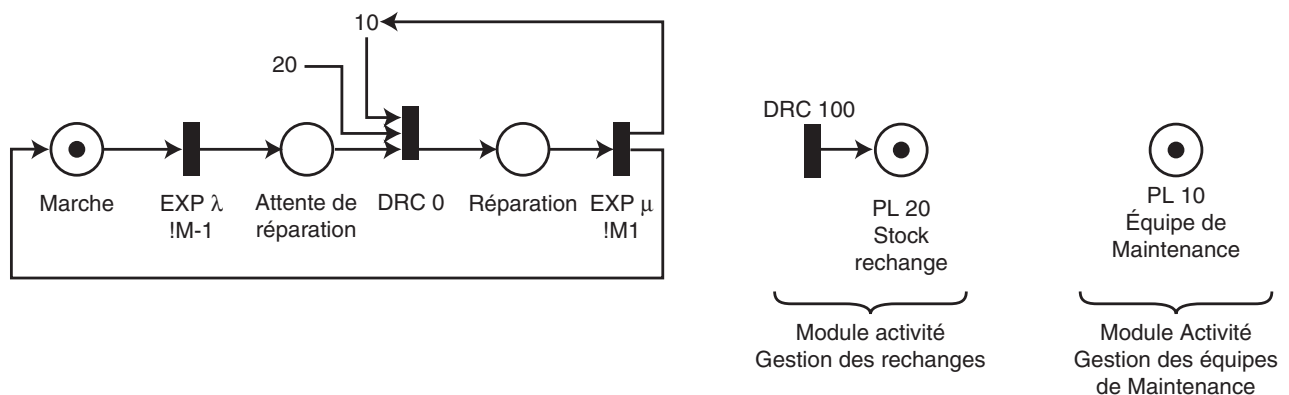


Figure 4

Exemple d'échange entre modules par partage de place et utilisation de renvoi.

*Example of communication between modules by place sharing.*

caractéristique intéressante de ne pas avoir de destinataire identifié, et peuvent être reçus par n'importe quel module. Leur utilisation nécessite en revanche, pour se prémunir de nombreuses difficultés, de tenir à jour une liste de tous les messages utilisés, avec leur signification et leur valeur initiale. Remarquons également que l'excès de message peut conduire à une difficulté liée à un découplage excessif des phénomènes rendant là encore l'interprétation et la manipulation des modèles délicates.

Cette distinction entre échanges de moyens et échange d'informations est, il faut le reconnaître, restrictive et doit être considérée comme indicative. Si un message booléen n'est pas suffisant pour représenter une information (si on cherche par exemple à savoir combien de systèmes sont en panne à un instant  $t$ ), il est possible d'utiliser des places auxiliaires en lecture seule ou en lecture écrite, où le nombre de jetons dans la place est porteur de l'information.

## 2.5 La couche économique et le sous-modèle associé

Elle permet d'implémenter une instrumentation du modèle et ici en l'occurrence des Réseaux de Petri, pour enregistrer les renseignements révélateurs du comportement du système et de sa réponse aux stratégies envisagées, en terme de performance technique et surtout économique.

Son existence vient du fait que les Réseaux de Petri ne sont pas naturellement adaptés à l'évaluation des flux économiques. Ils délivrent cependant les données d'entrée qui permettront d'accéder à ce type d'information. Une partie des données figure dans les fichiers résultats de simulation du modèle constitués des couches structurelles et opérationnelles. Les informations manquantes sont obtenues par instrumentation des différents réseaux élémentaires de chacune des deux couches. On intègre ainsi au niveau du modèle :

- des compteurs, ce sont en fait des transitions qui sont tirées lorsque le phénomène considéré est observé : défaillances d'un composant, achat de pièces de rechange, livraison d'un produit fini, etc. Le nombre moyen de fois où elles ont été tirées est comptabilisé dans un fichier. Les compteurs informent donc sur le nombre d'occurrences d'un événement ;
- des traceurs, ce sont en fait des places qui sont marquées à chaque fois qu'une situation particulière est constatée : système en panne, stock en rupture, équipe de maintenance indisponible, etc. Le temps moyen pendant lequel la place a été marquée, et son marquage moyen (avec les écarts-types correspondants) est enregistré dans un fichier. Les traceurs renseignent donc sur la durée d'un événement.

Considérons par exemple le coût des rechanges d'un composant. Il vérifie l'équation :

$$C_{\text{Rechanges}} = C_{\text{pièces}} + C_{\text{Livraisons}} + C_{\text{Stockages}}$$

où :

$$\begin{aligned} C_{\text{pièces}} &= \text{Nb}_{\text{Pièces utilisées}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \\ &= \text{Nb}_{\text{Tirs de la transition Consommation d'une pièce}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{Livraisons}} &= \text{Nb}_{\text{Livraisons}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \\ &= \text{Nb}_{\text{Tirs de la transition Livraison}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{Stockages}} &= \text{Nb}_{\text{Pièces stockées}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \\ &= \text{Marquage}_{\text{moyen de la place stockage des rechanges}} \times \text{Coût}_{\text{unitaire}} \end{aligned}$$

Le traitement du modèle permet d'estimer les données ci-dessus. Les coûts unitaires qui permettraient de calculer dans un premier temps les coûts de pièces, livraisons et stockage pour dans un second temps évaluer le coût des rechanges ne sont pas directement intégrés au modèle.

On le voit, en l'état actuel des choses, seule la performance technique du système industriel peut être mesurée. Un modèle parallèle de coûts doit donc être adjoint au Réseau de Petri. Ce deuxième modèle est fondé sur l'arborescence des coûts que l'ILS Manager et le chef de projet définissent lors des analyses programme. Cette structure est ensuite retranscrite dans un tableur standard (type Excel), qui permet de quantifier chacune des lignes de coûts.

Deux catégories de coûts sont identifiées. Ce sont :

- les Coûts Directs : ensemble des coûts générés par les biens et les personnes qui sont en lien immédiat avec le fonctionnement (exploitation et soutien) du système industriel ;
- les Coûts Indirects qui s'opposent aux précédents et qui sont les coûts générés par les biens et les personnes qui participent au support de ces activités.

On distingue aussi :

- les Coûts Variables : coûts modulés en fonction des activités d'exploitation et de soutien qui sont menées ;
- les Coûts Invariables : coûts fixes quelle que soit l'utilisation effective du système industriel.

L'ensemble des coûts invariables, qu'ils soient directs ou indirects, sont évalués indépendamment de la partie Réseaux de Petri du modèle, puisque, par définition, les activités modélisées n'ont aucun effet sur ces coûts. Pour des raisons évidentes de limitation du périmètre fixé pour l'aide à la décision, réduite à l'analyse de la performance technico-économique, les coûts variables indirects sont aussi évalués indépendamment de la partie Réseaux de Petri du modèle.



Notons qu'ils ne sont toutefois jamais dimensionnants pour le système industriel. Il reste les coûts variables directs. Ils constituent le cœur de l'indicateur de performance économique, car ils sont directement impactés par les différentes politiques d'Exploitation et de Soutien. Pour les évaluer, les informations en provenance des fichiers résultats de la simulation des couches structurelles et opérationnelles du Réseau de Petri sont combinées via un tableur aux unités économiques figurant dans l'arborescence de coûts.

Le modèle économique parallèle, permet aussi l'estimation de « mesures bilan » (Pérès 1996). Ce sont des indicateurs calculés *a posteriori* à partir des résultats de simulation pour fournir des renseignements complémentaires. Il peut s'agir de ratios, de sommes de temps passé dans un groupe d'état, ou de combinaisons savantes de résultats plus élémentaires.

Tous ces résultats sont ensuite synthétisés dans des tableaux de bord. Ces tableaux doivent faire apparaître d'une part, l'estimation des différents indicateurs de performance techniques du système industriel et d'autre part, les mesures qui leur sont associées en terme pécuniaire. Ce double éclairage permettra de retenir les politiques d'exploitation et de soutien délivrant les meilleurs compromis entre des performances techniques de disponibilité d'une part et des performances économiques d'autre part. Ces tableaux de bords sont alors remis aux décideurs qui peuvent faire leur *choix en toute connaissance de conséquences*.

### 3 D'UN OUTIL GÉNÉRIQUE À UN OUTIL DÉDIÉ

Cependant, force est de constater qu'aucun système industriel ne met en œuvre les mêmes activités, n'est affecté de la même façon par son environnement, n'est composé des mêmes moyens... Or, la prise en considération des différences entre deux systèmes industriels dépasse largement le cadre d'un simple reparamétrage d'une couche, qu'elle soit structurelle, opérationnelle ou économique. Chaque système industriel requiert un travail de modélisation personnalisé afin d'intégrer ses caractéristiques spécifiques. Tout le travail et la valeur ajoutée du modélisateur résident alors dans le développement du modèle associé. Il pourra se baser pour cela sur la démarche de structuration que nous avons introduite au paragraphe précédent ainsi que sur un certain nombre de recommandations listées à la suite résultat d'une expérience de terrain.

La démarche de personnalisation d'un modèle est présentée ci-dessous sous la forme d'une liste chronologique des tâches à effectuer :

1 *Identification de l'indicateur de performance technico-économique* : le modélisateur doit retenir l'indicateur considéré comme dimensionnant par le décideur pour le système industriel étudié.

2 *Énumération des constituants élémentaires à modéliser* : une liste complète des composants du système industriel doit être dressée. L'arborescence logistique peut être utilisée pour cela en se limitant à un niveau correspondant au besoin de granularité conforme au niveau d'analyse attendu. L'ensemble des données (issues des analyses de Sûreté de Fonctionnement) de fiabilité et d'aptitude au soutien associé à chaque composant élémentaire du niveau retenu doit être recueilli.

3 *Détermination des processus mis en jeu et des flux* : il s'agit de mettre en évidence toutes les activités et toutes les interactions avec l'environnement du système industriel. Le modélisateur peut s'appuyer pour cela sur le cahier des charges fonctionnel du système, en associant par exemple une activité par fonction. Puis il identifie tous les flux de ressources, d'acteurs, d'informations et d'actions nécessaires à la conduite et la coordination de ces activités. En présentant l'ensemble de ces éléments sous la forme d'un schéma synthétique, l'architecture de l'outil dédié est obtenue. Il faut alors, comme précédemment, récupérer l'ensemble des données associées à cette étape. Elles sont en général peu explicitées et demandent donc un important travail de formalisation et de synthèse.

4 *Identification de l'arborescence des coûts* : le modélisateur fixe, en fonction de l'indicateur économique retenu et des besoins du décideur, la structure des coûts qui sera intégrée dans le modèle économique parallèle. Les données de coûts élémentaires, de coûts invariables et de coûts variables indirects doivent être également collectées.

5 *Modélisation de la Couche Structurelle* : en respectant les recommandations émises précédemment, cette étape se fait relativement aisément.

6 *Modélisation de la Couche Opérationnelle* : cette étape représente le plus gros du travail de modélisation. Elle est cependant facilitée par la décomposition en modules telle que nous l'avons présentée au paragraphe précédent.

7 *Déverminage local* : il concerne chacun des modules des deux couches qui doivent être validés un par un, en les testant par exemple en mode pas à pas.

8 *Déverminage global* : il concerne tout le modèle et doit être fait avec la plus grande rigueur.

9 *Modélisation de la couche économique* : l'instrumentation du modèle principal et l'intégration au niveau du tableur des données existantes et celles issues de la simulation est un exercice relativement simple dans la mesure où les valeurs économiques sont effectivement connues ou accessibles.

Dans le paragraphe qui suit nous appliquons cette démarche à la modélisation d'un système de production pétrolier offshore Ultra Grands Fonds.

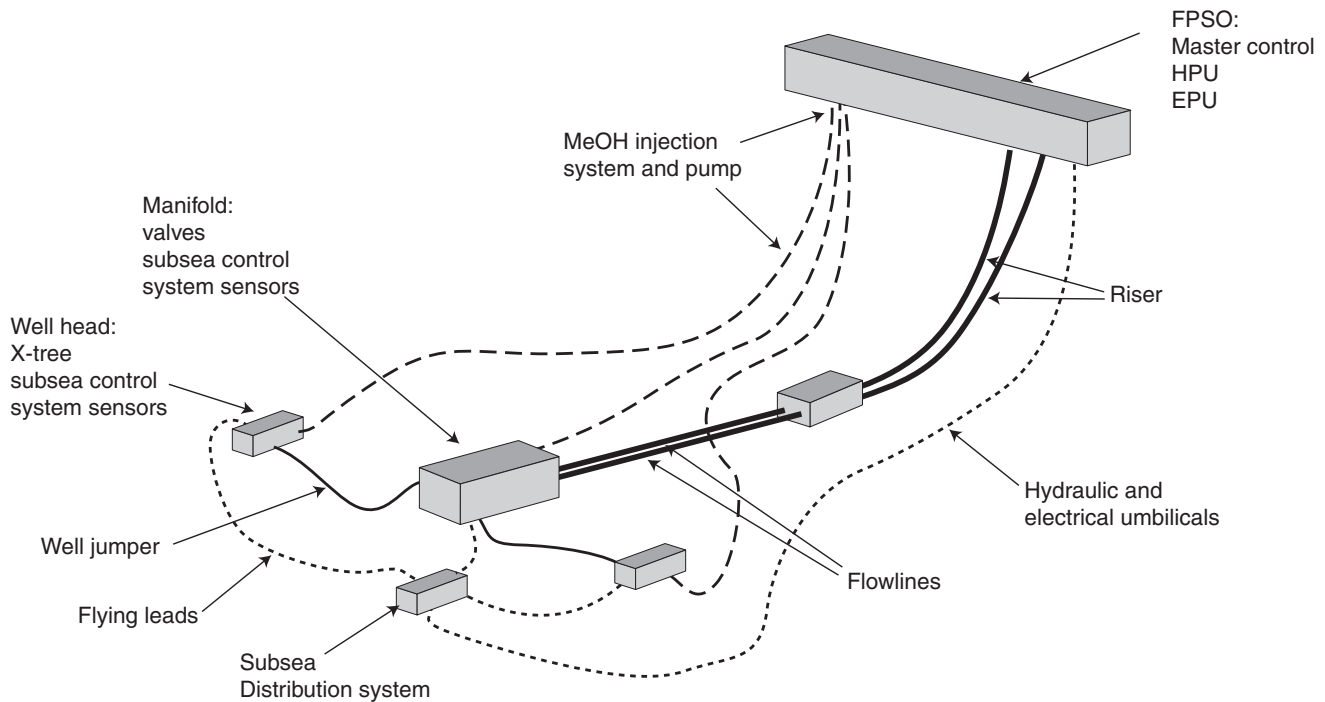


Figure 5

Architecture du système de production de base.

*Architecture of a basic production system.*

## 4 APPLICATION À UN SYSTÈME INDUSTRIEL COMPLEXE

### 4.1 Description de l'objet de l'étude

Les systèmes de production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds sont soumis à des conditions opératoires très dures tout en nécessitant des investissements très importants de la part des compagnies pétrolières. Celles-ci cherchent donc à évaluer les risques auxquels sont soumis ces systèmes de manière à prendre les décisions les plus appropriées en terme de choix de politique opératoire, d'architectures et de technologies. En outre, ces décisions sont prises en contexte fortement incertain : incertitudes concernant les données du réservoir (pression, température), les données du fluide (composition, viscosité, etc.) mais aussi les données des équipements (taux de défaillance et de réparation dans le cas d'utilisation de technologies non prouvées, effets du vieillissement). Le problème consiste donc à définir un critère de performance pertinent tout au long du cycle de vie du système de manière à comparer les différents designs possibles et à choisir le meilleur.

Il est apparu assez rapidement que la Sûreté de Fonctionnement fournit le cadre général théorique nécessaire pour traiter ce genre de problème. En particulier, la Sûreté de Fonctionnement permet de calculer des statistiques comme la disponibilité et surtout la disponibilité de production qui, moyennant l'utilisation d'un modèle économique simple, fournissent un bon critère de performance technico-économique d'un design donné. En outre, la Sûreté de Fonctionnement fournit des outils de modélisation capable de simuler le fonctionnement d'un système complexe tout au long de son cycle de vie et donc de calculer le plus précisément possible ces statistiques : chaînes de Markov, diagrammes de fiabilité et Réseaux de Petri stochastiques. Les conditions particulières de l'offshore Ultra Grands Fonds engendrent des problèmes d'écoulement de l'effluent (ou problèmes de Flow Assurance) qui s'ajoutent aux défaillances des équipements sous-marins pour créer un système particulièrement complexe à étudier mêlant événements aléatoires et déterministes, événements discrets et phénomènes continus, le tout avec de fortes interactions. Compte tenu de ces données, seuls les Réseaux de Petri stochastiques sont capables de modéliser un système aussi complexe.

Le type de système que nous allons étudier a pour objectif de produire des hydrocarbures à partir de gisements sous-marins dont l'exploitation est rendue difficile du fait de la profondeur d'eau à laquelle ils se trouvent (>1500 mètres). L'objectif consiste à évaluer et maîtriser les risques susceptibles d'entraver le bon déroulement de la production des hydrocarbures vers la surface. Les causes de dysfonctionnement sont pour l'essentiel connues. Du point de vue de l'écoulement de l'effluent, il s'agit principalement de la présence d'hydrates ou de paraffines respectivement responsables de blocages de la conduite (par la formation de bouchons) ou de l'outil de raclage voire de pertes de production (par la formation de dépôts sur les parois internes des conduites). Du point de vue des équipements, il s'agit de défaillances de fonctionnement classiques, comme par exemple des fuites, des ruptures, des non-réponses à la sollicitation, des défaillances des systèmes de contrôle, etc.

Afin de comparer dès le développement, différentes politiques d'Exploitation et de Soutien et d'évaluer leur impact sur la performance technico-économique de la plate-forme, un outil d'aide à la décision basé sur un couplage entre un Réseau de Petri et la simulation de Monte-Carlo a été développé. La démarche de modélisation présentée dans le cadre de cet article a alors été appliquée à un système de production de base représentatif des systèmes de production offshore rencontrés en Afrique de l'Ouest (Fig. 5). Nous la présentons en grandes lignes dans le paragraphe suivant.

## 4.2 Modélisation

Nous reprenons à la suite les étapes de modélisation présentées au paragraphe 3.

### 4.2.1 Étape 1

L'indicateur de performance technico-économique retenu est la production d'hydrocarbures (à partir de la connaissance des débits et de la disponibilité instantanés) rapportée au coût annuel d'exploitation et de maintenance.

### 4.2.2 Étapes 2 et 3

Les constituants élémentaires à modéliser ainsi que les processus et les flux mis en jeu requièrent la connaissance des arborescences fonctionnelles, des profils de mission, des politiques de maintien et de l'environnement du système de forage. On considère que le système est composé des éléments suivants :

- une installation de surface comprenant :
  - un Master Control, le système de contrôle principal ;
  - une HPU, l'unité de puissance hydraulique ;
  - une EPU, l'unité de puissance électrique ;
  - un séparateur qui ne sera pas modélisé ;

- un ensemble de production sous-marin comprenant :
  - une boucle flowline-riser ;
  - un manifold ; lui-même composé de :
    - un ensemble de vannes ;
    - un ensemble de capteurs ;
    - un système de contrôle ;
  - des têtes de puits elles-mêmes composées de :
    - un ensemble de vannes (ou X-tree) ;
    - un ensemble de capteurs ;
    - un système de contrôle ;
  - des « jumpers » reliant chaque tête de puits au manifold ;
  - un système d'injection de méthanol dont seule la pompe sera modélisée ;
- une partie commande composée de :
  - un module de distribution sous-marin permettant la distribution des différentes énergies (hydraulique, électrique) ;
  - de plusieurs ombilicaux transportant l'énergie électrique et hydraulique ;
  - d'un robot sous-marin permettant d'effectuer la maintenance sur le site (ROV).

### 4.2.3 Étape 4

L'utilisation des coûts peut être utile en conception pour la définition d'une architecture optimale du système de production en fonction d'un profil d'utilisation. Dans le cas de la modélisation de la phase d'exploitation du système, phase que nous considérons dans le cadre de cette étude, les coûts variables à intégrer sont liés à des considérations de production (bénéfices induits par le nombre de barils produits) et de maintenance (dépenses inhérentes à un traitement curatif ou préventif impliquant des coûts de pièces de rechange et d'outillage : ROV, pigging, coiled tubing...). Les coûts fixes sont classiques et concernent le personnel, la mise en place et l'entretien de l'installation, l'énergie nécessaire à son fonctionnement, etc.

### 4.2.4 Étape 5

La couche structurelle reprend l'architecture du système décrite dans l'arborescence du système de production d'hydrocarbures (cf. étape 2 de la démarche).

Pour chaque composant un **module physique** a été construit. La réunion des informations qu'ils génèrent est opérée à travers un **module de synthèse** de niveau 1 renseignant sur l'état du système. La Figure 6 présente les sous-ensembles considérés.

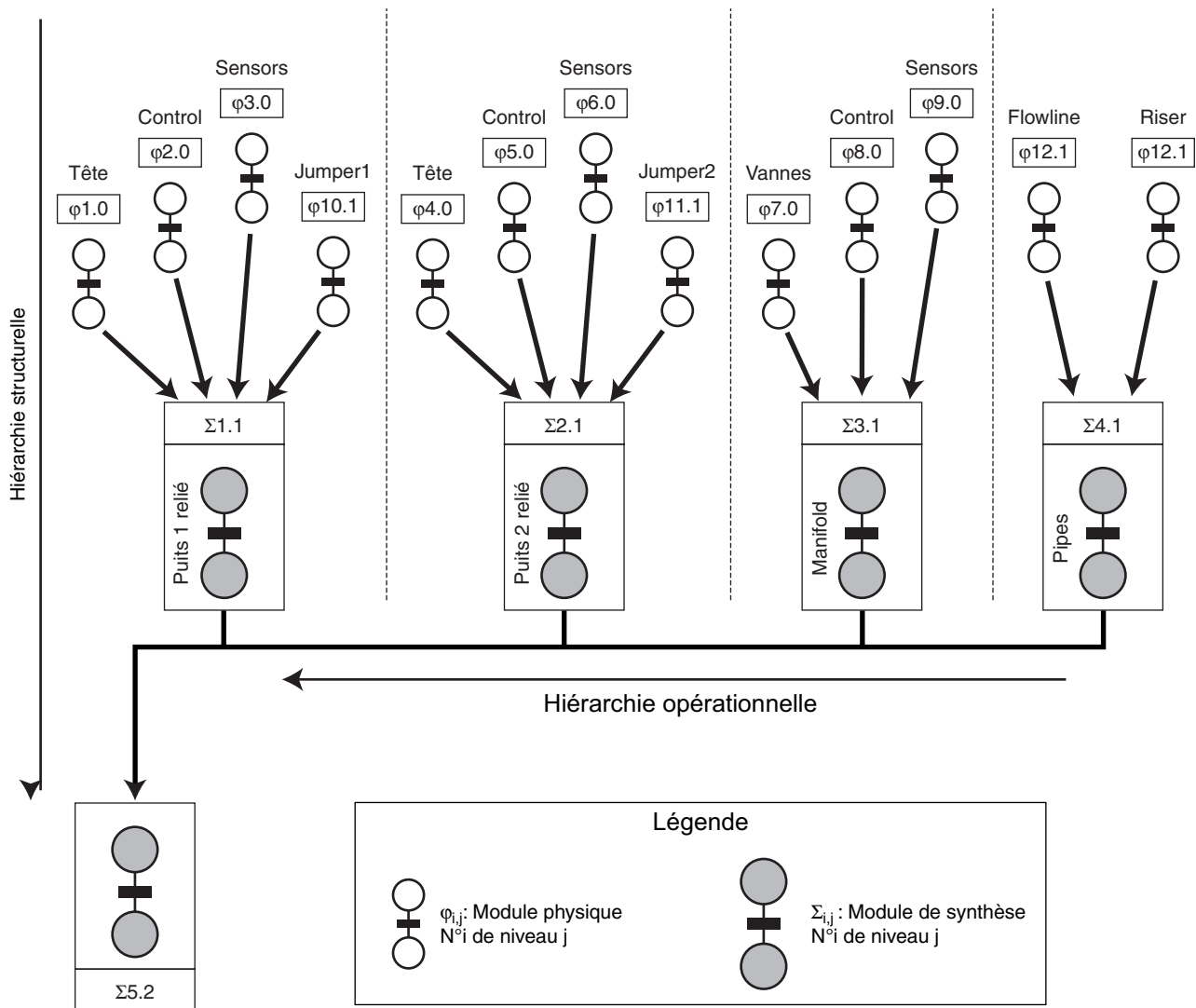


Figure 6

Sous-ensembles de la couche structurelle.  
Subsets of the structural layer.

Bien que le résultat soit le même on pourra observer une différence entre les modules de synthèse 1, 2, 3, 4 représentatifs d'une agrégation structurelle des modules physiques élémentaires et le module de synthèse 5 caractérisant une hiérarchie opérationnelle mettant en évidence une dépendance entre composants (l'arrêt d'une tête de puits a une conséquence directe sur le régime de fonctionnement de la tête de puits demeurée en état de marche).

#### 4.2.5 Étape 6

La couche opérationnelle fait apparaître les données dynamisant le système c'est-à-dire principalement les politiques d'exploitation et de maintenance du système.

Des **modules d'activités** ont été établis pour représenter :

- le mode de fonctionnement en production. Bien que l'exploitation soit continue, des arrêts fictifs sont générés au niveau du modèle pour effectuer des calculs et réinitialiser les données;
- les périodes de maintenance. Trois types de maintenance sont observés :
  - le premier est lié à la présence d'un phénomène de dépôt à l'intérieur des conduites. Ce phénomène de cristallisation à la paroi induit par des températures basses, une pression élevée et la présence de paraffine dans l'effluent (huile paraffinique) nécessite des opérations régulières de raclage (pigging) ;



- le deuxième est induit par un phénomène correspondant à la formation de bouchons d'hydrates. Ce phénomène se produit en général en phase de redémarrage après un arrêt prolongé qui a conduit à une chute importante de la température en-dessous de la température de stabilité des hydrates. Il nécessite la présence d'eau et de gaz léger dans l'effluent (ce qui est fréquemment le cas, notamment en fin du cycle de vie) et est favorisé par les hautes pressions qui règnent dans ce type système Ultra Grands Fonds. Pour lutter contre ce type de risque, les actions de prévention à mener sont, en phase de redémarrage, le remplacement des effluents par de l'huile morte (Dead Oil Displacement) dans la boucle flowline-riser et l'injection de produits chimiques (méthanol essentiellement) en certains points sensibles du système, notamment au niveau des vannes du manifold et des têtes de puits ;
- le troisième type de maintenance est de type correctif, en réponse aux défaillances des composants sous-marins du système. Pour ces opérations le robot sous-marin d'assistance ROV est sollicité.

Afin de gérer les interactions entre les périodes de production en modes nominal ou dégradé et les périodes de maintenance, un **module de coordination** a été construit. Il permet d'une part de calculer le temps de fonctionnement de la période précédente et d'autre part d'actualiser le début de la période qui commence, c'est-à-dire d'intégrer les paramètres liés aux nouvelles conditions d'exploitation. C'est un module de pilotage du processus de production.

Enfin, l'utilisation d'un **module contextuel** a permis de modéliser l'historique de débit d'une tête de puits sachant que celui-ci n'est pas constant au cours de la vie du champ. Une décroissance au cours du temps est observée correspondant à une baisse de production liée à la raréfaction du produit à extraire ou une dilution de celui-ci à d'autres effluents parasites (boue, eau) nécessitant des actions de séparation.

#### 4.2.6 Étapes 7 et 8

Le déverminage du modèle a été réalisé sur la base d'une structure représentée synthétiquement en Figure 7.

#### 4.2.7 Étape 9

L'instrumentation du réseau, résultat de la superposition de la couche économique, a donné lieu à un certain nombre de résultats issus de la simulation par Réseaux de Petri (106 simulations ont été nécessaires pour fournir des valeurs statistiquement représentatives en fonction des valeurs des taux introduites) et d'autres non directement accessibles par ce type de traitement. Si les temps moyens de séjour dans un état peuvent par exemple être directement obtenus à partir de

la lecture du modèle, le coût résultant de ce stationnement nécessite d'introduire des données supplémentaires. Un outil de type tableur peut alors être utilisé pour stocker ces données (coût horaire par exemple) et opérer des calculs simples permettant d'accéder aux indicateurs souhaités. L'objet de cet article étant d'attirer l'attention sur une démarche de modélisation, nous ne présenterons ici que quelques résultats issus du traitement du modèle global. Le modèle généré sur la base de l'architecture précédemment présentée a permis entre autres d'accéder à des mesures représentatives :

- de l'impact sur la production des dépôts de paraffine au cours du temps. La mesure choisie est le nombre de barils produits sur une durée d'exploitation de 20 ans. Il a été montré en particulier que ce phénomène conduit à une baisse de production de près de 10%. Cette baisse constatée est supérieure aux pertes engendrées par les temps de maintenance corrective. Ce phénomène paraffinique n'est donc pas à négliger et seul un réseau de Petri stochastique hybride est capable de le modéliser compte tenu de son aspect continu dans le temps. A noter que l'influence des dépôts de paraffine est normalement considérée via la probabilité pour l'outil de raclage de rester coincé lors de l'opération de maintenance : plus les dépôts sont importants, plus la probabilité pour l'outil de rester coincée est forte. Cette manière de voir les choses ne change rien au fond du problème puisqu'elle nécessite aussi de calculer l'évolution de l'épaisseur des dépôts au cours du temps, phénomène évidemment continu ;
- de la répartition des arrêts en fonction des équipements. Trois types de sous-ensembles sont à l'origine de 85% du temps d'arrêt. Il s'agit du manifold, de la boucle flowline-riser et du système de distribution sous-marin. Ce calcul est quelque peu faussé par la prise en compte du temps d'attente d'intervention du robot sous-marin. Un deuxième calcul a montré que le temps d'attente de celui-ci correspondait à 38% du temps total d'immobilisation ce qui interpelle sur la stratégie propre à cet équipement jusqu'alors utilisé en partage entre plusieurs champs ;
- de la disponibilité du système de production. Sur ce plan une distinction a été faite entre le cas de figure correspondant au fonctionnement nominal et celui relatif au fonctionnement en mode dégradé (une des deux têtes de puits est arrêtée). Les calculs ont alors conduit à une disponibilité en mode nominal de 94%, une disponibilité en mode dégradée légèrement supérieure à 3% pour une disponibilité globale dépassant donc les 97%. Ce résultat est tout à fait compatible avec les objectifs affichés des compagnies pétrolières opérant ce genre de système de production. On notera cependant que des gains de quelques dixièmes de pour cent de disponibilité (et surtout de disponibilité de

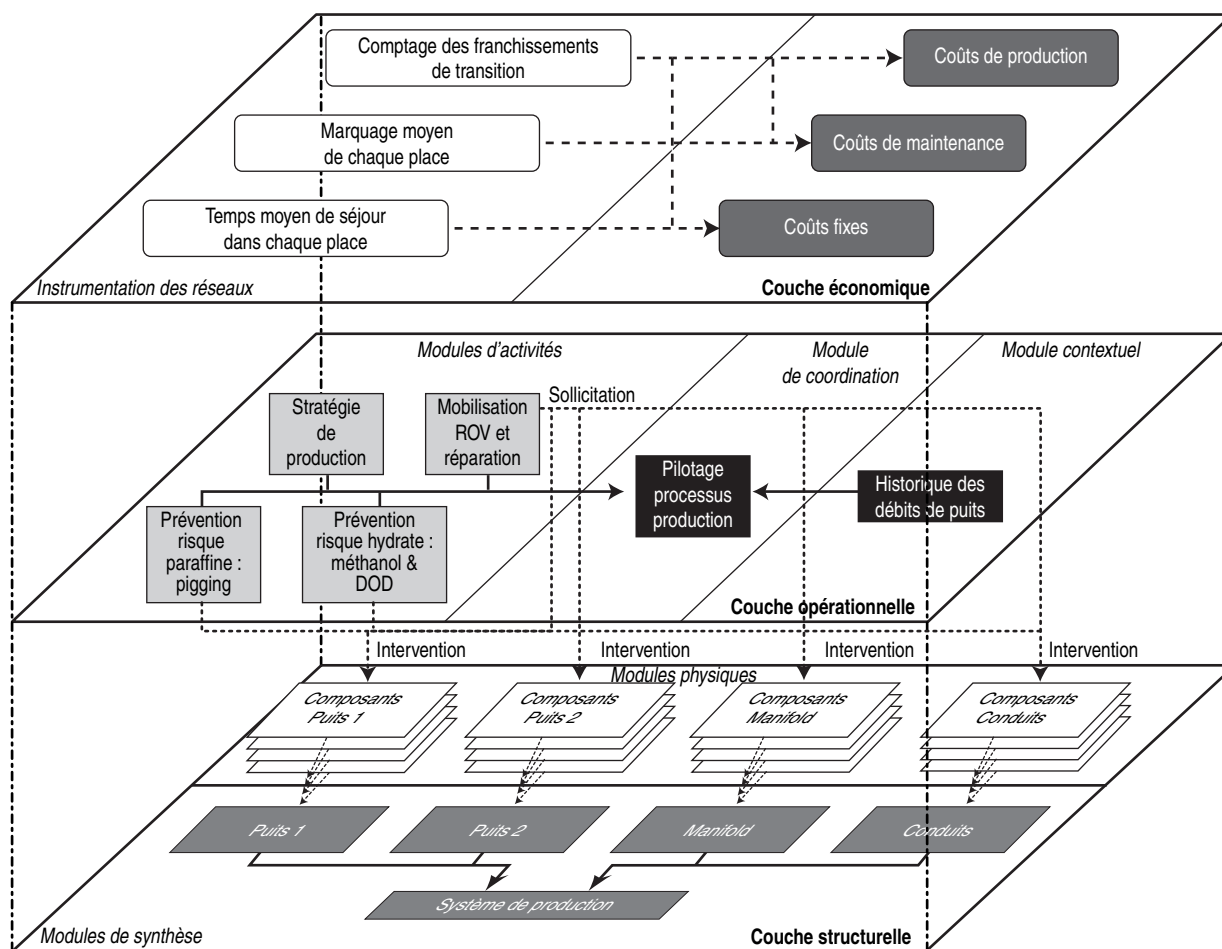


Figure 7

Architecture du modèle.

Architecture of the model.

production) peuvent parfois faire la différence étant donné les sommes qu'ils induisent ;

- de la fréquence de pigging. Bien que les Réseaux de Petri ne permettent pas d'optimiser une fonction objective, le changement de paramètres d'entrée permet d'observer en sortie des courbes susceptibles de faire apparaître un optimum. C'est ce qui a été fait pour la fréquence de pigging. Initialement établie à 60 jours pour une durée de 12 heures, la fréquence a été modifiée sur un intervalle de balayage de 5 à 100 jours. Un optimum très net apparaît aux alentours de la valeur 20 jours correspondant donc à la fréquence optimale de raclage des conduites. En-dessous de cette valeur les arrêts de production liés au pigging pénalisent trop la production. Au-dessus de cette valeur les dépôts de paraffine réduisent le débit de façon trop importante.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La modélisation structurée que nous avons proposée conduit à l'établissement d'un outil générique dont les capacités ont été démontrées. Il est intuitif car fondé sur un modèle comportemental hiérarchisé dont la structure s'appréhende d'autant plus facilement que les Réseaux de Petri stochastiques, cœur syntaxique du modèle, forment une interface graphique dont la lecture est presque naturelle. Les Réseaux de Petri, associés à la simulation de Monte-Carlo, sont par ailleurs un gage de pérennité car leur utilisation est en plein essor en Génie Industriel. Enfin, la structure modulaire assure l'évolutivité et l'aptitude au paramétrage du modèle. Ces quatre attributs confèrent à ce type de modèle, le statut réellement mérité d'outil d'aide à la décision. Notons cependant que les difficultés classiques d'obtention des données de sûreté de fonctionnement ne sont pas solutionnées par la démarche

structurée que nous avons présentée dans ce papier. Ceci pourrait conduire à conclure que l'approche de modélisation n'est pas vraiment pertinente. Ce serait une conclusion un peu hâtive. En effet, au-delà des résultats absolus, tributaires de données parfois incertaines voire fausses, c'est surtout la comparaison relative de différentes stratégies qui est recherchée par le décideur. Les incertitudes sont alors gommées et ne représentent nullement un obstacle à une prise de décision en toute connaissance de conséquences.

Dans le domaine pétrolier, cette méthode de modélisation apporte réellement un plus en permettant notamment d'intégrer des phénomènes physiques de Flow Assurance (formation de bouchons ou de dépôts) dont l'influence sur la disponibilité et surtout sur la disponibilité de production du système a pu être démontrée. Un effort devra cependant être fait dans les années à venir de manière à développer des bibliothèques de modules métiers génériques qui ne nécessiteront que des connaissances minimales pour être utilisées par des ingénieurs métiers non spécialistes. De façon à rendre cette utilisation encore plus transparente, des questionnaires pourront être établis dont les réponses permettront de construire directement le modèle à partir de ces modules génériques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Van Der Aalst, W.M.P. (1992) "Timed Colored Petri Nets and their application to Logistics" *PhD Thesis*, Université Technique d'Eindhoven.
- Blanchard, B.S. (1992) *Logistics Engineering and Management*, Prentice Hall, Fourth Edition.
- Chabot, J.L. (1998) "Approche probabiliste relative à l'étude des scénarios d'incendie", *PhD Thesis*, Université de Poitiers.
- Ereau, J.F. (1997) "Réseaux de Petri pour l'étude de la disponibilité opérationnelle des systèmes spatiaux en phase d'avant projet", *PhD Thesis*, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Garnier, R. (2001) "Utilisation de la simulation comportementale pour le Soutien Logistique Intégré", *Présentation au collègue Méthodologie & Outils de l'Institut de Sécurité de Fonctionnement*, 6 avril 2001, Paris.
- Grenouilleau, J.C. (1999) "Modélisation des politiques d'approvisionnement en éléments de rechange pour le laboratoire orbital Columbus", *PhD Thesis*, Laboratoire Productique Logistique de l'École Centrale Paris.
- Pérès, F. (1996) "Outils d'Analyse de Performance pour Stratégies de Maintenance dans les Systèmes Manufacturiers de Production", *PhD Thesis*, Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Université Bordeaux I.
- Pérès, F., Grenouilleau, J.C., Perron, S. (2002) "Modélisation du soutien logistique : application à la gestion des pièces de rechange d'un système spatial", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **36**, N°2.
- Perron, S. (2002) "Contributions au Soutien Logistique Intégré des Systèmes Industriels : application à la Ligne d'Intégration Laser", *PhD Thesis*, Laboratoire Génie Industriel École Centrale Paris.
- Signoret, J.P. (1996) "Réseaux de Petri typiques pour les études de sûreté de fonctionnements des systèmes pétroliers", Direction Sécurité/Environnement de ELF Exploitation Production, Pau.
- Signoret, J.P. (2002) *Approche par simulation*, Chapitre 9 de l'ouvrage Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production, Collection IC2 Productique, Hermès Lavoisier.

*Manuscrit définitif reçu en avril 2006*