

# L'usage des Réseaux de Petri dans la Théorie de Contrôle par Supervision

*Asma BOUFADEN<sup>\*,\*\*</sup>, Laurent PIETRAC<sup>\*</sup>, Sonia GABOUJ<sup>\*\*</sup>*

\* Laboratoire d'Automatique Industrielle (LAI), INSA Lyon, Bât. St Exupéry, 25 av. Jean Capelle 69621 Villeurbanne Cedex France

\*\* Unité de Recherche en Automatique et Informatique Industrielle (URAI), INSAT Tunisie, Centre Urbain Nord B.P. N°676, 1080 Tunis Cedex Tunisie

[asma.boufaden@insa-lyon.fr](mailto:asma.boufaden@insa-lyon.fr), [laurent.pietrac@insa-lyon.fr](mailto:laurent.pietrac@insa-lyon.fr), [sonia.gabouj@insat.rnu.tn](mailto:sonia.gabouj@insat.rnu.tn)

## RESUME

Dans la littérature, différentes théories basées sur les réseaux de Petri ont été proposées pour la synthèse d'un superviseur qui assure le fonctionnement souhaité d'un procédé perçu comme un système à événements discrets (SED). Cet article présente certaines approches que nous avons retenues afin de définir les critères de comparaison entre ces dernières. Ces critères ainsi établis permettent d'une part, de situer les approches entre elles et d'autre part, offrent un moyen sur lequel il est possible de se baser pour l'élaboration ou le choix d'une nouvelle théorie en retenant le choix des meilleurs critères.

**MOTS CLES :** Réseaux de Petri, théorie du contrôle par supervision, systèmes à événements discrets.

## ABSTRACT

Several theories based on Petri nets are proposed in the literature for the synthesis of a supervisor that ensures the desired behaviour of a plant considered as discrete event system (DES). In this paper, we present the approaches we adopted and define comparison criteria between them. The accomplished criteria allow the evaluation of the approaches, the ones compared to the others. Moreover, they offer an effective way to elaborate or to choose a new theory by selecting the best criteria.

**KEYWORDS :** Petri nets, supervisory control theory, discrete event systems.

## INTRODUCTION

De nombreux systèmes peuvent être modélisés comme des systèmes à événements discrets (SED) : les systèmes manufacturiers, les systèmes de transport, etc. Ces systèmes disposent d'un espace d'état discret et évoluent selon l'occurrence d'événements instantanés. La théorie du contrôle par supervision (ou théorie RW), basée sur l'utilisation des automates à états et des langages formels, a été introduite par Ramadge et Wonham ([11], [12]) pour synthétiser des lois de commande pour ces SED. Un des freins à l'utilisation de cette théorie est le problème de la taille des modèles obtenus. Deux voies ont été explorées dans la littérature : l'utilisation de

structures de commande décentralisée, modulaire ou hiérarchique [11] ou la modélisation avec d'autres formalismes que les automates à états. Les réseaux de Petri (RdP) sont un ensemble de formalismes réputés comme permettant de construire des modèles clairs et de taille réduite. Dès lors, de nombreux travaux ont porté sur la définition de nouvelles approches basées sur l'utilisation des RdP dans le cadre de la théorie RW. Ces approches ont fourni des résultats forts intéressants et de nouveaux concepts et méthodes ont été proposés pour la synthèse de superviseurs.

C'est dans ce cadre que nous présentons un premier résultat de nos travaux de thèse qui ont débuté en Septembre 2004. L'objectif de cette thèse est de proposer une approche multi-modèle pour la prise en compte des modes de fonctionnement des SED en utilisant les RdP, tout en intégrant les aspects concision des modèles et optimalité des trajectoires de commande. Ayant fait le choix d'exclure du cadre de nos travaux les aspects temporels, notre état de l'art porte sur l'utilisation des RdP ne modélisant pas le temps dans le cadre de la supervision des SED. En plus de nous permettre de faire un bilan sur les possibilités actuelles de la synthèse par RdP, cet état doit nous permettre de choisir la classe de RdP à utiliser pour notre besoin particulier (et nouveau dans le cadre de la synthèse par RdP) de définition d'une approche multi-modèle. Nous avons donc établi des critères de comparaison permettant de distinguer les différentes théories entre elles. Par conséquent, en évaluant chaque approche suivant ces critères, il est possible de retenir la plus intéressante pour nos travaux.

Dans la suite de cet article nous rappelons tout d'abord les principes de la théorie RW. Nous détaillons ensuite les critères de comparaisons choisis ainsi que les valeurs d'évaluation des approches. Nous présentons par la suite différentes approches, représentatives des travaux existants, afin de les confronter à nos critères. Enfin, nous dressons un tableau comparatif qui nous permet de conclure et de mettre en perspectives la suite de nos travaux.

## THEORIE DE RAMDAGE ET WONHAM

Dans le cadre de cette théorie, le procédé est modélisé par un automate à états et son comportement est traduit

par le langage que génère cet automate. L'objectif recherché est d'imposer au procédé G un comportement spécifié tout en respectant un ensemble de contraintes traduites par le modèle de spécification E. Le principe de cette théorie repose sur la notion de retour d'état. Le procédé G étant sous supervision, il reçoit à partir de l'état dans lequel il se trouve un ensemble d'événements autorisés par le superviseur S (voir figure 1).

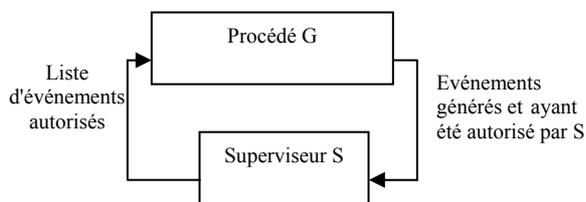


Figure 1 : Structure de supervision (système en boucle fermée : S/G).

Le superviseur S peut donc interdire ou autoriser certains événements afin de restreindre le fonctionnement du procédé à un fonctionnement désiré K, où K est un sous langage de L(G). Ces événements sont donc scindés en deux sous ensembles : contrôlables (peuvent être inhibés par le superviseur) et incontrôlables (toujours autorisés par le superviseur). En partant du modèle du procédé G et du modèle de spécifications E, le langage désiré  $K = L(G) \cap L(E)$  représente donc le fonctionnement que l'on désire obtenir en boucle fermée. Par conséquent, le problème de la synthèse revient à définir un superviseur S tel que  $L(S/G) = L(G) \cap L(E)$ . Cependant, l'existence d'événements incontrôlables introduit la notion de contrôlabilité qui traduit la possibilité de restreindre le comportement du procédé à un sous-ensemble donné. S'il s'avère que ce langage n'est pas contrôlable, le concepteur est amené à chercher un sous-ensemble de ce langage qui respecte la spécification et qui soit contrôlable : c'est le langage suprême contrôlable noté SupC(K).

### CRITERES DE COMPARAISON ENTRE LES APPROCHES UTILISANT LES RDP

De nombreux travaux ont été menés concernant les approches utilisant les Rdp, car il existe plusieurs façons d'aborder la théorie du contrôle par supervision en exploitant ces formalismes. Les Rdp proposent de nombreux concepts à travers toutes les classes de Rdp existantes. D'une approche à une autre, ces concepts diffèrent, de nouvelles notions sont introduites et ceci nous conduit à nous poser les questions suivantes :

- Quelle classe de Rdp utilise chaque approche ?
- Quels sont les outils mathématiques exploités pour calculer un superviseur ?
- Est-ce que le contrôleur est représenté toujours sous forme de places de contrôles ou existe-t-il d'autres moyens de le représenter ?
- Comment est définie la notion de contrôlabilité ?
- Comment sont définies les spécifications ? ...

Afin de répondre à ces questions, nous avons établi des critères de comparaison que nous allons maintenant présenter.

- **Critère 1 : choix de la classe de Rdp et de leurs propriétés initiales.** La modélisation du procédé est une étape préliminaire fondamentale pour la conception de la commande. Elle doit permettre de représenter d'une manière claire les principaux mécanismes des SED à savoir les phénomènes de synchronisation, de parallélisme et de partage de ressources. C'est pourquoi le choix d'une classe par rapport à une autre ne doit pas se faire au hasard, car cette dernière doit permettre une représentation concise d'une large classe de systèmes tout en offrant un modèle riche en informations.

- **Critère 2 : les spécifications de contrôle.** Elles sont exprimées sous forme de marquages interdits (exprimant des états ou des situations qui ne doivent pas être atteints), sous forme de contraintes linéaires (limiter la taille d'un stock, le nombre de ressources, etc.) ou sous forme de séquence interdites (lors de l'évolution du marquage). De manière classique dans la théorie RW, les spécifications sont liées aux objectifs de production (ce qu'il faut faire pour produire) et de sécurité (ce qu'il ne faut pas faire ou comment réagir en cas de problème). L'utilisation des Rdp permet également d'enrichir ces spécifications par des spécifications qualifiées de comportementales (bornitude, vivacité, etc.) et qui traduisent explicitement des propriétés du système modélisé : blocage du système, possibilité de revenir à l'état initial, etc.

L'étape de spécification est importante car elle permet de traduire des contraintes textuelles en des contraintes liées au formalisme Rdp. Il faut alors choisir une forme qui permet de décrire le plus de spécifications possibles et qui présente une expression concise de ces dernières. Pour cela, nous considérons que les contraintes linéaires et les séquences interdites permettent de décrire beaucoup plus de spécifications que les marquages interdits. En effet, ces derniers ne permettent pas de décrire toutes les spécifications possibles et conduisent à une énumération fastidieuse de tous les états à interdire.

- **Critère 3 : contrôlabilité.** La notion de contrôlabilité permet de déterminer si les spécifications sont admissibles et si le système est commandable, c'est-à-dire, s'il existe un superviseur permettant de garantir le respect des contraintes à imposer. Il est donc primordial de traiter le problème de contrôlabilité car, dans un système réel, la présence d'événements incontrôlables est incontestable.

- **Critère 4 : difficulté de mise en œuvre.** Grâce à leur caractère formel, les Rdp offrent des outils mathématiques qui permettent la vérification des propriétés pour la synthèse d'un superviseur. La complexité des algorithmes et la difficulté d'application des démarches sont un frein à l'utilisation des approches. Ainsi, nous considérons que les approches doivent, pour être utilisables par des non spécialistes, être applicables de la manière la plus systématique et la plus simple possible.

- **Critère 5 : intégration du superviseur.** Dans l'approche utilisant le formalisme RdP, le superviseur peut être intégré sous différentes formes : places et arcs de contrôle, arcs inhibiteurs, etc. Ceci permet de visualiser graphiquement l'évolution du système et de sa commande. Cependant, en fonction de la forme d'intégration du superviseur, il est important de garder une bonne visibilité du modèle en lui conservant une taille convenable (nombre de places, de transitions et d'arcs).

- **Critère 6 : synthèse en ligne ou hors ligne.** Certaines approches proposent une synthèse hors ligne, où le superviseur est calculé une fois pour toute, sur l'ensemble de l'espace d'états. Pour une synthèse en ligne, le superviseur est calculé en fonction de l'état courant du système, sur un horizon fini d'états. La synthèse en ligne est intéressante si l'on veut éviter de calculer tout l'espace d'état ou si les modèles changent en temps réel (reconfiguration de la commande suite, par exemple, à un dysfonctionnement). Cependant, cette synthèse peut poser des problèmes de blocage et donc une synthèse hors ligne serait plus sûre. Ainsi, le choix dépend de la nature du problème à étudier et une approche permettant de réaliser à la fois une synthèse en ligne et hors ligne satisfera plus de concepteurs.

- **Critère 7 : optimalité.** Lors de la synthèse d'un superviseur, ce dernier peut être optimal (le plus permissif possible) ou non. Certaines approches proposent leur propre définition de l'optimalité ou montrent l'existence de contrôleurs optimaux. La meilleure des approches est celle qui offre un superviseur le plus permissif possible, et ceci afin d'éviter l'interdiction des états du système devant être autorisés.

### SUPERVISION DES SED PAR RDP

Dans cette partie, nous exposons les théories basées sur les RdP pour synthétiser un superviseur en les situant par rapport aux critères énoncés ci-dessus. Nous avons retenu ces approches car elles sont représentatives de la plupart des travaux existants.

#### Théorie De Contrôle Par Les Graphes D'événements

Les travaux de Krogh et Holloway [7] exposent l'utilisation des RdP dans la théorie du contrôle par supervision. Ces derniers ont exploité les graphes d'événements contrôlés et cycliques qui sont vivants et saufs [8]. Cette classe permet de représenter les synchronisations mais ne permet pas de modéliser les situations de conflit, ce qui constitue une restriction au niveau de la modélisation. La méthode ainsi proposée exploite uniquement les marquages interdits et n'étudie pas les spécifications comportementales et donc elle est limitée lors de la description des contraintes. Cependant, la notion de contrôlabilité est étudiée afin de vérifier si un contrôle peut être exercé ou pas. Les auteurs ont défini de nouveaux concepts (chemins d'influence, de précedence, etc.) afin d'identifier les marquages admissibles de ceux devant être interdits. Ces outils sont

intéressants, cependant la recherche des chemins d'influence ne se fait pas de manière systématique. Il faut les déterminer en analysant le graphe d'événements sachant que nous pouvons avoir plusieurs chemins possibles. Le superviseur calculé est alors intégré sous forme de places de contrôle avec des gardes. Cette forme d'intégration ne permet pas de visualiser l'évolution du système avec sa commande car si elle permet de voir quelles places sont contrôlées, elle ne donne pas d'indication sur les contrôles actifs à chaque instant. Par contre, la synthèse est proposée en ligne et hors ligne et le superviseur obtenu est toujours optimal pour la synthèse en ligne.

L'exemple de la figure 2 montre l'ajout d'une place de contrôle pour éviter le marquage de la place  $P_2$ .

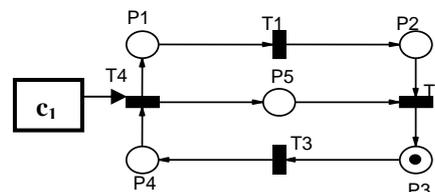


Figure 2 : Graphe d'événements contrôlés et cycliques.

Dans ce cas, la place de contrôle  $c_1$  agit directement sur la transition  $T_4$  dont le franchissement n'est autorisé que lorsque  $u(c_1) = 1$ . Ainsi, pour éviter le marquage de la place  $P_1$ , il suffit d'avoir  $u(c_1) = 0$ .

Plusieurs travaux se sont inspirés et ont étendus l'approche de [8]. Nous pouvons citer [5] où les auteurs utilisent des graphes d'événements, pas forcément cycliques ou saufs, pour proposer une méthode de contrôle. Dans [11], l'auteur propose, comme outil de modélisation, les RdP objets contrôlés. Nous pouvons aussi évoquer les travaux de [6] et [1].

#### Approche Basée Sur Les RdP Colorés Et Synchronisés

Dans [3], Godon a élaboré une théorie basée sur les RdP colorés et synchronisés dont les transitions sont sensibles à une seule couleur. Bien que les RdP colorés permettent d'enrichir le modèle du procédé et de le rendre plus compact, Godon utilise une classe plus restreinte de ces derniers. D'où, la concision recherchée pour le modèle se trouve limitée. Les spécifications de contrôle sont exprimées sous forme de marquages interdits pour les contraintes primaires (liées aux objectifs de sécurité) et secondaires (recherche des propriétés). L'intéressant, c'est que les spécifications comportementales sont prises en compte. Cependant, l'utilisation des marquages interdits peut conduire à une énumération fastidieuse de tous les états à interdire ou des états à partir desquels on doit empêcher l'atteinte d'états non autorisés. Le concept de contrôlabilité est pris en compte dans cette théorie afin de s'assurer qu'un contrôle peut être appliqué et aussi pour rechercher, d'une façon semblable à celle de R&W, le SupC(K). Pour la synthèse de superviseurs,

Godon propose des algorithmes basés sur la construction du réseau maximal<sup>1</sup> (pour l'application des contraintes secondaires). L'approche est simple à appliquer, cependant la construction du réseau maximal peut s'avérer fastidieuse, surtout si la taille du modèle initial est importante. Ainsi, le superviseur est intégré sous forme d'arcs inhibiteurs. Cette forme d'intégration est intéressante car elle permet de conserver le nombre de places et de transitions du modèle initial. Néanmoins, l'intégration n'est parfois pas possible (lorsque plusieurs arcs inhibiteurs sont reliés à une même transition, le contrôle obtenu est moins permissif et l'intégration du superviseur n'est pas envisageable) ou elle peut nécessiter l'ajout de nouvelles places (lorsqu'une transition est reliée à la même place par un arc normal et un arc inhibiteur). La synthèse proposée n'existe que dans le cas hors ligne. Finalement, le superviseur intégré n'est pas toujours optimal.

L'exemple de la figure 3 illustre le modèle d'un système en intégrant le superviseur calculé.

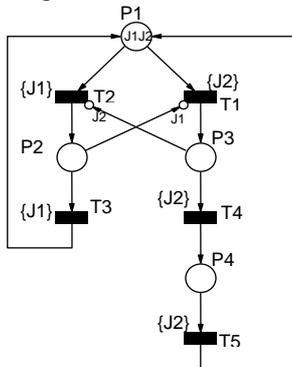


Figure 3 : Superviseur intégré sous forme d'arcs inhibiteurs.

Godon a aussi introduit, comme extension de ces travaux, la notion de séquences interdites pour pouvoir exprimer les contraintes primaires car les marquages interdits ne permettent pas de décrire plusieurs spécifications. Cette nouvelle notion permet d'enrichir les spécifications « statiques » (interdiction d'un état) par des spécifications dynamiques (interdiction d'une évolution particulière). L'idée consiste à ne pas considérer des marquages interdits mais des transitions interdites pour un marquage donné.

### Théorie de contrôle Basée Sur Les Invariants De Place

Dans [14], les auteurs utilisent des RdP ordinaires et k-bornés. Cette classe de RdP peut être appliquée à la modélisation de toutes sortes de systèmes. Dans cette approche, les spécifications sont exprimées sous forme de contraintes linéaires<sup>2</sup> et ne traite pas les spécifications

<sup>1</sup> Le réseau maximal est un RdP où chaque place représente un marquage du réseau initial tout en éliminant les marquages interdits.

<sup>2</sup>  $\sum_{i=1}^n l_i \mu_i \leq \beta$ , où  $\mu_i$  représente le marquage de la place  $p_i$ ,  $l_i$  et  $\beta$  sont des entiers constants.

comportementales. Les contraintes linéaires présentent une expression plus concise que les marquages interdits. Elles évitent ainsi une énumération exhaustive de tous les marquages à interdire. Toutefois, l'approche ne se penche pas sur l'étude du problème de contrôlabilité, ce qui constitue un point faible important. La démarche de synthèse du superviseur est quant à elle simple à appliquer. Elle utilise les invariants de place et la matrice d'incidence. Le superviseur est alors intégré sous forme de places et arcs de contrôle. Cette forme d'intégration nous offre une vision claire et concise de la commande, mais elle augmente la taille du modèle initial par l'ajout des places de contrôle. La synthèse proposée est hors ligne et il est montré que le superviseur est optimal. Cependant, lorsque les spécifications ne sont pas exprimées en terme de contraintes linéaires, ces dernières doivent être transformées afin d'être écrites sous cette forme et l'optimalité du superviseur n'est alors garantie que pour des RdP saufs.

La figure 4 représente le modèle d'un système contrôlé. Dans ce modèle, la place de contrôle  $P_c$  assure une capacité de la place  $P_5$  ne dépassant pas un jeton à la fois. Ceci peut par exemple correspondre à la capacité d'un stock ne dépassant pas une pièce à la fois :  $M(P_5) \leq 1$ .

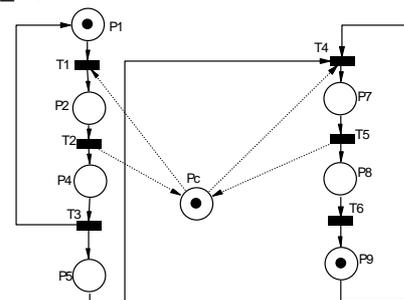


Figure 4 : Modèle d'un système contrôlé.

Dans [9] et [10] les auteurs étendent l'utilisation du concept des invariants de place (par rapport à [14]) aux réseaux avec des transitions incontrôlables et non observables. L'évaluation de cette approche diffère par rapport à celle de [14] au niveau du problème de contrôlabilité et d'observabilité des transitions, mais il n'est pas démontré que le superviseur obtenu est toujours optimal. Dans [2], les auteurs exploitent le même principe pour la synthèse d'un superviseur sous la forme de places de contrôle. Pour cela, ils proposent un algorithme qui permet d'imposer les contraintes linéaires souhaitées. La méthode proposée assure une permissivité maximale si les spécifications de contrôle sont admissibles.

### Approche de Contrôle Basée Sur La Théorie Des Régions

Dans [4], les auteurs utilisent des RdP ordinaires, k-bornés et purs. Les contraintes sont exprimées sous forme de marquages interdits. Nous jugeons qu'il est plus intéressant d'exprimer les spécifications sous forme

de contraintes linéaires ou de séquences interdites. L'approche prend en compte le concept de contrôlabilité. Ce dernier est basé sur l'élimination des marquages interdits, afin d'obtenir le comportement admissible du système en boucle fermée. Le superviseur est alors calculé en appliquant la théorie des régions. Cette théorie est assez compliquée et n'est pas facile à appliquer car elle entraîne la résolution d'un ensemble d'inégalités linéaires. De plus, lors de l'étape de spécification, il faut analyser le graphe de marquage pour déterminer les marquages à interdire et obtenir l'ensemble des marquages admissibles. Le superviseur est alors intégré sous forme de places et d'arcs de contrôle, ce qui augmente la taille du modèle initial. Finalement, la synthèse proposée est hors ligne et il est montré que le superviseur obtenu est toujours optimal.

L'exemple de la figure 5 montre le modèle supervisé d'un système en appliquant la théorie des régions.

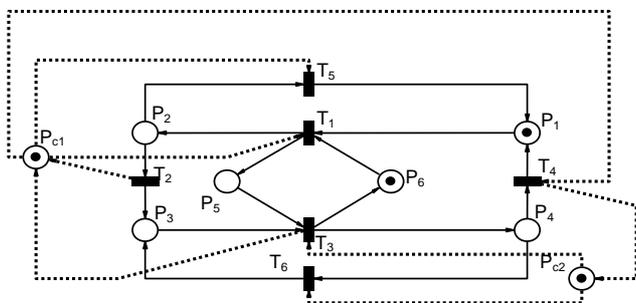


Figure 5 : Modèle supervisé.

Dans cet exemple, l'ajout des places  $P_{c1}$  et  $P_{c2}$  permet d'éviter les situations de blocage qui existaient dans le modèle initial.

### COMPARAISON DES APPROCHES

Les classes de RdP utilisées dans les approches présentées ne sont pas parmi celles qui permettent d'obtenir les modèles les plus concis. Cependant les RdP colorés (même limités) de [3], les RdP ordinaires [14] ou les RdP purs [4] sont tout de même plus riches que les graphes d'événements.

L'interdiction de marquages est le mécanisme de base utilisé pour l'expression de toutes les spécifications. Les approches [3] et [14] vont plus loin en utilisant les contraintes linéaires ou les séquences interdites pour exprimer une plus grande variété de contraintes. Les propriétés comportementales [3] offrent également d'intéressantes possibilités d'expression formelle de propriétés souvent considérées comme implicites.

La notion de contrôlabilité est utilisée dans toutes les approches sauf dans [14], ce qui d'après nous limite sérieusement l'intérêt de cette approche.

La difficulté de mise en œuvre est probablement le critère le plus important à évaluer pour les non spécialistes. Nous considérons, que de ce point de vue, les méthodes proposées par les approches [3] et [14] sont systématiques et plus faciles à mettre en œuvre, surtout par rapport à la théorie des régions.

L'intégration du contrôleur passe quasiment toujours par l'utilisation de places de contrôle. Sauf pour [3], où le contrôle ne nécessite pas l'ajout de ces places. Dans

Tableau 1 : Comparaison des approches par rapport aux critères.

Critères	Classe de RdP	Spécifications de contrôle	Contrôlabilité	Difficulté de mise en oeuvre	Intégration du contrôleur	Approche « en ligne » ou « hors ligne »	Optimalité
<b>Approches</b>							
[8] <i>Graphes d'événements Contrôlés et cycliques</i>	- Graphes d'événements contrôlés et cycliques. - Saufs et vivants. (moyen)	- Marquages interdits. - Pas d'étude de propriétés comportementales. (moyen)	- Transitions contrôlables et incontrôlables. (très bon)	- Chemins d'influence, chemins de précédence, ... (bon)	- Places de contrôles, auxquelles on associe un vecteur de contrôle. (moyen)	- Approche « en ligne » et « hors ligne ». (très bon)	- Superviseur toujours optimal. (très bon)
[3] <i>RdP colorés et synchronisés</i>	- Colorés et synchronisés. - Chaque transition du réseau n'est sensible qu'à une seule couleur. (bon)	- Marquages interdits. - Séquences interdites. - Etude de propriétés comportementales. (bon)	- Transitions contrôlables et incontrôlables. (très bon)	- Détermination de l'ensemble de contrôles, grâce à un algorithme. - Réseau maximal. (très bon)	- Arcs inhibiteurs : l'intégration nécessite parfois l'ajout de nouvelles places. (très bon)	- Approche « hors ligne ». (bon)	- Dans certains cas, l'intégration du superviseur n'est pas envisageable et n'est pas optimal. (bon)
[13] <i>Invariants de place</i>	- Ordinaires et k-bornés. (bon)	- Contraintes linéaires. - Pas d'étude de propriétés comportementales. (bon)	- Transitions contrôlables. (mauvais)	- Matrice d'incidence, invariants de place. (très bon)	- Places de contrôle. (bon)	- Approche « hors ligne ». (bon)	- Superviseur optimal si contraintes linéaires (bon)
[4] <i>Théorie des régions</i>	- Purs, k-bornés. (bon)	- Marquages interdits en imposant la contrainte de vivacité. (moyen)	- Transitions contrôlables et incontrôlables. (très bon)	- Graphe de marquages, théorie des régions. (moyen)	- Places de contrôle. (bon)	- Approche « hors ligne ». (bon)	- Superviseur optimal. (très bon)

[8], il faut également associer un vecteur de contrôle à chaque place, ce qui réduit la lisibilité du modèle.

Une seule approche permet la synthèse en ligne, c'est celle de Krogh et Holloway [8].

Quant à l'optimalité, elle est toujours garantie pour [4] et [8]. Pour [14] elle est assurée tant que les spécifications sont écrites sous la forme proposée pour les contraintes linéaires. Enfin, pour [3] l'intégration du superviseur dans certains cas peut conduire à un contrôle plus restrictif.

A partir de ces comparaisons, nous avons établi le tableau 1 dans lequel chaque approche est évaluée, en fonction des comparaisons précédentes, avec une note allant de « mauvais » (dans le cas unique de l'approche [14] qui n'aborde pas la contrôlabilité) à « très bon ». Nous remarquons à partir de ces notes que l'approche de Godon [3] est la plus homogène car elle n'obtient que des notes « bon » ou « très bon ».

## CONCLUSION

Le travail présenté dans cet article concerne la théorie de contrôle par supervision des SED par les réseaux de Petri. A partir de la présentation de la théorie RW, nous avons posé un certain nombre de questions qui nous ont permis de définir des critères de comparaison entre les approches. Parmi les approches étudiées, l'approche proposée par Godon nous a semblé être celle qui répond le mieux à nos attentes. Elle n'est pourtant pas définitivement la meilleure méthode possible, notamment à cause de l'optimalité qui n'est pas toujours garantie, pour la classe de RdP utilisée et pour l'utilisation des marquages interdits. Cependant, nous pouvons dire que les critères n'ont pas la même importance, puisque certaines approches privilégient se focaliser sur des critères au dépend des autres pour pouvoir trouver une solution au problème de supervision. Nous pensons que la meilleure approche est celle qui tend à réconcilier les différents critères.

Nos futurs travaux de thèse vont donc porter sur l'extension de l'approche de Godon pour une meilleure intégration du superviseur, l'expression des contraintes, l'enrichissement du modèle du procédé et la prise en compte des modes de fonctionnement dans une approche multi-modèle.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Boel, R.K., Ben-Naoum, L. and Van Breusegem, V. *On forbidden state problems for a class of controlled Petri nets*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 10, Octobre 1995, pp.1717-1731.
2. Basile, F., Chiacchio, P. and Giua, A. *On the choice of suboptimal monitors for supervisory control of Petri nets*. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, California, Octobre 1998, pp. 752-757.
3. Godon, A. *Contribution à la commande des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri*. Thèse de doctorat en Automatique Industrielle, Université d'Angers, Novembre 1996.
4. Ghaffari, A., Rezg, N. et Xie, X. *Conception du superviseur optimal vivant à l'aide de la théorie des régions*. Modélisation des Systèmes Réactifs, Actes de MSR, Toulouse, Octobre 2001, pp. 40-54.
5. Ghaffari, A., Rezg, N. and Xie, X. *Feedback control logic forbidden-state problems of marked graphs: application to a real manufacturing system*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 48, No. 1, Janvier 2003, pp.18-28.
6. Holloway, L.E, Guan, X. and Zhang, L. *A generalization of state avoidance policies for controlled Petri nets*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 41, no. 6, Juin 1996, pp. 804-815.
7. Holloway, L.E. *Feedback control synthesis for a class of discrete event systems using distributed state models*. Technical Report, LASIP-88-17, 1988.
8. Holloway, L.E. and Krogh, B.H. *Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 35, no. 5, Mai 1990, pp. 514-523.
9. Moody, J.O. and Antsaklis, P.J. *Supervisory control of Petri nets with uncontrollable / unobservable transitions*. Proceedings of the 35<sup>th</sup> Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, Décembre 1996, pp. 4433-4438.
10. Moody, J.O. and Antsaklis, P.J. *Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no. 3, March 2000, pp. 462-476.
11. Rezg, N. *Contribution à la sécurité opérationnelle des systèmes: mise en œuvre d'une structure de surveillance basée sur les réseaux de Petri objets contrôlés*. Thèse de doctorat en Automatique Industrielle, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Janvier 1996.
12. Wonham, W.M. *Notes on control of discrete-event system*. System Control Group, ECE. Dept., University of Toronto, July 2002.
13. Wonham, W.M. *Supervisory control theory : models and methods*. Workshop on Discrete Event System Control, 24<sup>th</sup> International Conference on Application Theory of Petri Nets (ATPN 2003), June 2003.
14. Yamalidou, K., J., Lemmon, M. and Antsaklis, P. *Feedback control of Petri nets based on place invariants*. Automatica, vol. 32, No. 1, 1996, pp. 15-28.