

Démarche de formalisation et de synthèse de procédures d'exploitation d'une ligne de métro

Delphine PAQUEREAU^{1,2}, Laurent PIÉTRAC¹, Eric NIEL¹, Laurent BOURESCHÉ²

¹Laboratoire AMPERE UMR 5005 - INSA Lyon - Bâtiment Saint Exupéry
25 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France.
{prénom.nom}@insa-lyon.fr

² THALES COMMUNICATIONS & SECURITY,
20 Rue Grange Dame Rose, 78140 Vélizy, France.
{prénom.nom}@thalesgroup.com

Résumé— L'objectif de cet article est de présenter une démarche de modélisation et de synthèse de procédures d'exploitation pour la supervision d'une ligne de métro. Cette démarche s'organise en quatre étapes : tout d'abord la classification des données afin de faire ressortir des caractéristiques et séquences communes, puis la formalisation de ces procédures avec le langage BPMN 2. La démarche propose ensuite de modéliser les procédures avec des réseaux de Petri et d'appliquer la théorie du contrôle par supervision afin de garantir que les procédures mises en place respectent les propriétés de vivacité et de sécurité nécessaires dans ce domaine d'application.

Mots-clés— Supervision, système de transport, BPMN 2, réseaux de Petri, synthèse de contrôleurs, procédure d'exploitation

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, la supervision du trafic des métros a évolué avec l'arrivée des systèmes informatisés de contrôle et de commande qui a modifié le rôle de l'opérateur humain. L'automatisation des opérations s'est généralisée pour faire progresser la sécurité ainsi que l'offre proposée aux voyageurs. Cependant, il existe toujours des modes d'exploitation dans lesquels l'opérateur humain doit reprendre le contrôle des opérations, comme lors d'un incident. Les conditions de transport sont alors fortement dégradées et le retour à une exploitation normale est confié aux opérateurs qui mettent en place des stratégies élaborées suivant leur expérience et leur savoir-faire. Aujourd'hui, le système de supervision développé par la société Thales signale par alarmes les dysfonctionnements qui se produisent sur la ligne mais n'apporte pas d'aide à la décision à l'opérateur pour une gestion globale de l'incident.

Afin de proposer des procédures structurées aux exploitants de métro pour gérer les situations perturbées, il faut s'assurer et garantir que ces procédures soient sûres et non bloquantes. En effet, la sécurité des usagers, du personnel et du matériel est primordiale et dans un souci d'offrir le meilleur service possible aux voyageurs, les situations de blocage ne sont pas acceptables.

La société Thales souhaitant enrichir son application de supervision, mes recherches s'inscrivent dans le cadre d'une thèse CIFRE et cet article présente le bilan de ma première année ainsi que les perspectives envisagées. La première partie de l'article sera consacrée à la présentation du système de supervision d'une ligne de métro développé par Thales au travers de la problématique et de la démarche

d'étude. La classification et la formalisation des procédures d'exploitation seront ensuite exposées et développées dans des parties distinctes puis illustrées d'un exemple concret : la réalimentation en énergie électrique d'une partie de la ligne. Les perspectives d'études sur la modélisation et la synthèse de ces procédures seront également développées dans une partie dédiée aux recherches bibliographiques. La dernière partie présentera les conclusions et les perspectives des recherches exposées.

II. CONTEXTE D'ÉTUDE

A. Problématique

Au cours d'une journée d'exploitation d'une ligne de métro, de nombreux incidents peuvent venir perturber la bonne gestion du trafic et donc diminuer considérablement l'offre proposée aux usagers, comme lors de l'incident sur la ligne 4 de la RATP en 2005 [1]. Les systèmes modernes de supervision de trafic d'une ligne de métro appelés Automatic Train Supervision (ATS) assurent le contrôle de l'exécution de l'offre de transport en supervisant les systèmes d'acquisition et de commande directement reliés au terrain [2].

Lorsqu'une perturbation se produit sur la ligne, les opérateurs utilisant l'application de supervision peuvent réaliser des adaptations simples sur le planning d'exploitation des trains afin de garantir un service continu aux voyageurs. L'interface leur propose de nombreux dialogues leur permettant entre autres d'ajouter ou de supprimer des circulations de trains, de garer un train, de modifier le temps d'arrêt en station... Lorsque la perturbation nécessite des adaptations plus importantes du trafic, l'exploitation est alors en mode dégradé. Les opérateurs de supervision peuvent par exemple couper le courant de traction sur l'ensemble de la ligne et le rétablir progressivement pour alimenter et exploiter la plus grande partie de la ligne non impactée par l'incident. Ils possèdent également le moyen de communiquer avec l'ensemble des conducteurs afin d'avoir une vision plus claire de la situation. Dans tous les cas, les superviseurs s'efforcent de réduire au minimum la zone de l'incident où la circulation est interrompue afin de diminuer la gêne occasionnée aux voyageurs.

Dans le but d'assurer aux passagers le meilleur service possible, l'industriel souhaiterait développer une aide à l'opérateur [3] pour uniformiser et améliorer la ges-

tion du trafic à la suite d'une perturbation ayant fortement dégradé les conditions d'exploitation [4]. L'application n'apporterait pas seulement des outils pour gérer ces situations, comme c'est le cas aujourd'hui, mais également des méthodes d'utilisation. La mise en place de procédures d'exploitation permettrait ainsi à l'opérateur de supervision d'être guidé par une ligne directrice lors de la gestion d'un incident. Lorsque l'exploitation est en mode dégradé, l'opérateur se trouve dans un environnement stressant puisqu'il est responsable de la sécurité des personnes présentes sur la ligne. Le nombre d'intervenants sur le terrain, la variété du public concerné (de l'usager au pompier), le nombre de procédures à gérer simultanément sont également des contraintes à prendre en compte pour appréhender les responsabilités de l'opérateur de supervision dans ces situations.

B. Démarche

Pour établir des procédures d'exploitation pour la supervision d'une ligne de métro, une démarche de recherche a été choisie s'organisant en quatre étapes. Il faut tout d'abord acquérir et analyser les connaissances et savoir-faire des opérateurs sur la gestion d'un incident, notamment les procédures mémorisées, puis les classer pour mettre en évidence des structures et des caractéristiques communes. Cette analyse permet ainsi d'établir un graphe des dépendances pour hiérarchiser les procédures et identifier différentes inclusions. L'étape suivante consiste à formaliser ces procédures avec la notation graphique standardisée BPMN 2.0¹ pour mettre, entre autres, en évidence les différents échanges entre les intervenants, les caractéristiques des activités ainsi que les séquences de progressions parallèles. Ces deux premières phases de l'étude ont été réalisées au cours de la première année de thèse et seront illustrées par un exemple, les phases suivantes sont des perspectives de recherche. Ainsi, en s'appuyant sur la formalisation en langage BPMN, une modélisation des procédures sous forme de réseaux de Petri est ensuite envisagée. Dans cette perspective, la synthèse de contrôleurs permettrait, lors d'une dernière étape, de faire ressortir d'éventuels blocages qui pourraient apparaître lors de l'application de plusieurs procédures simultanément et d'envisager ainsi l'ensemble des solutions possibles sur les modèles. Les procédures sont formalisées et modélisées par rapport aux actions réalisées par l'opérateur de supervision, principal utilisateur de l'application ATS et chef de régulation de la ligne de métro considérée.

Afin de développer une aide à la décision, il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension du système et de ses contraintes ainsi que des perturbations pouvant se produire lors de l'exploitation d'une ligne de métro. L'acquisition de ces connaissances permet de classer et formaliser des procédures d'exploitation utilisées quotidiennement par les opérateurs de supervision mais qui sont aujourd'hui uniquement mémorisées.

III. CLASSIFICATION

L'augmentation de la fréquence des métros et du nombre de voyageurs provoquent de plus en plus d'avaries et

d'incidents qui se produisent dans des situations variées [5]. Plusieurs types de classifications des incidents et des procédures peuvent être mis en place à la suite de l'acquisition et de l'analyse des données, en fonction des caractéristiques prises en considération.

A. Gravité de l'incident

On peut tout d'abord classer les incidents suivant leur impact sur le trafic et la régulation de la ligne. Ainsi un incident sera considéré comme mineur si son impact est progressivement absorbé par les algorithmes de régulation en temps réel de l'application et si les opérateurs ont très peu d'actions à réaliser sur le système. Il engendrera seulement des faibles retards et des temps de stationnement plus longs en station. On peut citer comme exemple le retard pris par un conducteur en raison d'un nombre élevé de voyageurs sur le quai désirant rentrer dans les voitures.

Les perturbations majeures, quant à elles, nécessitent l'intervention des opérateurs de supervision et peuvent être la conséquence de divers événements d'exploitation dont l'origine varie, comme par exemple un voyageur descendu sur les voies ou une avarie de la signalisation. Les répercussions sur la sécurité des passagers et l'exploitation de la ligne seront donc plus importantes. Cependant, l'impact sur le trafic d'un incident majeur peut varier suivant le contexte dans lequel il se produit et suivant la rapidité de prise en charge par l'opérateur. Ainsi, le déclenchement d'un signal d'alarme pendant l'heure de pointe aura un impact plus important sur le trafic que lors d'une période creuse de la journée en raison du nombre de trains présents sur la ligne. Les incidents majeurs peuvent donc plus facilement être classés suivant leur cause que leur impact sur le trafic qui est variable suivant le contexte.

Par la suite, seuls les incidents considérés comme majeurs seront pris en compte puisque les incidents mineurs sont déjà en grande partie gérés par le système de supervision développé par Thales et ne nécessitent pas l'application d'une procédure.

B. Cause d'incident

Suivant le type d'élément concerné, les incidents se produisant lors de l'exploitation d'une ligne de métro peuvent être classés dans cinq catégories : les installations fixes, le matériel roulant, l'énergie de traction, les voyageurs et les événements extérieurs. Les incidents sur les installations fixes concernent l'ensemble des éléments terrain permettant la circulation des trains (feux de signalisation, aiguillage) et les incidents au matériel roulant se rapportent à l'ensemble des avaries pouvant se produire dans un train (motrice, frein, porte). En ce qui concerne les incidents liés à l'énergie, si le circuit électrique d'alimentation des trains est mis hors tension, tous les trains sont alors à l'arrêt jusqu'à la remise sous tension. De nombreux incidents sont également liés aux voyageurs (personne sur les voies, malaise dans un train), les conséquences variant suivant la gravité de l'accident. Une partie des incidents peut également avoir une cause extérieure à l'exploitation de la ligne mais provoquer d'importantes perturbations sur la circulation des trains (colis suspect, incendie, animal sur les voies).

En terme d'impact sur l'exploitation, 60% des retards sur le réseau des métros parisiens est causé par des inci-

1. Business Process Model and Notation

dents liés aux voyageurs, avec environ 300 accidents graves de voyageurs par an sur l'ensemble des 14 lignes. 20% des retards provient des avaries du matériel roulant ou des installations fixes, les causes de retard restantes ayant des origines diverses.

C. Procédure d'exploitation

Pour prendre en compte un incident, une procédure définit l'ensemble des étapes à suivre et des actions à réaliser par l'opérateur. Le tableau suivant présente une liste non exhaustive de procédures globales permettant de gérer des incidents se déroulant lors de l'exploitation d'une ligne de métro.

TABLE I
EXEMPLES DE PROCÉDURES GLOBALES

Procédure globale
- arrêt automatique du train
- train stationné en interstation
- mise hors tension différée
- mise hors tension d'urgence
- non ouverture d'un signal de manœuvre
- anomalie d'un signal d'espacement
- alerte feu fumée
- présomption d'un voyageur sur les voies
- disjonction d'alarme

Au sein de ces procédures, on a remarqué qu'il existait des interactions impliquant notamment un partage de ressources. Par exemple, l'énergie de traction, permettant aux trains de circuler, alimente un circuit fermé en mode nominal, un incident au niveau électrique sera donc répercuté sur l'ensemble de la ligne avant que des zones isolées électriquement. De plus, les trains et les conducteurs sont des éléments mobiles au sein du système, s'ils ne sont pas concernés par un incident à son déclenchement, ils pourront cependant subir des perturbations par la suite. Bien qu'un incident soit géré par une procédure globale particulière, des procédures élémentaires ont été identifiées regroupant des successions d'activités communes.

D. Séquences d'activités communes

Au sein d'une procédure de gestion d'incident, des procédures élémentaires sont définies pour regrouper un ensemble d'activités ayant un objectif commun afin de hiérarchiser et d'ordonner la procédure globale. De plus, une procédure élémentaire peut être présente dans différentes procédures globales où l'on retrouve une séquence d'activités commune.

Le graphe des dépendances suivant permet de donner un exemple des différentes inclusions possibles entre les procédures. Les rectangles représentent les procédures globales permettant de gérer un incident et pouvant être déclenchées par l'occurrence d'un événement. Les procédures représentées par une ellipse ont uniquement pour but de regrouper un ensemble d'activités et correspondent donc à des procédures élémentaires ne permettant pas seules de gérer un incident.

On remarque dans le graphe des dépendances qu'une procédure globale *ISF 36* est incluse dans une procédure

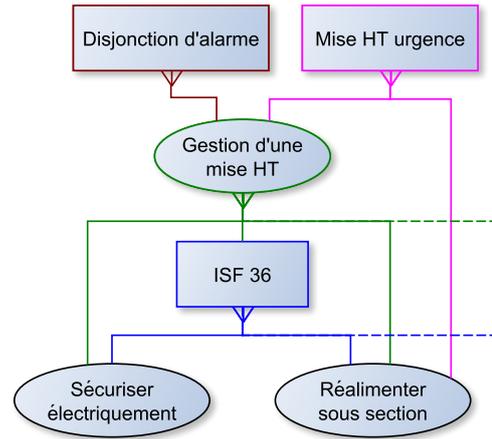


Fig. 1. Partie du graphe des dépendances

élémentaire *Gestion d'une mise HT*. Les relations entre les différentes procédures ne sont donc pas une simple hiérarchisation mais il existe de nombreuses inclusions et interactions entre elles, mise en évidence grâce aux procédures élémentaires.

Ces différentes classifications ont pour objet de mettre en évidence des similitudes entre les procédures et des regroupements possibles. Nous allons maintenant développer la deuxième étape de la démarche de mise en place de procédures d'exploitation en présentant leur formalisation dans le langage BPMN. Ainsi, les procédures globales seront formalisées indépendamment les unes des autres avec le langage BPMN tout en identifiant, sous forme de sous-procédures, les procédures élémentaires qu'elles emploient.

IV. FORMALISATION BPMN 2.0

A. Principe

Après avoir classifié les incidents et les procédures suivant différents critères, il est nécessaire de formaliser ces procédures d'exploitation dans un langage facilement compréhensible et accessible pour des industriels, la notation graphique standardisée BPMN 2.0 [6] a donc été choisie. Ce langage a déjà été retenu par la société Thales pour mettre en place une aide à la décision dans une application de supervision globale de systèmes complexes.

Le langage BPMN a été développé pour décrire des processus d'entreprise en mettant en mouvement l'ensemble des ressources humaines et matérielles. Il permet de générer un langage XML² d'exécution et de simuler le comportement décrit. Ce formalisme a le même fonctionnel que les diagrammes d'activités UML³ mais propose une notation permettant d'avoir une description plus précise du processus, comme des flux de messages, des couloirs d'activités par participants, des types d'activité. Ce langage permet ainsi de mettre en évidence certaines caractéristiques des procédures d'exploitation d'une ligne de métro comme les différents échanges entre les intervenants et la progression parallèle de certaines séquences. Cette notation est donc un intermédiaire entre une description littérale des procédures

2. eXtensible Markup Language

3. Unified Modeling Language

d'exploitation d'une ligne de métro et leur modélisation formelle.

B. Description des objets

Les diagrammes BPMN s'articulent autour de flux d'activités (tâche, sous-procédure) associés à des éléments de contrôle de flux (événements, branchements) et font intervenir des éléments de structuration autour des participants au processus (piste, couloir).

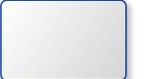
Événement	 Début Message  Intermédiaire  Fin Erreur
Branchement	 Ou exclusif  Parallèle
Activité	 Tâche  Sous-procédure
Type d'activité	 Utilisation d'une application par l'opérateur  Envoi d'un message  Tâche réalisée manuellement
Flux	 Séquence  Flux par défaut  Message

Fig. 2. Exemples d'objets BPMN

Une tâche représente une activité atomique du processus non décomposable en sous-activités contrairement aux sous-procédures qui représentent une activité subdivisible pouvant contenir d'autres activités. Pour chaque tâche, il est possible de spécifier la nature de l'action à réaliser (envoi d'un message, utilisation d'un logiciel...). Les événements de début, de fin ou intermédiaire du processus représentent un fait qui se produit pendant le déroulement et qui affecte le flux, un sigle qualifiant leur type (message, annulation, minuterie...). Les branchements sont les éléments de contrôle de flux qui gèrent les convergences et les divergences, ils sont de type inclusif, exclusif, parallèle ou complexe. Des connecteurs permettent de relier et de séquencer l'ensemble de ces éléments. Cette notation donne ainsi une vision globale des processus, des interactions entre les participants et de la progression du flux.

C. Développement de l'exemple

C.1 Présentation

Nous allons maintenant formaliser avec le langage BPMN la procédure élémentaire retenue comme exemple : la réalimentation en énergie électrique d'une partie de la ligne. Cette procédure permet de réaliser une remise sous tension électrique de la ligne après sa mise hors tension tout en maintenant une zone hors tension. Cette procédure est utilisée régulièrement par les opérateurs des lignes RATP su-

pervisées par le système ATS développé par Thales. En effet, lorsqu'un incident s'est produit sur la ligne, un conducteur ou un agent travaillant sur le réseau peut demander à l'opérateur de supervision de mettre hors tension l'ensemble de la ligne si la sécurité des passagers ou des agents n'est plus garantie. Une fois l'incident localisé et la zone impactée définie, il est possible de remettre sous tension la ligne à l'exception de la zone concernée afin d'exploiter au maximum la ligne et de perturber le moins possible les voyageurs. Cependant, avant cette remise sous tension partielle, un ensemble d'actions permettant de garantir la sécurité des personnes et d'éviter toute remise sous tension non contrôlée est nécessaire.

Comme expliqué précédemment, cette procédure est incluse dans des procédures globales où elle est représentée sous forme de sous-procédure (figure 3).



Fig. 3. Sous-procédure

C.2 Description du modèle

L'exécution de cette procédure élémentaire (figure 4) fait intervenir trois types de personnes : l'opérateur de supervision qui dirige le déroulement de la procédure, le conducteur ou l'agent ayant demandé la mise hors tension de la ligne et l'ensemble des conducteurs présents sur la ligne, principales personnes concernées par la présence ou non d'énergie électrique sur la ligne. Ces différents intervenants sont représentés dans le formalisme BPMN sous forme de pistes permettant ainsi de mettre en évidence les échanges d'informations.

La procédure de réalimentation d'une partie de la ligne débute par la réception, par l'opérateur de supervision, d'un message venant du conducteur ou agent ayant été à l'origine de la demande de mise hors tension de la ligne. Ce message doit permettre à l'opérateur de supervision d'identifier le lieu de l'incident ainsi que la zone de ligne impactée. Cet événement détermine donc le début de la procédure. L'opérateur doit ensuite demander, par communication téléphonique, à la personne concernée de sécuriser électriquement la zone de l'incident, cette tâche consistant à ouvrir le circuit électrique au niveau terrain. Une fois cette tâche réalisée, un message est de nouveau envoyé à l'opérateur de supervision pour lui confirmer que la zone est sécurisée au niveau terrain.

Le flux d'activités est ensuite séparé en deux séquences parallèles, l'opérateur doit d'une part anticiper, au travers de l'application, les futurs déplacements des trains s'approchant de la zone de l'incident en prévision de la remise sous tension. Il empêche ainsi un train de passer d'une zone sous tension à une zone hors tension une fois qu'il pourra à nouveau circuler et se prémunit donc d'un éventuel pontage électrique entre les deux zones. Il doit également, par l'intermédiaire de l'application de supervision, isoler électriquement au niveau informatique la zone concernée pour éviter toute remise sous tension non contrôlée de la

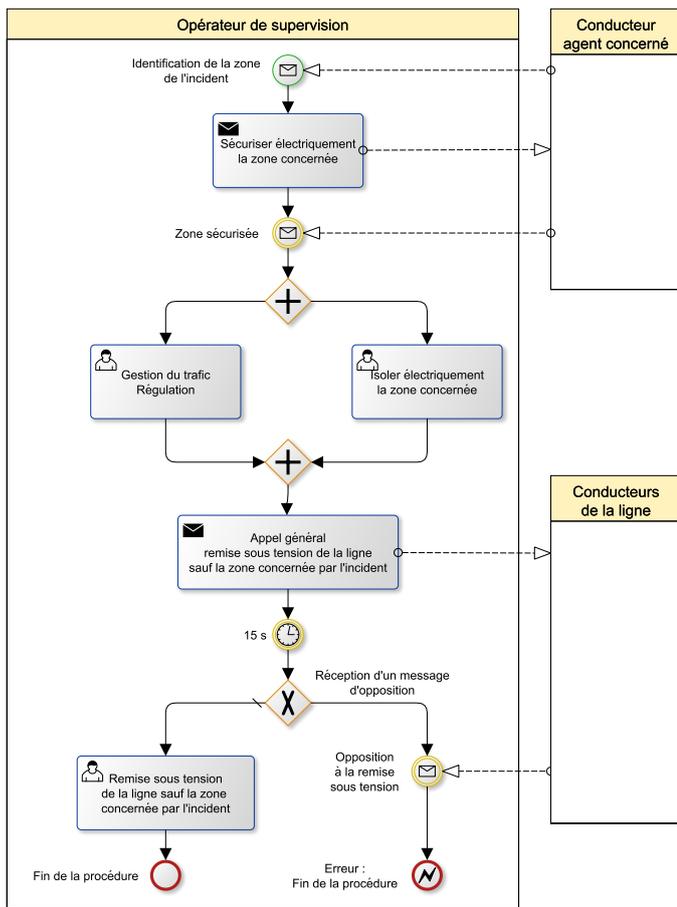


Fig. 4. Réalimentation d'une partie de la ligne

zone de l'incident. Lorsque les deux activités ont été accomplies, l'opérateur prévient l'ensemble des conducteurs qu'il va remettre sous tension la ligne à l'exception de la zone concernée par l'incident. Un temps d'attente d'environ 15 s est laissé aux conducteurs qui ont ainsi la possibilité d'envoyer un message à l'opérateur de supervision s'ils considèrent que la sécurité des personnes ne sera pas garantie si la remise sous tension est effective. Le branchement exclusif permet ensuite d'orienter le flux d'activités suivant la réception ou non d'un message provenant des conducteurs. Si l'un d'eux signale son opposition à la remise sous tension, la procédure élémentaire est alors terminée par l'émission d'un événement erreur et une nouvelle procédure sera alors enclenchée pour prendre en compte ce nouvel événement. Si aucun des conducteurs ne manifeste son opposition, le flux par défaut sera alors choisi et l'opérateur de supervision, par l'intermédiaire de l'application, remettra alors sous tension la ligne à l'exception de la zone concernée par l'incident qu'il a préalablement sécurisée au niveau terrain. L'accomplissement de cette activité marque ainsi la fin de la procédure élémentaire de réalimentation d'une partie de la ligne.

La formalisation des procédures avec le langage BPMN apporte une vision globale des interactions et du déroulement des actions tout en mettant en évidence les séquences de flux parallèles et exclusives, la procédure développée en exemple étant représentative de l'ensemble des procédures. Afin de poursuivre l'étude de la mise en

place de procédures d'exploitation d'une ligne de métro, il sera nécessaire de transformer par la suite les modèles des procédures dans un autre langage, comme les réseaux de Petri, afin de les vérifier et les valider.

V. MODÉLISATION ET SYNTHÈSE DES PROCÉDURES

A. Besoin

Dans la démarche de modélisation des procédures d'exploitation d'une ligne de métro, nous avons choisi de commencer par les formaliser avec le langage BPMN. Cette formalisation permet d'avoir une représentation graphique des séquences d'activités à réaliser ainsi que des échanges avec les différents intervenants, procédure par procédure, mais n'apporte pas d'outils pour synthétiser et étudier les liens et interactions qui pourraient exister entre elles. La formalisation BPMN ne permet également pas de représenter l'état des ressources du système, comme les ressources humaines disponibles, l'état des trains, l'état d'alimentation électrique des sections, l'état des signaux... L'application simultanée de procédures, dues à l'occurrence de plusieurs incidents, pourrait engendrer des conflits aux niveaux de l'état de ces ressources et mener à une situation de blocage de l'exploitation. Il devient alors compliqué pour l'opérateur de supervision de gérer en même temps ces incidents tout en respectant les priorités d'actions qu'impose la sécurité des personnes. Indépendamment de la gestion de l'incident, l'opérateur doit exploiter au mieux la ligne, en assurant une circulation optimale des trains. Aucune procédure n'est aujourd'hui clairement définie pour aider l'opérateur dans cette tâche de régulation. Une modélisation par réseaux de Petri de l'état électrique des zones de la ligne ainsi que la position des trains permettraient au système de supervision de proposer à l'opérateur les solutions envisageables voire la solution optimale pour exploiter au mieux la ligne.

L'objectif de la modélisation est d'évaluer les propriétés du système lors de l'occurrence simultanée d'incidents et, après avoir déterminé les priorités et les règles de sécurité à suivre, la synthèse de l'ensemble des procédures mettra en évidence les situations de blocage et permettra d'éviter les situations dangereuses en proposant des solutions pour la gestion des incidents et l'exploitation optimale de la ligne. Ces deux phases seront étudiées dans les prochaines années de la thèse et s'appuieront sur les références bibliographiques présentées dans les parties suivantes.

B. Les réseaux de Petri

Les réseaux de Petri (RdP) permettent de modéliser facilement différentes classes de système dont les comportements sont notamment caractérisés par des évolutions parallèles et des synchronisations. Ils permettent de représenter explicitement l'ensemble des états du système et de ses ressources. Le langage BPMN permet de représenter les étapes d'un processus sous forme d'activités et d'événements et les réseaux de Petri permettent de modéliser les différents comportements d'un système évoluant selon le franchissement de transitions. Le passage d'une modélisation à l'autre doit donc être étudié et normalisé et pourra permettre de modéliser l'état des ressources.

Depuis une dizaine d'année et le déploiement du langage

BPMN dans le monde industriel, des chercheurs étudient les modalités de transformation des modèles BPMN en réseaux de Petri et des articles présentent des correspondances possibles entre les éléments des langages tout en observant des limites. On peut citer par exemple l'approche développée par Vijverberg [7][8] qui propose d'utiliser le langage PNML⁴ d'échange de réseaux de Petri au format XML, pour étudier des procédures décrites par le langage BPMN. Il précise cependant que seuls les éléments BPMN ayant un comportement bien définis sont traduisibles et les procédures ne doivent avoir qu'un seul événement de début et un seul de fin. Dans [9], les auteurs définissent formellement le langage BPMN et sa traduction en réseaux de Petri. Certains éléments ne sont également pas pris en compte et certaines restrictions sur les modèles sont posées. En se basant sur cette transformation, des applications ont été réalisées, comme par exemple le développement d'un processus de dématérialisation de flux courrier [10].

Une partie des informations formalisées avec le langage BPMN comme le type des activités et des événements, les communications entre les différents intervenants de la procédure n'est plus aussi clairement identifiée. Les réseaux de Petri ont en effet un autre objectif que la formalisation BPMN, le but n'étant plus d'écrire des procédures compréhensibles par tous mais de modéliser des procédures sur lesquelles on pourra réaliser de la synthèse de contrôleurs pour que le système vérifie les propriétés de vivacité et de sécurité nécessaires à son exploitation.

C. Synthèse de contrôleurs

La théorie du contrôle par supervision [11] [12] permet de séparer la modélisation d'un système à états discrets de celles des spécifications qu'il doit respecter. Par synthèse du procédé et de ses spécifications, on détermine un modèle de commande complet qui respecte l'ensemble des propriétés voulues, un superviseur.

La synthèse de contrôleurs s'applique aux réseaux de Petri par différentes intégrations [13] [14] [15], comme par exemple les marquages ou les états interdits. Mais ces approches ont des limites qui sont en général l'utilisation du graphe d'accessibilité (aspect combinatoire) et la difficulté d'exprimer certaines spécifications. La théorie des régions semble être une alternative possible à ces limites [16], également pour les réseaux de Petri colorés [17].

En proposant à l'opérateur, par l'intermédiaire de l'application de supervision, les actions à réaliser qui prennent en compte leur urgence et leur importance, on pourrait améliorer la gestion des incidents et ainsi renforcer la sécurité des voyageurs.

VI. CONCLUSION

Lorsqu'un incident majeur se produit sur une ligne de métro, les opérateurs de supervision travaillant sur l'application ATS développée par Thales doivent réaliser un certain nombre d'actions leur permettant d'exploiter au maximum la ligne et d'assurer un service aux voyageurs tout en gérant l'incident. Aucune aide ne leur est aujourd'hui apportée pour choisir et ordonner ces actions.

Ainsi, pour répondre à ce besoin industriel de formalisation de procédures d'exploitation sûres, une démarche d'étude a été mise en place. La première étape de classification nous permet de mettre en évidence les différents types d'incidents et leurs caractéristiques ainsi que des procédures élémentaires regroupant des séquences d'activités communes à plusieurs procédures globales. La formalisation des procédures avec le langage BPMN fait ensuite ressortir, lors d'une deuxième étape, les échanges entre les différents intervenants, les flux d'activités parallèles et exclusives et apporte une vision globale de la procédure.

La suite des travaux de recherche sera consacrée à l'étude de la transformation des procédures BPMN en réseaux de Petri. La synthèse de contrôleurs permettra ensuite d'assurer que les procédures de supervision d'une ligne de métro ainsi construites garantissent la sécurité des personnes et du matériel et la continuité de l'offre de transport en évitant les situations bloquantes.

RÉFÉRENCES

- [1] Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre BEA-TT : Rapport d'enquête technique sur l'incendie ayant affecté deux rames de métro (ligne 4 de la RATP) à la station Simplon le 6 août 2005. Rapport technique, 2006.
- [2] F. BELMONTE, K. BERKANI, J. BOULANGER et W. SCHON : Safety enhancement of railway traffic by modern supervision systems. In *Seventh World Congress on Railway Research., Montreal (Canada)*, pages 4–8, 2006.
- [3] P. BRÉZILLON, C. GENTILE, I. SAKER et M. SECRON : SART a system for supporting operators with contextual knowledge. *Interdisciplinary Conference Modeling and Using Context*, 1997.
- [4] C. ZANARELLI : *Caractérisation des stratégies instrumentales de gestion d'environnements dynamiques : analyse de l'activité de régulation du métro*. Thèse de doctorat, Université Paris8, 2003.
- [5] L. PASQUIER : *Modélisation de raisonnements tenus en contexte : application à la gestion d'incidents sur une ligne de métro*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris8, 2002.
- [6] Object Management GROUP : Business process model and notation (BPMN) version 2.0- <http://www.bpmn.org/>, 2011.
- [7] W. M. VIJVERBERG : Translation of process modeling languages. Mémoire de D.E.A., Eindhoven University of Technology, 2006.
- [8] I. RAEDTS, M. PETKOVIC, Y.S. USENKO, J.M. VAN DER WERF, J.F. GROOTE et L. SOMERS : Transformation of BPMN models for behaviour analysis. *Proc. MSVVEIS*, pages 126–137, 2007.
- [9] R.M. DIJKMAN, M. DUMAS et C. OUYANG : Formal semantics and analysis of BPMN process models. 2007.
- [10] A. SHRAIDEH : *Analyse et optimisation d'un processus à partir d'un modèle BPMN dans une démarche globale de conception et de développement d'un processus métier : application à la dématérialisation de flux courrier du projet GOCD (PICOM)*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [11] P.J. RAMADGE et W.M. WONHAM : Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 25(1):206–230, 1987.
- [12] C.G. CASSANDRAS et S. LAFORTUNE : *Introduction to discrete event systems*, volume 11. Kluwer academic publishers, 1999.
- [13] L.E. HOLLOWAY, B.H. KROGH et A. GIUA : A survey of Petri net methods for controlled discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 7(2):151–190, 1997.
- [14] A. BOUFADEN, L. PIETRAC et S. GABOUJ : L'usage des réseaux de Petri dans la théorie de contrôle par supervision. *Sciences et Technologies de l'Automatique (e-STA)*, revue électronique de la SEE, vol. 2:10p, 2005.
- [15] E.J. LEE : *Reconfiguration dynamique de la commande d'un système manufacturier : approche par la synthèse de la commande*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2006.
- [16] A. GHAFFARI, N. REZG et X. XIAOLAN : Design of a live and maximally permissive Petri net controller using the theory of regions. *IEEE transactions on robotics and automation*, 2003.
- [17] A. CHIHEB AMEUR, S. ZAIRI et B. ZOUARI : Supervisory control and high-level Petri nets. *Petri Nets Applications, Pawel Pawlowski (Ed.)*, 2010.