

Amélioration de l'intégration du facteur humain dans les études d'exploitation ferroviaire

Mathieu HEMOUR¹, Alexandre PHILIPPOT², Nadhir MESSAI²,
Didier CALIGNY¹, Bernard RIERA²

¹ Régie Autonome des Transports Parisiens, LAC VP43
54, Quai de la Rapée, 75599 PARIS Cedex 12 FRANCE
mathieu.hemour@ratp.fr,

² CReSTIC, Université de Reims Champagne-Ardenne,
Moulin de la Housse BP 1039, 51687 REIMS cedex 2, France
alexandre.philippot@univ-reims.fr

Résumé— Cet article propose une approche pour améliorer les études de simulation théorique dans le domaine de la planification de l'exploitation des métros. Il s'agit d'une méthode permettant d'utiliser un retour d'exploitation des données enregistrées sur le terrain. Cela permet de prendre en compte les spécificités de l'exploitation des lignes de métro et d'évaluer la robustesse d'un horaire en incluant le comportement des conducteurs et des régulateurs de ligne. Car, qu'il soit aux commandes d'un train ou à la régulation d'une ligne, le principal acteur de l'exploitation d'une ligne reste l'opérateur humain. Et son comportement nécessite d'être pris en compte et donc modélisé avec précision dans les études théoriques. Nous montrons dans l'article, l'apport des données issues de l'exploitation sur un terminus aux conditions d'exploitations spécifiques.

Mots-clés— Réseau ferroviaire urbain, Modélisation, Comportement humain, Simulation de métro

I. INTRODUCTION

Le nombre croissant de voyageurs utilisant les lignes de métro est un challenge complexe pour les entreprises de transport. Afin de satisfaire cette demande de transport sans toutefois modifier l'infrastructure, l'intervalle entre les trains peut être réduit. Mais, en dépit du fait que cette solution semble simple à mettre en place, elle ne convient pas forcément car il faut avoir à disposition le bon nombre de matériels roulants et de conducteurs nécessaires. De plus, en réduisant l'intervalle, les marges d'exploitations disponibles servant à absorber des retards causés par diverses perturbations (anomalie signal, surstationnement, ...) sont également diminuées. La réduction de l'intervalle peut donc conduire à une instabilité de ligne.

Le travail présenté dans l'article fait partie d'une action de recherche menée par la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) et qui a pour but d'améliorer les études de simulations. Elle propose une approche originale pour construire les marches types et l'horaire théorique. Le but est de parvenir à une meilleure prise en compte du comportement humain. Il s'agit d'ailleurs d'un aspect important de la recherche ferroviaire [10]. En effet le facteur humain est de plus en plus considéré et est pris en compte dans plusieurs

contextes comme pour des tâches de planifications [8] ou l'amélioration de la formation des conducteurs [7]. Dans la partie 2 nous présenterons l'actuelle méthodologie de construction de l'horaire théorique avant de proposer une amélioration de celui-ci dans le but d'être plus précis. En partie 3 et 4 nous démontrerons l'importance de la considération du facteur humain au moyen d'un exemple sur un terminus ayant des conditions d'exploitations particulières.

II. AMELIORATION DE LA MODELISATION PAR UN RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'EXPLOITATION

Le processus actuel d'étude de simulation et de construction de l'horaire présenté en figure 1 est avant tout théorique. Basée sur des hypothèses de modélisations génériques, en particulier pour le comportement du conducteur, une marche type théorique est créée. Ensuite, à partir de celle-ci et en fonction de l'intervalle souhaité, l'horaire est défini. Le retour d'exploitation est assez rare et est souvent apporté via un ressenti subjectif pas forcément pertinent.

Cette méthode présente l'avantage d'être simple et générique pour convenir à la modélisation de toutes les lignes de métro. De plus, pour des lignes classiques (sans conditions particulières d'exploitation) elle donne des résultats tout à fait satisfaisants. Avec les marges d'exploitation à disposition, il n'était en effet pas nécessaire d'avoir une modélisation très fine. Mais dans un contexte de conditions d'exploitation aux capacités limites, les études de simulation doivent être de plus en plus proches de la réalité-terrain surtout dans des cas où l'exploitation dérive d'une situation classique. Par rapport à la construction de l'horaire, le constat est similaire. Il n'existe pas d'analyse post facto qui permette d'établir la robustesse d'un horaire défini par rapport à des perturbations classiques telles que des surstationnements en ligne. C'est pourquoi il semble nécessaire d'améliorer les études théoriques en amenant des hypothèses de modélisations plus spécifiques.

La méthode proposée est basée sur l'utilisation des données issues de l'exploitation qui apportent une situation exhaustive de la situation sur le terrain (en ligne). La figure 2 présente le schéma d'étude suggéré. Elle reprend la procédure standard d'étude et l'améliore avec les parties proposées (lignes pointillées sur la figure 1).

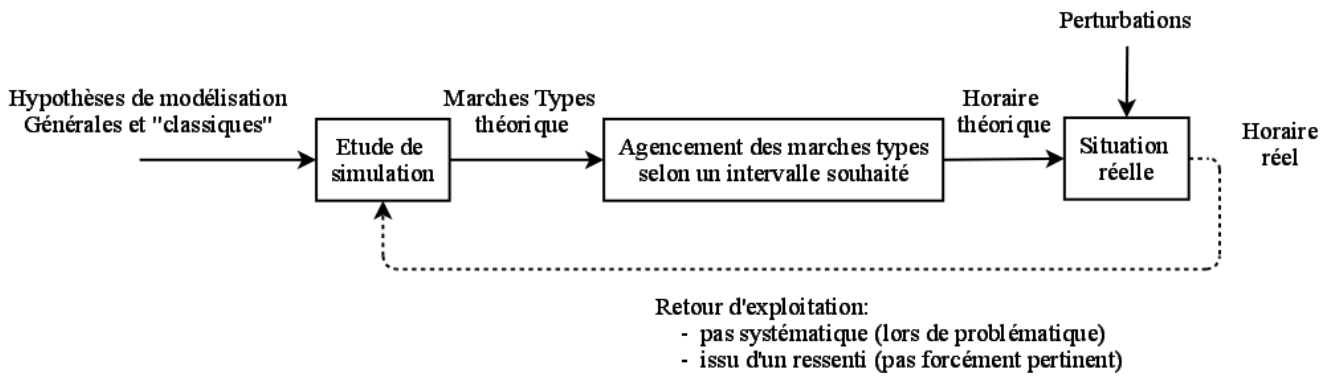


Fig. 1. Schéma actuel d'étude de simulation

A partir d'un traitement théorique, les informations issues de l'exploitation seront utilisées en données d'entrée pour les études de simulation. Ces informations, complémentaires aux hypothèses de modélisations génériques vont permettre d'améliorer la modélisation du système ferroviaire. Ces données seront également utiles dans le cadre de la création de scénarios de simulations spécifiques. Ils seront en effet représentatifs d'une situation réelle par rapport à la problématique à étudier.

Le principal aspect de cette méthode réside donc dans l'utilisation des données « terrain » dans les modèles théoriques. Il existe en effet des outils existants qui sont capables d'enregistrer les informations concernant l'exploitation d'une journée. Ces données sont utilisées pour analyser l'exploitation d'une ligne (statistiques concernant la production et la qualité de service) et pour examiner le comportement des conducteurs par rapport à la réglementation en vigueur (respect des contraintes de vitesse par exemple). Ces informations comprennent :

- La marche type réelle des trains ;
- Le comportement du conducteur par rapport à la signalisation ;
- Les temps d'occupation et de libération des cantons de voie ;
- Le temps de stationnement en stations et en terminus.

A partir de ce retour d'exploitation, le facteur humain va pouvoir être pris en compte dans les études de simulation. La modélisation et la planification dans le domaine ferroviaire

sont devenues tellement complexes qu'une approche mathématique formelle n'est en effet plus suffisante [9], [5]. Une meilleure considération des performances et du comportement du conducteur prend en effet une part importante dans la recherche ferroviaire [2], [6]. C'est notamment le cas en particulier avec le développement de nouveaux systèmes de conduite comme le système ERTMS (European Railway Traffic Management).

Comme indiqué en figure 2, l'intégration de ces données permettra deux applications.

A. Amélioration des hypothèses de modélisation

Ces données sont une exacte représentation de l'exploitation sur le terrain. Elles contiennent en effet une description exhaustive du modèle d'une ligne ferroviaire.

Dans le processus d'étude, l'étape qui consiste à prévoir la marche type des trains est une des plus importantes tâches. Cette simulation va en effet définir le temps imparti aux conducteurs pour effectuer leur course. Dans les modèles théoriques actuels, les données techniques comme l'infrastructure ou la dynamique des matériels roulants sont très bien renseignées. Mais les éléments concernant le comportement des acteurs du système ferroviaire ont besoin d'être mieux identifiés et incorporés aux modèles théoriques.

C'est notamment le cas du comportement du conducteur qui est modélisé en ajoutant une réserve de temps commune à toutes les lignes à la marche type tendue (marche la plus rapide).

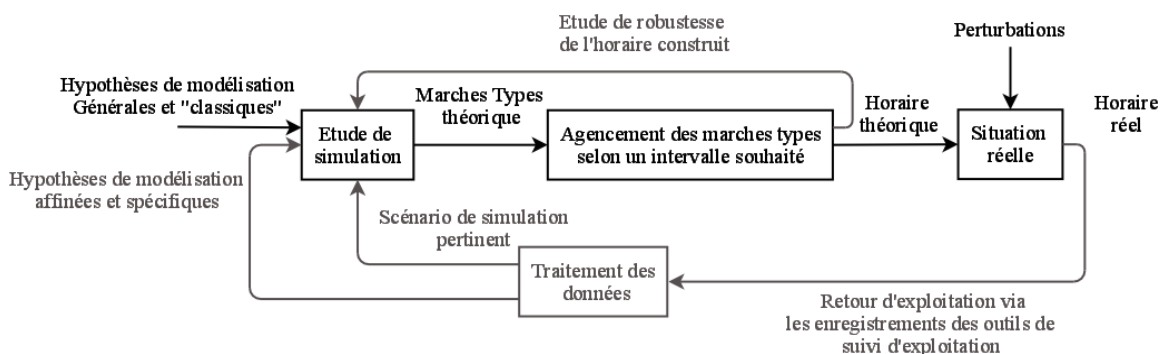


Fig. 2. Schéma d'étude proposé

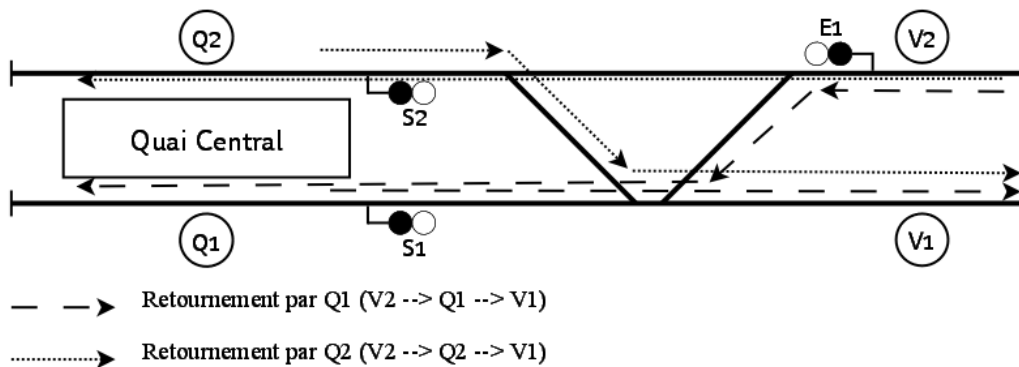


Fig. 3. Terminus étudié

L'utilisation des enregistrements issus de l'exploitation permet une modélisation de ce comportement en incluant une distinction entre les conducteurs. Cette modélisation deviendra plus spécifique en prenant en compte différentes réactions des conducteurs en fonction du diagramme de la voie, du profil et de la vitesse imposés par l'infrastructure. De plus les conducteurs étant assignés à une ligne, la manière de conduire peut également différer entre deux lignes.

Dans le cadre de la construction d'un horaire théorique, l'approche n'est pas d'avoir plusieurs marches types distinctes qui résultent de différents comportements observés. Le but est d'améliorer la marche type standard en prenant en compte les spécificités d'une ligne.

B. Création de scénarios de simulations spécifiques :

Une fois que le modèle de simulation est créé, les données « terrain » apporteront une aide à l'utilisateur pour la conception de scénarios de simulations très spécifiques et pertinentes par rapport à une problématique à étudier. Le départ et l'arrivée des trains aux stations durant une journée d'exploitation sont des informations très faciles à utiliser comme données d'entrée de simulation. Par exemple, pour analyser une situation donnée, le but est d'avoir suffisamment de scénarios à disposition pour représenter entièrement le problème à étudier.

En créant des simulations dynamiques avec des scénarios issus de situations réelles, le comportement du régulateur de trafic est également pris en compte. Son rôle est d'agir sur l'exploitation dans le but d'obtenir un trafic fluide et le plus proche possible de l'horaire théorique défini. Il doit donc être en mesure d'absorber les perturbations. Ces moyens d'action concernent le contrôle des itinéraires, l'annulation ou le renforcement des trains et la possibilité de changer l'horaire. Si le système est en régime nominal, le régulateur de trafic n'agit presque pas et son impact sur l'exploitation est transparent. Mais en cas de perturbations ou de retards de trains, il doit prendre les bonnes décisions pour minimiser les conséquences sur le reste de la ligne. Ces actions (bonnes ou mauvaises) doivent donc être prises en compte dans les modèles théoriques en particulier dans le cas de système complexes.

Avec cette méthode, les simulations théoriques ne doivent pas seulement être des études en régime nominal. Il y a un besoin de simuler un système avec des perturbations

injectables dans le modèle. En intégrant le comportement de différents acteurs du système ferroviaire, il y a également un besoin de plus de possibilités de modélisation. C'est pourquoi dans le cadre de cette action de recherche, la RATP a acquis un outil de simulation nommé OpenTrack [3], [4] qui est capable d'effectuer des simulations dynamiques.

III. CAS ETUDIÉ

Afin d'illustrer cette méthodologie, nous présentons le cas d'un terminus spécifique qui comporte la particularité d'avoir un cisaillement à l'entrée de la station (figure 3). Ce terminus, à cause de sa topographie, possède donc des conditions particulières d'exploitation. Le fait de ne pas avoir de possibilité de retournement à l'arrière de la station (comme un terminus classique) fait que sa capacité n'a que deux positions Q1 et Q2 qui peuvent être le quai de départ ou le quai d'arrivée.

Il est possible de montrer qu'une légère action d'un opérateur qui n'est pas planifiée peut avoir des conséquences sur l'exploitation et transformer le terminus en un système inconstant voir instable et qui va provoquer du retard sur la ligne.

Dans le but d'obtenir l'intervalle le plus faible possible, le terminus est exploité en alternance de quais. Le concept de ce cycle impose qu'il y ait toujours un train stationné et prêt à partir. Le départ des trains est effectué alternativement et dans le même ordre que leur arrivée. L'exécution de ce cycle est illustrée en figure 4.

Le départ d'un train quai 2 est conditionné par l'arrivée d'un train quai 1. Et l'arrivée d'un train quai 2 dépend de l'accomplissement de l'itinéraire quai 2 à voie 1. Avec de telles conditions, la priorité est ainsi donnée aux trains entrants.

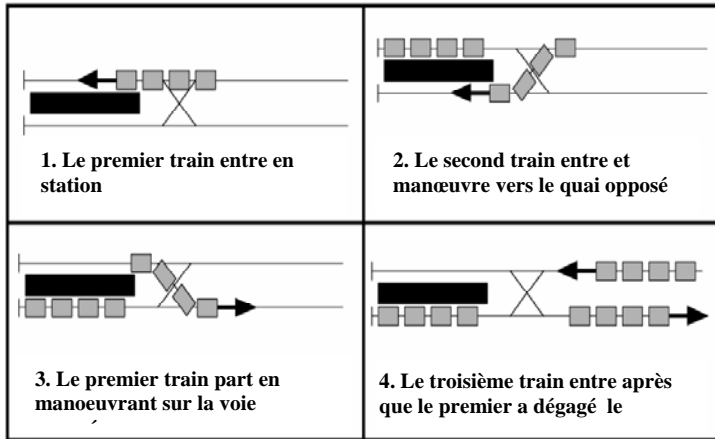


Fig.4. Principe du cisaillement en entrée de quai

IV. RESULTATS

La modélisation de ce terminus (infrastructure et système de signalisation) et la dynamique du matériel roulant ont été faites via OpenTrack, un outil de simulation dynamique. La station en amont du terminus a également été modélisée avec pour but de faire arriver et partir les trains de cet endroit. Le reste de la ligne est ainsi considéré comme une boîte noire. Le but de cette simulation est d'analyser la manœuvre de retournement du terminus.

Deux scénarios de simulation ont donc été créés :

- Le premier qui correspond à l'horaire théorique qui définit un intervalle de trains arrivant toutes les 3 minutes à l'entrée du terminus et qui effectuent leurs manœuvres de retournement avec un stationnement de 3 minutes et 10 secondes (stationnement théorique).
- Le second quant à lui, correspond à un scénario réel issu d'un retour d'exploitation et qui est typiquement représentatif des perturbations récurrentes rencontrées sur ce cas. Ce scénario décrit le retournement de 10 trains.

Le résultat de simulations du second scénario est montré en figure 6 et 7. Ces graphiques représentent un diagramme des trains temps - espace. Mis à part les trains 25 et 27 dont on ne simule pas l'arrivée à la station A, tous les trains arrivent depuis la station B et effectuent leur manœuvre de retournement en station A. Les lignes rouges correspondent à des trains qui effectuent leur manœuvre via quai 2 et les lignes violettes représentent les trains faisant leur manœuvre via le quai 1.

Les trains qui ne peuvent pas effectuer leur mission normalement sont ralentis et stoppés. Un cercle vert indique qu'un train freine devant un signal fermé et un cercle bleu montre qu'un train est stoppé devant un signal fermé

(signalisation d'espacement ou de manœuvre en amont de la station).

A partir des perturbations observées sur la simulation, une classification en deux catégories peut être faite (cercles 1 et 2 dans les figures)

1 : À la suite d'un surstationnement au terminus des trains précédents, les trains 29, 31 et 47 sont respectivement stoppés devant le signal d'entrée durant 23, 7 et 22 secondes.

2 : Le régulateur du terminus casse le cycle d'alternance de quais et commande l'itinéraire Q2 à V1 trop tôt par rapport au départ effectif du train. Le train 41 qui aurait dû rentrer quai 1 est ainsi stoppé durant 1 minute et 9 secondes devant le signal d'entrée alors qu'il aurait pu rejoindre son quai d'arrivée sans perturber le départ du train à quai (train 39).

Cette simulation est représentative des perturbations récurrentes qui surviennent dans ce terminus. Elles sont principalement causées par deux problèmes.

- Durant l'heure de pointe, le temps de stationnement au quai d'arrivée est souvent dépassé. La moyenne du stationnement observée à ce terminus est de 4 minutes et 19 secondes alors qu'il devrait être de 3 minutes et 10 secondes.
- L'incidence du cisaillement à l'entrée de la station. Ce type de manœuvre est plutôt rare en entrée de station et requiert une attention particulière de la part du chef de régulation. Car avec ce type d'exploitation, le départ d'un train peut potentiellement ralentir ou stopper l'arrivée du train suivant (ou inversement). Donc l'attention ne doit pas être seulement sur le respect de l'horaire théorique mais doit être aussi en fonction de la position des trains dans le terminus.

Il est en effet nécessaire d'éviter de faire stationner les trains sous tunnel. Car non seulement c'est mauvais pour le respect de l'horaire et de l'intervalle, mais cela peut également mener à plus de perturbations. Car, les passagers stoppés sous tunnel peuvent se trouver stressés et tirer un signal d'urgence qui causera encore plus de retard. Les conducteurs n'apprécient également pas de se retrouver stoppés si près du terminus surtout si cela arrive fréquemment, cela peut avoir une répercussion sur leur productivité.

Quand les terminus sont conçus et exploités correctement, cela ne doit pas agir sur la capacité du système ferroviaire. Mais, dans le cas de systèmes anciens, les retournements peuvent être une contrainte qui résulte d'une conception pas forcément optimale. La demande croissante de l'offre de transport peut également générer un besoin de plus de trains par rapport à la conception et la considération de l'exploitation initiale.

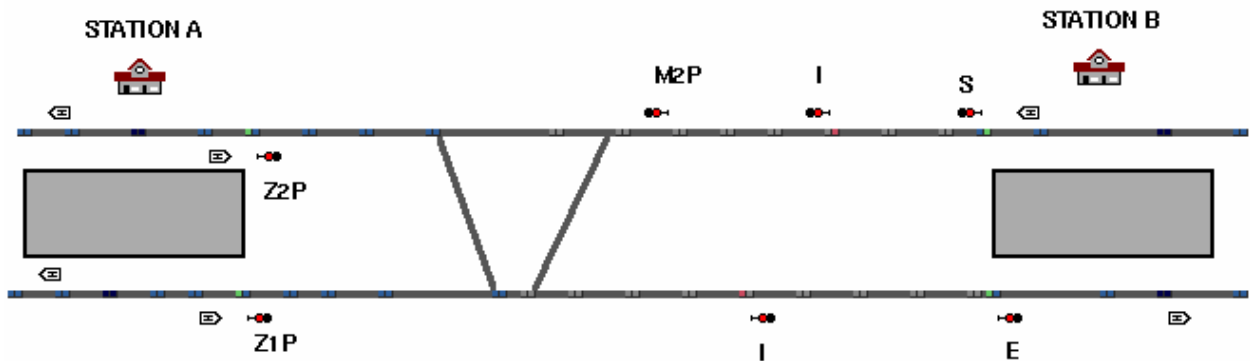


Fig. 5. Représentation de la modélisation du terminus avec l'outil OpenTrack

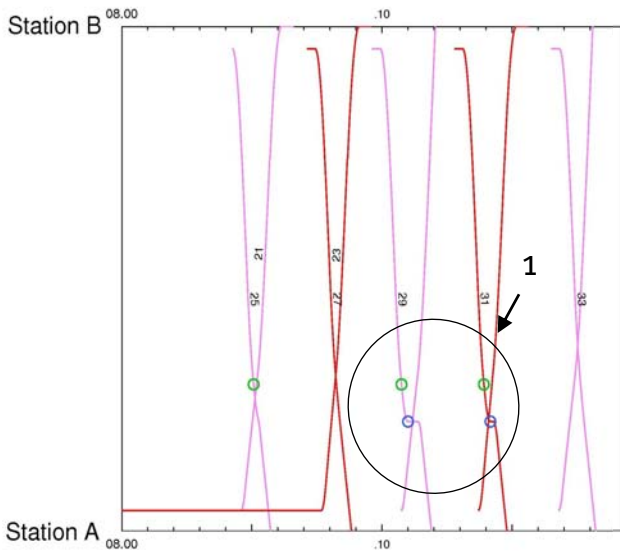


Fig. 6 – Premier graphique de résultat de simulation

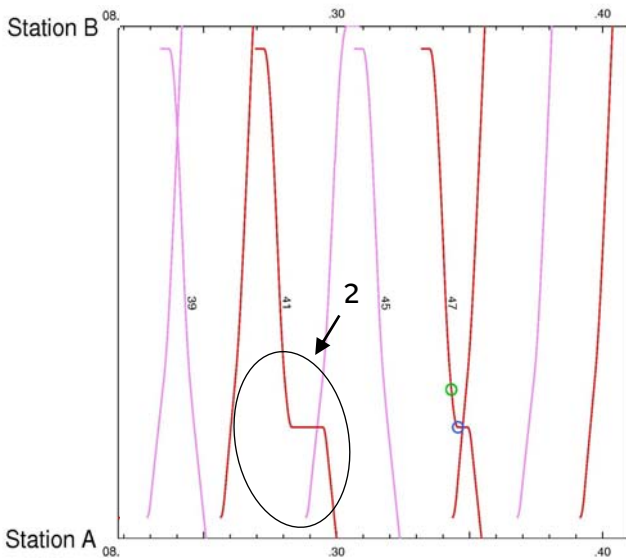


Fig. 7. Second graphique de résultat de simulation

Néanmoins les terminus devraient être conçus pour avoir une certaine marge d'exploitation. Un exemple typique : un train qui doit être retenu en station pour une avarie (portes bloquées), en attente d'une intervention des forces de l'ordre... Une voie peut également être réservée pour stocker un train en avarie sérieuse. Dans ces occasions, le terminus peut être temporairement réduit à une seule voie (une position de stationnement) et si l'intervalle peut être tenu, alors les marges d'exploitation n'existent plus.

A partir de ces analyses, des recommandations concernant l'horaire théorique et sur l'exploitation particulière de ce terminus ont été faites. Concernant la construction des marches types, des considérations spécifiques à ce terminus sont prises. Vu que c'est au signal d'entrée que les retards sont créés, une amplification des temps de parcours à partir du signal amont jusqu'au signal aval est créée en fonction de l'intervalle d'exploitation (figures 8 et 9). Cela augmente légèrement le temps de parcours sur l'interstation mais apporte une fluidification nécessaire à l'entrée de la zone de retournement.

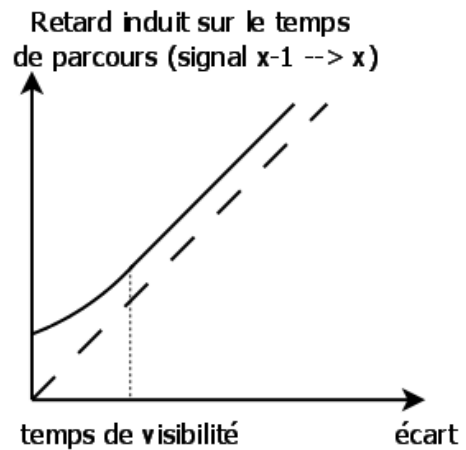


Fig. 8. Retard induit sur la marche type en amont du signal d'entrée

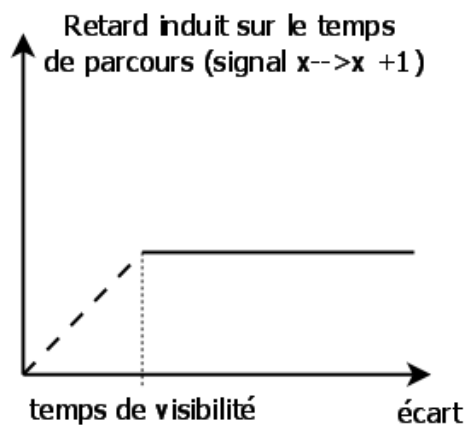


Fig. 9. Retard induit sur la marche type en aval du signal d'entrée

Une modification du programme fonctionnel de signalisation du terminus peut également être envisagée afin de réduire le temps de déblocage de la signalisation.

V. CONCLUSION

L'exploitation des réseaux urbains se complexifie avec l'augmentation de la demande de transports de ces dernières années et requiert donc un programme d'exploitation très précis. En utilisant les enregistrements issus de l'exploitation comme données d'entrée aux modèles de simulation la manière de réaliser les études théoriques évolue. Les hypothèses de modélisation seront plus précises de la situation terrain et les scénarios de simulation construits, très adaptés à un problème à étudier.

Ce retour d'expérience permet une meilleure considération du facteur humain, qui par rapport au système ferroviaire devient un aspect primordial à prendre en compte pour améliorer les études théoriques. Cette considération dans les simulations aura également une incidence sur la création de l'horaire qui en sera plus robuste. De plus, une fois l'horaire théorique défini, il pourra également être analysé en simulation en lui injectant des perturbations typiques pour étudier sa stabilité.

Cette méthode sera surtout utilisée pour l'étude et l'analyse de cas singuliers ou l'exploitation est particulière comme le terminus montré en exemple. Dans les mois à venir une application très utile sera par exemple une analyse du comportement conducteur de la ligne 1 du réseau parisien. Lors la phase d'automatisation de cette ligne, une exploitation en mixité de circulation va être opérée. Durant cette période, des trains avec conducteurs et des trains automatiques vont circuler ensemble [1]. Un retour d'expérience sera alors très intéressant pour la construction de l'horaire et pour la

définition de l'exploitation de cette phase de transition (notamment dans les terminus).

Une application pour étudier l'impact de nouveaux systèmes de conduite comme le système OURAGAN qui va prochainement être mis en service pourra également être réalisée.

REMERCIEMENTS

Le présent travail est mené dans le cadre d'une convention CIFRE entre la Régie Autonome des Transports Parisiens et le Centre de Recherche en STIC (CReSTIC) de l'université de Reims Champagne Ardennes, financé par la RATP et l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie.

REFERENCES

- [1] Churchill G (2006) L'opération d'automatisation de la ligne 1du métro de paris. *Revue Générale des Chemins de Fer* 33-44
- [2] Hamilton V, Clarke T (2005) Driver performance modeling and its practical application to railway safety. *Applied Ergonomics* 36 661–670
- [3] Nash A, Huerlimann D (2004) *Railroad Simulation Using OpenTrack*. Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems, Dresden.
- [4] Lueti M, Huerlimann D, Nash A (2005) Understanding the timetable planning process as a closed control loop. Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zurich.
- [5] MacCarthy B, Wilson J (2001) The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing Industry—background and context. In: MacCarthy B, Wilson J (eds) *Human performance in planning and scheduling*. Taylor and Francis, London
- [6] Macleod R, Walker G, Moray N (2005) Analyzing and modeling train driver performance. *Applied Ergonomics* 36 671–680
- [7] Tichon J (2007) The use of expert knowledge in the development of simulation for train driver training. *Cognition, Technology & Work* Volume 9 Pages 177-187
- [8] Van Wezel W, Jorna RJ (2009) Cognition, task and planning: supporting the planning of shunting operations at the Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work* Volume 11 Pages 165-176
- [9] Van Wezel W, Jorna RJ, Meystel A (eds) (2006) *Planning in intelligent systems*. Wiley, New York
- [10] Wilson J, Norris B (2006) Human factors in support of a successful railway: a review. *Cognition, Technology & Work* Volume 8 Pages 4-14