Application de l'analyse de sensibilité à la réorganisation du trafic ferroviaire en cas d'incident sur infrastructure électrique

Soha SAAD[1,2,3], Florence OSSART[2], Jean BIGEON[3], Etienne SOURDILLE[1], Harold GANCE[1]

(1) SNCF Réseaux, Direction de l'ingénierie, 6 avenue Francois Mitterand, 95574, La plaine St-Denis, France
(2) GEEPS – CNRS UMR 8507 – CentraleSupélec – UPSud – Sorbonne Université UPMC; 91192 Gif sur Yvette – France
(3) G-SCOP – CNRS UMR 5272 ; Grenoble INP-UJF ; 38000 Grenoble – France

RESUME – La réorganisation du trafic ferroviaire en cas de panne sur infrastructure électrique est un processus de décision important pour une bonne exploitation du réseau. Le système étudié est complexe et son analyse repose sur des simulations coûteuses, ce qui rend difficile la gestion des incidents. Cet article propose d'utiliser l'analyse de sensibilité afin d'évaluer l'influence des différentes variables d'ajustement du trafic (espacement entre trains, vitesses de circulation…) sur la grandeur critique qu'est la tension d'alimentation des trains. Deux méthodes complémentaires sont mises en œuvre : l'analyse de sensibilité globale avec le calcul d'indices de sensibilité de Sobol, puis l'analyse régional avec du filtrage de Monte-Carlo associé à des comparaisons de densités de probabilité cumulées. L'approche proposée est illustrée sur un cas simple, pour lequel l'espacement entre trains se révèle avoir plus d'influence que la réduction de vitesse.

Mots-clés — rescheduling, alimentation ferroviaire, gestion d'incident, analyse de sensibilité filtrage de Monte-Carlo, indices de Sobol, front de Pareto.

1. INTRODUCTION

La problématique de réorganisation du trafic ferroviaire en cas d'incident d'exploitation est étudiée depuis longtemps. De nombreux travaux de recherches réalisés dans ce domaine traitent de situations où un incident mineur sur une voie affecte un grand nombre des trains en raison d'effets de cascade [1], [2], [3]. Les auteurs abordent aussi l'impact d'incidents majeurs [4], [5], [6], [7], et se concentrent sur la reconstruction des horaires en prenant en compte la disponibilité des matériels roulants et des équipages, mais la problématique de la disponibilité de l'énergie électrique n'est jamais abordée.

Le travail présenté ici s'intéresse aux incidents sur les infrastructures fixes de traction électrique (IFTE), comme la perte d'une sous-station d'alimentation. Ces incidents limitent la puissance disponible pour la traction des trains, et par conséquent la capacité de transport du réseau ferroviaire : moins de trains peuvent circuler en même temps, et il peut être nécessaire de les ralentir. Il faut donc réorganiser le trafic afin d'utiliser au mieux la puissance disponible. Cette réorganisation est gérée par des variables d'ajustement du trafic telles que les intervalles entre trains, ou des limitations de vitesse en certaines portions de la ligne. La qualité du trafic réorganisé est évaluée en termes de respect des normes sur la tension d'alimentation des trains (tension aux pantographes) ainsi que par des indicateurs de performances tels que la capacité de transport (débit de trains) ou les échauffements des transformateurs des sous-stations.

Nous proposons une méthode fondée sur l'analyse de sensibilité globale et régionale afin de classer l'influence des variables de décision tout en prenant en compte les différentes contraintes opérationnelles. Les résultats de cette analyse fournissent à l'exploitant des éléments objectifs et quantifiés pour l'assister dans le choix d'une solution optimale par rapport aux critères qu'il choisira de privilégier.

Dans la suite de l'article, nous commençons par décrire le système étudié et la démarche actuelle de réorganisation du trafic en cas d'incident sur infrastructure électrique dans la section 2. Les principes généraux de l'analyse de sensibilité et leur application à la réorganisation du trafic ferroviaire sont exposés en section 3. La section 4 illustre la démarche proposée dans le cas d'un exemple d'application simple. Les perspectives de ce travail sont données en conclusion.

2. DESCRIPTION DU PROBLEME

1.1 Système étudié

Le réseau électrique ferroviaire est conçu et contrôlé de manière à fournir l'énergie nécessaire à l'avancement des trains. Les principaux éléments de ce réseau sont les sous-stations d'alimentation, les caténaires, les trains et les rails qui ferment le circuit. Les postes de mise en parallèle permettent d'ajuster la résistance de ligne en fonction de la position des trains, et les postes de sectionnement séparent les portions de lignes alimentées par des sous-stations différentes. C'est un système complexe, avec de nombreux trains en circulation et dont la topologie évolue avec le déplacement des trains. L'analyse de ce système repose sur la simulation et nécessite un niveau de modélisation assez détaillé pour permettre de déterminer avec précision les différentes grandeurs électriques du système.

Les simulateurs procèdent généralement suivant le même schéma : résolution en pas à pas sur le temps des équations de la dynamique des trains couplées aux équations électriques du réseau, de façon à déterminer la puissance nécessaire à l'avancement des trains et les différentes grandeurs électriques qui en découlent. Tant que la puissance requise par les trains est disponible sur le réseau, cela se traduit par un couplage

faible : l'état mécanique du système détermine son état électrique sans rétroaction. En revanche, quand la puissance demandée par les trains ne peut être satisfaite, la puissance effectivement fournie est limitée, entrainant un couplage fort entre les équations dynamiques et les équations de circuit : les états mécanique et électrique doivent être déterminés conjointement, ce que certains simulateurs ne permettent pas.

La SNCF développe et exploite son propre simulateur, ESMERALDA [8]. ESMERALDA met en œuvre un modèle multi-physique du réseau, avec un couplage fort entre équations mécaniques et équations électriques, et des calculs de thermique en post-traitement (Fig. 1). Les données d'entrée sont d'une part l'infrastructure ferroviaire (topologie du réseau, caractéristiques des infrastructures électriques, …) et d'autre part le trafic qui doit circuler sur le réseau (missions de trains, sous la forme d'horaires de départ et de passage en différents points, ainsi que de consignes de vitesse le long du trajet). Les équations de la dynamique des trains et les équations du circuit d'alimentation électrique sont résolues en pas à pas sur le temps afin de déterminer la position des différents trains à chaque instant, ainsi que différentes grandeurs telles que la tension aux pantographes, les puissances et les échauffements qui en résultent. Il s'agit d'un modèle numérique fortement non linéaire comportant un grand nombre de variables et nécessitant un temps de calcul important.

ESMERALDA est utilisé pour des études concernant tous types de trafic, depuis les TER aux TGV en passant par le fret. Selon la taille du réseau, la durée de simulation varie de quelques minutes à une heure, avec une durée typique d'une dizaine de minutes.

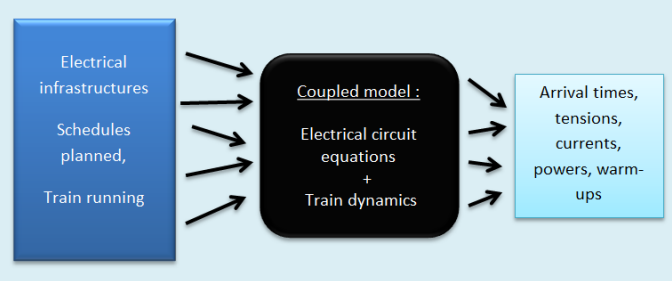


Figure 1: Schéma de principe d'ESMERALDA NG

1.2 Réorganisation du trafic

La capacité du réseau ferroviaire à fournir la puissance nécessaire à un certain trafic dépend de la disponibilité des infrastructures électriques. Elle diminue en cas de perte d'un équipement, que ce soit suite à un incident technique ou une opération de maintenance. Il faut alors vérifier que la capacité d'alimentation électrique résiduelle permet d'assurer le trafic initialement prévu. Le critère d'acceptabilité de la charge que constitue ce trafic est le niveau de tension aux pantographes des trains. Pour un système d'alimentation AC 25 kV, cette tension ne doit pas chuter en dessous de 17,5 kV afin d'assurer une alimentation correcte des motrices. Si cela se produit, il faut alléger la charge du réseau en réduisant le trafic.

En l'état actuel des choses, l'opérateur responsable de réorganiser le trafic en cas d'incident suit une démarche empirique par essais et erreurs. Sur la base de son expérience, il propose et teste par simulation différents scénarios d'ajustement afin d'établir si la tension aux pantographes reste dans les limites prescrites. La décision d'arrêter ou de continuer la recherche d'une solution est basée sur la comparaison des résultats entre différents essais. Cette démarche manque d'efficacité car la situation analysée est complexe et nécessite de nombreuses simulations coûteuses. Par ailleurs, l'issue est tributaire de l'expertise de l'opérateur, difficilement partageable, et rien ne garantit l'optimalité de la solution retenue.

Le but du travail présenté ici est de développer un outil d'aide à la décision de l'opérateur, basé sur une démarche d'analyse de sensibilité. Cet outil pilote le simulateur afin d'explorer l'espace des solutions de manière efficace pour trouver des solutions acceptables, en ce sens qu'elles respectent les contraintes opérationnelles sur le niveau de tension aux pantographes. Il calcule des indices de sensibilité par rapport aux différentes variables d'ajustement et construit des fronts de Pareto qui guideront l'opérateur dans le choix d'une solution de réorganisation.

3. PRINCIPE DE LA METHODE PROPOSEE

3.1. Formulation mathématique du problème :

La réorganisation du trafic est formalisée en définissant des variables d'ajustement par rapport au trafic initialement prévu, que nous appelons aussi variables de décision. Il s'agit typiquement d'augmentation de l'intervalle de temps entre trains, ou de réduction des vitesses-consignes sur certaines portions de voie. On peut aussi supprimer des trains. Chaque point de l'espace de décision correspond à une grille horaire et à des consignes de vitesse le long du trajet de chaque train. L'opérateur doit explorer cet espace pour trouver des solutions réalisables, en ce sens qu'elles respectent toutes les contraintes physiques et opérationnelles du système (typiquement, respect de la norme sur les tensions aux pantographes).

Mathématiquement, le problème consiste à étudier le comportement d'un modèle numérique de la forme $Y = f(X)$, où le vecteur des entrées $X = (X_i)_{i=1,p}$ représente les variables d'ajustement, et où le vecteur de sortie $Y = (Y_j)_{j=1,m}$ est constitué de l'ensemble des résultats dynamiques de simulation, comme par exemple la tension au pantographe de chaque train, à chaque instant. La fonction f représente le modèle numérique du réseau ferroviaire (le simulateur), non linéaire, coûteux en ressources de calcul, utilisé comme une boîte noire.

3.2. Buts de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est un outil qui étudie le comportement d'un système en observant l'effet des variations des entrées sur les variations des sorties, de manière qualitative et quantitative. L'analyse de sensibilité locale étudie le comportement du modèle autour d'un point donné, alors que l'analyse de sensibilité globale prend en compte l'ensemble du domaine de variation des différentes entrées [9].

Les objectifs de l'analyse de sensibilité sont les suivants :

i) classer les paramètres d'entrée selon leur influence sur la sortie (factor priorization),

ii) identifier les éventuels paramètres d'entrée dont l'influence est négligeable et qui peuvent être figés (factor fixing),

iii) déterminer les plages de variation des paramètres d'entrées qui permettent de maintenir les variations des sorties en dessous d'un seuil prédéfini,

iv) déterminer quel sous-ensemble de l'espace de décision correspond à un certain sous-ensemble de l'espace des grandeurs de sortie (factor mapping).

Les trois premiers objectifs sont très liés et se focalisent sur différentes conséquences du classement des paramètres d'entrée par influence. Le "factor mapping" met en jeu l'inversion du modèle et permet de prendre en compte les contraintes sur les sorties.

Le travail présenté porte sur l'analyse de sensibilité globale. Les indices de sensibilité de Sobol sont exploités pour

classer les paramètres d'entrée et déterminer ceux qui peuvent être fixés (section 3.3). La prise en compte de la contrainte de tension aux pantographes est primordiale dans la réorganisation du trafic et correspond à du « factor mapping » qui est traité par filtrage de Monte Carlo associé à une comparaison statistique des résultats filtrés (section 3.4).

3.3. Indices de sensibilité de Sobol

La méthode de Sobol est une méthode statistique [10]. Les entrées du modèle sont considérées comme des variables aléatoires, et les variables de sorties sont donc également des variables aléatoires. La méthode est basée sur la décomposition de la variance de la sortie en une somme de contributions dues aux différentes variables d'entrées ainsi qu'à leurs effets couplés. Elle permet de déterminer la contribution relative des différentes variables d'entrée aux variations de la sortie.

Considérons d'abord un modèle à une seule sortie : $Y = f(X)$, où Y est un scalaire et $X = (X_i)_{i=1,p}$ est le vecteur des entrées. L'influence relative de l'entrée X_i sur la sortie est quantifiée par l'indice de sensibilité S_i défini par (1),

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \qquad (1)$$

où $E(Y|X_i)$ représente l'espérance mathématique de Y à X_i fixé, $V_i = V[E(Y|X_i)]$ représente la variance de cette espérance sur l'ensemble des valeurs de X_i et $V(Y)$ représente la variance totale de la sortie Y. L'indice de sensibilité S_i est un nombre compris entre 0 et 1, et la variable X_i est d'autant plus influente que l'indice de sensibilité associé est proche de 1.

Dans le cas général, un modèle produit plusieurs variables de sortie, organisées en un vecteur de sortie $Y = (Y_j)_{j=1,m}$. On définit alors des indices de Sobol généralisés [11], construits à partir de l'influence du paramètre X_i sur l'ensemble des sorties Y_j, selon l'expression (2).

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{m} V[E(Y_j|X_i)]}{\sum_{j=1}^{m} V(Y_j)} \qquad (2)$$

Les indices de sensibilité de Sobol sont utilisés pour le classement des paramètres d'entrée par ordre d'influence décroissante, et pour la détermination de facteurs dont l'influence peut être négligée. La valeur de ces paramètres peut alors être fixée, ce qui limite le nombre de degrés de liberté à explorer.

Sur un plan pratique, le calcul des indices de Sobol repose sur l'échantillonnage de l'espace des paramètres d'entrées. Chaque point correspond à un scenario de trafic qui est simulé par ESMERALDA. Les indices sont ensuite calculés à partir de l'ensemble des résultats.

3.3. Analyse de sensibilité régionale

Un point fondamental de la réorganisation du trafic est le respect des contraintes sur le niveau de tension aux pantographes des trains. Il faut déterminer quelle région de l'espace des entrées permet de vérifier ces contraintes, c'est-à-dire une tension aux pantographes qui reste au-dessus d'un certain seuil pour tous les trains, en tout point du trajet. En termes d'analyse de sensibilité, il faut déterminer si une action d'ajustement est favorable ou pas, par rapport au respect de cette contrainte. L'analyse de sensibilité régionale traite cette question [12], [13].

L'approche suivie ici est un simple filtrage de Monte-Carlo, suivi de la comparaison statistique des résultats filtrés. Pour cette analyse, il est tout à fait possible d'exploiter les simulations faites pour le calcul des indices de Sobol. L'ensemble échantillonné des entrées est partitionné en deux : le sous-ensemble R des scénarios dont le résultat de simulation respecte la contrainte de tension aux pantographes (scénarios acceptables) et le sous-ensemble $\overline{R}$ des scénarios dont le résultat de simulation ne respecte pas la contrainte de tension aux pantographes (scénarios non acceptables).

Afin de mettre en évidence l'influence de la variable d'entrée X_i sur le respect de la contrainte au pantographe, il faut comparer les distributions statistiques de X_i dans chacun des ensembles R et $\overline{R}$. Pour cela, les densités de probabilités cumulées de X_i sont déterminées sur chaque sous-ensemble. Ces fonctions sont notées $F_R(X_i/R)$ et $F_{\overline{R}}(X_i/\overline{R})$. La position relative des graphes de $F_R(X_i/R)$ et $F_{\overline{R}}(X_i/\overline{R})$ donne des informations sur l'influence de X_i par rapport au respect de la contrainte : X_i. est d'autant plus influente que les courbes s'écartent l'une de l'autre. Par ailleurs, si $F_R(X_i/R)$ est au-dessus de $F_{\overline{R}}(X_i/\overline{R})$, cela signifie que la contrainte est statistiquement plus souvent réalisée pour les valeurs de X_i considérées, et inversement si $F_R(X_i/R)$ est au-dessous de $F_{\overline{R}}(X_i/\overline{R})$. La forme des courbes donne également des informations : les régions de forte pente correspondent à une forte influence locale de X_i.

La Fig. 2 montre un exemple de telles courbes, pour un certain paramètre X variant entre -2 et +3. Parmi les points qui respectent la contrainte, aucun ne correspond à une valeur de X inférieure à -1, mais 100% correspondent à une valeur inférieure à 2,2. On en déduit qu'augmenter X a un effet uniquement entre -1 et 2,2. L'influence de X est favorable jusque X=1,5, puis se dégrade.

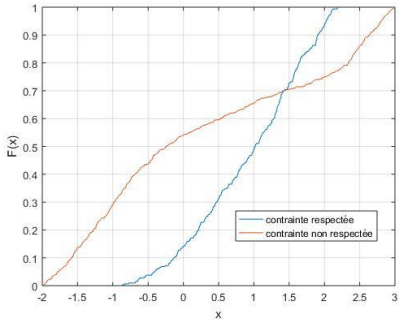


Figure 2 Exemple de densités cumulées $F_n(X_i/R)$(bleu, contrainte respectée) et $F_{\overline{n}}(X_i/\overline{R})$ (rouge, contrainte non respectée)

3.4. Application à la réorganisation du trafic ferroviaire

Les principes décrits ci-dessus ont été appliqués à la réorganisation du trafic ferroviaire, dans l'optique de mieux comprendre l'influence des différents paramètres d'ajustement sur les performances du trafic, le premier critère à satisfaire étant la contrainte sur les tensions aux pantographes.

La démarche de réorganisation du trafic comporte quatre étapes :

1. Spécification du problème : L'opérateur définit les variables d'ajustement (intervalle entre trains, vitesses de consigne, …) et leur intervalle d'appartenance. Il donne également les contraintes qui définissent l'acceptabilité des solutions (en l'état actuel, contrainte sur la tension). Il peut également fournir des indicateurs de performances qui permettront de choisir les meilleures solutions parmi toutes les solutions

acceptables (capacité de transport, temps de trajet, échauffements des transformateurs, …).

2. Simulations de Monte-Carlo : L'outil génère automatiquement une distribution pseudo-aléatoire des variables d'ajustement (échantillonnage), lance les simulations correspondant et stocke les résultats.
3. Analyse de sensibilité : Le post-processeur calcule les indices de Sobol, génère les sous-ensembles R et $\overline{R}$, construit les courbes de densités cumulées relatives aux différents paramètres d'ajustement. Les indicateurs de performances de tous les scénarios acceptables sont calculés et reportés sur des graphes de Pareto.
4. Choix du trafic réorganisé : L'opérateur interprète les informations calculées par l'outil et choisit la solution qui lui parait optimale parmi les solutions acceptables.

4. CAS-TEST

La démarche proposée a été appliquée à un premier cas-test très simple: une ligne AC 25 kV à voie unique, longue de 80 km, alimentée par trois sous-stations (SST) et parcourue par un trafic de 10 TGV (Fig. 3). L'incident étudié est la perte de la sous-station située en milieu de ligne.

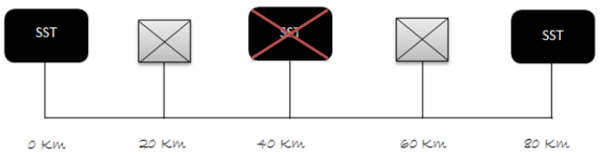


Figure 3 : Position des sous-stations d'alimentation le long de la ligne. L'incident étudié est la perte de la sous-station du milieu.

En situation normale, les trains partent toutes les 5 mn. Ils ont tous les mêmes consignes de vitesse sur l'ensemble du trajet. La Fig. 4 montre les tensions aux pantographes des trains, en fonction de leur position sur la ligne. Il n'est pas utile à ce niveau de savoir à quel train correspond chaque courbe : l'essentiel est de vérifier que les tensions sont toujours comprises entre 17,5 et 27,5 kV.

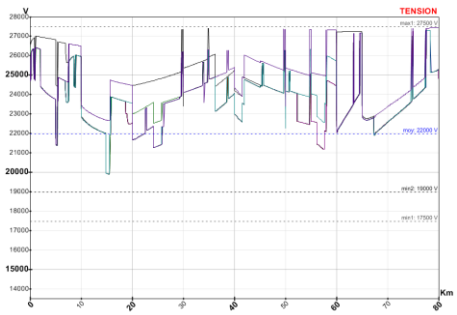


Figure 4 : Tensions aux pantographes des trains : cas sans défaut

Quand la sous-station du milieu est hors service, la qualité d'alimentation électrique se dégrade. La Fig. 5 montre la chute de tension aux pantographes des trains qui se produit si on essaie de maintenir le trafic prévu. Cette tension descend largement en dessous de valeurs acceptables, ce qui signifie par ailleurs que des régulations ont été mises en place pour limiter la puissance transmise aux trains, provoquant leur ralentissement.

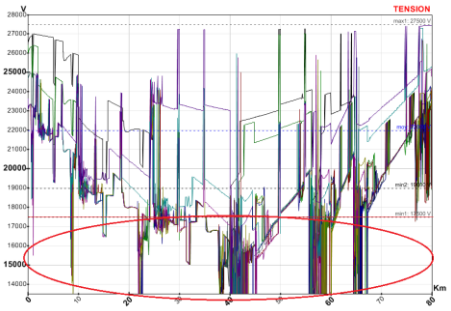


Figure 5 : Tensions aux pantographes des trains : cas avec défaut

Les contraintes opérationnelles n'étant pas respectées, il faut réduire le trafic. Deux actions d'ajustement sont considérées : augmenter l'intervalle entre trains successifs et réduire leur vitesse. Ces actions sont traduites en deux variables d'ajustement. X_1 est l'augmentation de l'intervalle de temps entre les départs de trains et varie entre 0 et 15 mn. X_2 est la réduction de la vitesse-consigne de part et d'autre de la sous-station hors service, comprise entre 0 et 35 km/h. Les sorties considérées sont les profils de tension aux pantographes des 10 trains, ce qui correspond aux courbes des Fig. 4 et Fig. 5.

Pour l'analyse de sensibilité, un échantillon de 1000 points est généré suivant des distributions uniformes en X_1 et X_2, et le trafic est simulé pour chacun de ces points.

Les indices de sensibilité de Sobol relatifs à l'influence de X_1 et X_2 sur la tension aux pantographes de chaque train ont été calculés. Des résultats similaires sont obtenus pour les différents trains, ce qui est cohérent avec le fait que leurs missions sont les mêmes. La Table 1 présente les indices de Sobol du 3ème train. Les valeurs de ces indices montrent que l'augmentation de l'intervalle entre train a plus d'influence sur la tension aux pantographes que la réduction de vitesse.

Table 1: Indices de Sobol généralisés du train n°3

Variable d'entrée	Indice de Sobol
X_1 (intervalle)	0.27
X_2 (vitesse)	0.09

L'étape suivante concerne l'analyse de sensibilité régionale, afin d'étudier plus précisément l'influence des variables X_1 et X_2 sur le respect de la contrainte de tension aux pantographes. Les points simulés sont filtrés selon qu'ils respectent ou pas cette contrainte (ensembles R et $\overline{R}$). Les densités cumulées relatives à X_1 et X_2 sont déterminées sur R et $\overline{R}$ et leurs graphes sont représentés sur la Figure 6 et la Fig. 7. Les courbes bleues correspondent à $F_R(X_i/R)$ et les courbes rouges à $F_{\overline{R}}(X_i/\overline{R})$.

La Fig. 6 montre l'influence de X_1. La courbe bleue (R) est située au dessous de la courbe rouge ($\overline{R}$) et les courbes sont nettement dissociées. Cela indique une forte influence favorable de l'augmentation de X_1. On note que la contrainte ne peut pas être satisfaite tant que X_1 est inférieur à 7 mn. A partir de cette valeur, la part des points qui respectent la contrainte augmente rapidement.

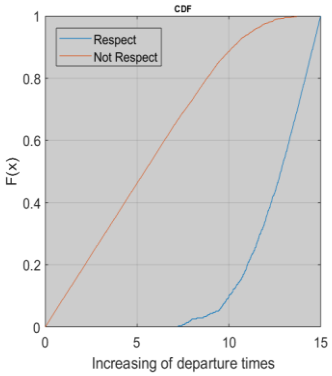


Figure 6 Densité cumulée relative à X_1

La Fig. 7 montre l'influence de X_2. La courbe bleue (R) est située au dessous de la courbe rouge ($\overline{R}$), mais les courbes sont quasiment confondues. Cela indique une influence négligeable de la réduction de vitesse telle qu'elle a été définie (lieu et gamme de valeurs).

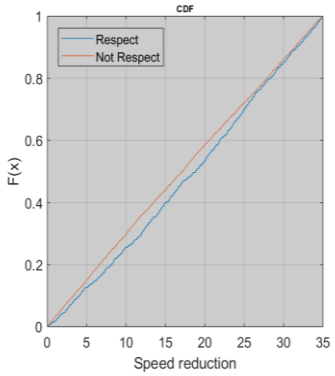


Figure 7 Densité cumulée relative à X_2

L'examen de l'ensemble R, non détaillé ici, montre qu'il est possible de respecter la contrainte de tension aux pantographes en agissant uniquement sur les intervalles entre trains, mais pas en agissant uniquement sur les réductions de vitesse.

La dernière partie de l'analyse concerne l'analyse des performances des solutions acceptables, afin de guider le choix final. Les critères de performances sont définis par l'utilisateur et calculés en post-traitement pour tous les points de l'ensemble R. On peut alors construire un front de Pareto empirique en reportant ces points sur un graphe de Pareto. La Fig. 8 montre le résultat obtenu en considérant deux indicateurs de performance. F1 représente l'objectif « durée de trajet », et F2 l'objectif « retard des trains » (lié à l'augmentation de l'intervalle entre trains). Augmenter l'intervalle entre trains augmente le retard au départ, mais permet de diminuer le temps de trajet du train. Les solutions non dominées sont représentées en rouge.

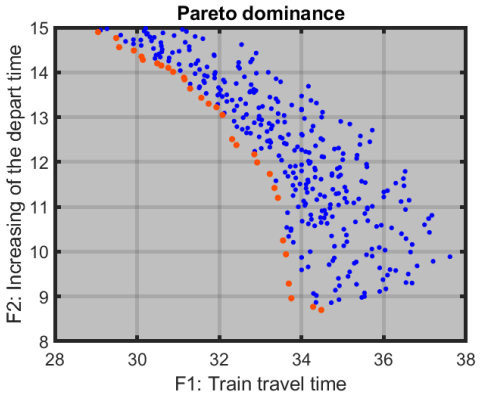


Figure 8 Graphe de Pareto, construit en reportant les solutions acceptables dans les axes F1 (durée de trajet) et F2 (retard au départ).

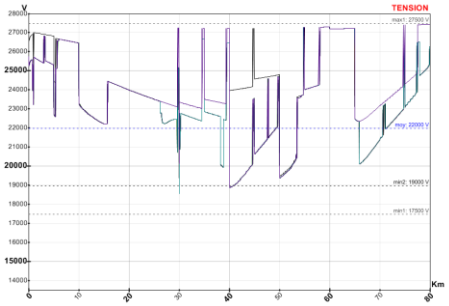


Figure 9 Tensions aux pantographes des trains : cas où le critère F2 est minimisé (retard au départ)

A ce stade de la démarche, c'est à l'opérateur de choisir l'un des points du front de Pareto, en fonction du compromis qu'il souhaite réaliser : faire circuler des trains espacés, mais qui vont vite, ou au contraire augmenter la densité au détriment de la vitesse. La Fig. 9 montre la tension aux pantographes pour le cas où le critère F2 est minimisé.

5. Conclusion

La réorganisation du trafic ferroviaire en cas d'incident sur infrastructure ferroviaire et de baisse de puissance disponible doit être efficace pour une bonne gestion du réseau. Cet article propose d'exploiter l'analyse de sensibilité globale et l'analyse de sensibilité régionale afin de générer des informations qualitatives et quantitatives sur l'influence des différentes actions d'ajustement du trafic que l'opérateur souhaite mettre en œuvre. La méthode est appliquée à un cas simple et les résultats obtenus sont encourageants.

Suite à ces premiers résultats, le travail va se poursuivre dans deux directions. Un premier axe concerne l'étude d'autres indicateurs de sensibilité, plus rapides à calculer que les indices de Sobol car nécessitant un échantillonnage moins fin. Le deuxième axe portera sur l'étude de cas-tests de plus en plus proches des cas d'exploitation de la SNCF.

6. References

[1] J. Krasemann, « Greedy algorithm for railway traffic re-scheduling during disturbances: a swedish case », Progress In IET Intelligent Transport Systems, 2010.

[2] S. Dundar et I. Sahin, « Train rescheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways », in Transportation Research Part C, p. 1-15, 2013.

[3] A. Toletti, V. De Martinis, et U. Weidmann « Energy savings in mixed rail traffic rescheduling: an RCG approach » Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016.

[4] S. Zhan, L. Kroon, L. Veelenturf, et J. Wagenaar « Real-time-high-speed train rescheduling in case of a complete blockage», Progress in Transportation Research Part B, 2016.

[5] I. Louwerse, et D. Huisman « Adjusting a railway timetable in case of partial or a complete blockades», Progress in European journal of operational research, p. 583-593, 2014.

[6] N. Ghaemi, R. Goverde et O. Cats « Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage», in IEEE International conference on intelligent rail transportation (ICIRT), 2016.

[7] S. Binder, Y. Maknoon et M. Bierlaire « Efficient exploration of the multiple objectives of the railway timetable rescheduling problem», in 17th swiss Transport Research Conference, Monte Verita / Ascona, 2016.

[8] B. Desjouis, F. Ossart, S. Saad, J. Bigeon, E. Sourdille « Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires », Symposium de Génie Electrique 2016, Grenoble, France

[9] A. Saltelli et al., Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley & Sons, 2008.

[10] I. M. Sobol, « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, n° 1, p. 271-280, févr. 2001.

[11] F. Gamboa, A. Janon, T. Klein et A. Lagnoux « Sensitivity indices for multivariate outputs », C.R. Math, p:307-310, 2013.

[12] G. Hornberger, « Eutrophication in peel inlet—I. The problem-defining behavior and a mathematical model for the phosphorus scenario », *Water Research*, vol. 14, n° 1, p. 29-42, 1980

[13] A. Sieber, et S. Uhlenbrook « Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure », In Journal of Hydrology, p:216-235, 2005.