

**Procédé et système de prédiction quasi temps réel d'au moins un indicateur  
de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers**

La présente invention concerne un procédé et un système de prédiction quasi temps réel d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers, ainsi qu'un réseau de transport associé.

L'invention se situe dans le domaine du transport de passagers, en particulier du transport urbain, dans le contexte d'un réseau ferroviaire de type métro urbain, pour la régulation de flux de passagers dans le réseau.

Un tel réseau de transport de passagers est caractérisé par un ensemble de stations et un ensemble de lignes, une ligne étant définie par l'ensemble de stations desservies par un véhicule de transport.

De plus, un tel réseau de transport comporte un ensemble de plateformes de chargement et/ou de déchargement des passagers, par exemple des quais de métro.

Un tel réseau a une topologie qui lui est propre, certaines stations comportant plusieurs telles plateformes et étant desservies par plusieurs lignes du réseau.

Dans les réseaux de transport modernes, par exemple dans un réseau de métro, chaque station est équipée de portiques, et chaque usager est muni d'une carte permettant d'accéder au réseau et ayant un identifiant unique associé, au moins entre son entrée sur le réseau et sa sortie. Les portiques sont équipés de capteurs adaptés à lire les données de la carte, qui est par exemple munie d'une puce et de moyens de communication de données. Ainsi, le réseau de transport est équipé d'un système permettant d'enregistrer, en lien avec un identifiant, une heure d'entrée sur le réseau et une station d'entrée associée, ainsi qu'une heure de sortie et une station de sortie associée.

En fonctionnement, le réseau de transport ayant une topologie donnée a des paramètres de fonctionnement, comprenant notamment la fréquence de circulation des véhicules sur chaque ligne, qui varie en général en fonction de paramètres tels que les plages horaires, le type de véhicule utilisé, le taux de charge.

Dans le contexte des réseaux de transport de passagers de ce type, il est critique de connaître divers indicateurs caractérisant le fonctionnement du réseau, notamment le temps d'attente moyen pour au moins une plateforme du réseau, à diverses périodes (heures de la journée, jours de la semaine), ou une charge moyenne en nombre de passagers en attente sur une plateforme du réseau durant ces mêmes périodes, ou la charge moyenne des véhicules de transport de passagers.

L'estimation des indicateurs de fonctionnement d'un réseau de transport qui est un système technique complexe permet ensuite d'améliorer le fonctionnement du réseau et

de réguler le flux de passagers, en particulier pour éviter des problèmes de sécurité. En effet, des surcharges de passagers en attente sur une plateforme ou dans une rame de véhicule de transport risquent d'entraîner des accidents. De plus, une surcharge de passagers dans un véhicule de transport provoque une usure trop importante du matériel et risque également d'induire des problèmes de sécurité (temps de freinage par exemple).

Pour estimer des tels indicateurs de fonctionnement d'un réseau de transport, on connaît une méthode classique de sondage, c'est-à-dire de comptage manuel des passagers par des personnes auxquelles on confie cette tâche ponctuelle. Ce travail est effectué ponctuellement dans un sous-ensemble de stations, et fournit des résultats échantillonnés qui ont une fiabilité limitée.

D'autre part, on connaît également des solutions basées sur la théorie des graphes qui impliquent une modélisation du réseau de transport. Ce sont des méthodes complexes, qui nécessitent des temps de calculs longs.

On connaît également des méthodes d'estimation d'indicateurs de fonctionnement par calcul à partir de données d'entrées/sorties de passagers collectées sur des périodes d'observation longues. Ce type de méthodes permet d'obtenir une estimation des indicateurs observés en moyenne, sans toutefois permettre de prédire les valeurs d'indicateurs de fonctionnement avec une bonne précision.

Il existe un besoin de prédire des indicateurs de fonctionnement de manière plus précise et quasiment en temps réel, sur une période donnée à partir d'un instant présent, afin d'améliorer la possibilité de réguler le flux de passagers quasiment en temps réel. En effet, cela permettrait d'améliorer la sécurité des passagers. De plus, cela permettrait d'économiser des ressources et de diminuer l'usure du matériel roulant, en cas de surcharge ou de sous-charge du réseau.

A cet effet, l'invention propose un procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le procédé comportant une étape a), préalable à un instant temporel courant, de collecte et mémorisation de données d'entrées/sortie de trajets effectifs effectués pendant une fenêtre d'observation passée, précédant l'instant temporel courant.

Ce procédé comporte, pour au moins un premier intervalle temporel compris dans ladite fenêtre d'observation, des étapes de :

b) application d'un algorithme d'estimation, à partir desdites données collectées durant ledit premier intervalle temporel, d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé durant ledit premier intervalle temporel,

5 c) mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer, pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre d'observation et avant ledit premier intervalle temporel, au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour ledit premier intervalle  
10 temporel,

d) détermination d'un mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique, pertinent à l'instant temporel courant, en fonction desdits indicateurs de fonctionnement du réseau de transport prédits et de l'indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé pour ledit premier intervalle  
15 temporel,

e) pour au moins un deuxième intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur ou concomitant à l'instant temporel courant, mise en œuvre dudit mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer au moins un indicateur de fonctionnement prédit associé à chaque deuxième intervalle temporel.

20 Avantageusement, l'invention permet de prédire un ou plusieurs indicateurs de fonctionnement dans un futur proche par rapport à l'instant temporel courant, avec une précision améliorée. La prise en compte de ces indicateurs, par l'opérateur du réseau de transport et/ou par les passagers, permet de réguler les flux de passagers et, notamment, de diminuer les surcharges.

25 Le procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, prises indépendamment ou selon toutes les combinaisons techniquement envisageables.

30 L'indicateur de fonctionnement du réseau de transport est choisi parmi un temps d'attente moyen pour chaque plateforme du réseau, une charge moyenne en nombre de passagers en attente sur une plateforme du réseau, une charge moyenne, en nombre de passagers, par véhicule de transport.

Les étapes b) à e) sont répétées avec une fréquence temporelle prédéterminée.

35 La pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique comprend des méthodes de décision basées sur des forêts d'arbres décisionnels et des méthodes de régression de gradient.

L'étape c) de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique comprend une mise en œuvre d'un même algorithme d'apprentissage automatique avec plusieurs sous-ensembles de données d'entrée/sortie différents, collectés pendant des sous-fenêtres d'observation temporelle de durées différentes.

5 Le procédé comporte en outre une étape préalable d'apprentissage de paramètres pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, utilisant des données sur au moins une période d'apprentissage longue durée, de durée supérieure à un mois.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un procédé de régulation de flux d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le réseau comportant en outre un des équipements électroniques et un centre de supervision et de calcul adapté à communiquer avec lesdits équipements. Ce procédé de régulation de flux comprend, à un instant temporel courant :

-une prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau selon un procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers tel que brièvement décrit ci-dessus ;

20 -l'utilisation dudit au moins un indicateur de fonctionnement du réseau pour la régulation du flux de passagers dans le réseau.

Selon un mode de réalisation, l'étape d'utilisation comporte des étapes de :

-calcul d'au moins un paramètre de fonctionnement du réseau à partir du ou des indicateurs de fonctionnement prédits,

25 -transmission dudit au moins un paramètre ou d'une commande associée à au moins un équipement électronique du réseau,

-modification du fonctionnement dudit équipement électronique en fonction dudit paramètre.

30 Selon une variante, l'étape d'utilisation comporte une publication dudit au moins un indicateur de fonctionnement à destination d'équipements utilisateur adaptés à communiquer sans fil.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un système de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le système comportant un module

de collecte et mémorisation de données d'entrées/sortie de trajets effectifs effectués pendant une fenêtre d'observation passée, précédant un instant temporel courant.

Ce système comporte au moins un processeur de calcul adapté à mettre en œuvre, pour au moins un premier intervalle temporel compris dans ladite fenêtre d'observation :

- un module d'application d'un algorithme d'estimation, à partir desdites données collectées durant ledit premier intervalle temporel, d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé durant ledit premier intervalle temporel,
- un module de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer, pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre d'observation et avant ledit premier intervalle temporel, au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour ledit premier intervalle temporel,
- un module de détermination d'un mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique, pertinent à l'instant temporel courant, en fonction desdits indicateurs de fonctionnement du réseau de transport prédits et de l'indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé pour ledit premier intervalle temporel,
- pour au moins un deuxième intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur ou concomitant à l'instant temporel courant, un module de mise en œuvre dudit mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pertinent déterminé pour calculer au moins un indicateur de fonctionnement prédit associé à chaque deuxième intervalle temporel.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un support d'enregistrement d'informations, sur lequel sont mémorisées des instructions logicielles pour l'exécution d'un procédé de prédiction d'au moins un paramètre caractérisant le fonctionnement d'un réseau de transport de passagers tel que brièvement décrit ci-dessus, lorsque ces instructions sont exécutées par un dispositif programmable.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont mises en œuvre par un dispositif programmable, mettent en œuvre un procédé de prédiction d'au moins un paramètre caractérisant le fonctionnement d'un réseau de transport de passagers tel que brièvement décrit ci-dessus.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- la figure 1 est représentation schématique d'un réseau de transport selon un mode de réalisation ;

- la figure 2 est un schéma illustrant la topologie d'une partie d'un réseau de transport dans lequel l'invention est applicable ;

- la figure 3 est un organigramme des principales étapes d'un procédé prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport selon un mode de réalisation ;

- la figure 4 est un organigramme d'un mode de réalisation d'un procédé de régulation de flux dans un réseau de transport de passager selon un mode de réalisation.

L'invention sera décrite ci-après dans son application dans un réseau de transport urbain R, par exemple un réseau de métro.

Comme expliqué en introduction, un réseau de transport comporte un ensemble de stations et un ensemble de lignes, une ligne étant définie par l'ensemble de stations desservies par les véhicules, par exemple les trains dans le cas d'un réseau de métro. De plus, un tel réseau de transport comporte un ensemble de plateformes de chargement et/ou de déchargement des passagers, par exemple des quais de métro. Un tel réseau a une topologie qui lui est propre, certaines stations comportant plusieurs telles plateformes et étant desservies par plusieurs lignes du réseau.

Chaque station a une localisation géographique associée, par exemple indiquée par des coordonnées dans un référentiel de géolocalisation telles des coordonnées GPS. De même, chaque plateforme a des coordonnées de géolocalisation associées.

Ainsi, il est possible de calculer les distances entre stations et entre plateformes d'une même station, et de calculer le temps moyen nécessaire pour parcourir ces distances pour un passager.

La figure 1 représente schématiquement des éléments connectés d'un réseau de transport R dans lequel s'applique l'invention.

Le réseau de transport R comporte un centre de supervision et de calcul 2, comportant des dispositifs électroniques programmables 4 adaptés à effectuer divers calculs et à contrôler divers équipements du réseau à distance, dans la mesure où ces

équipements sont équipés de récepteurs de commandes, par exemple par un système de communication radio. Dans la suite on mentionne un dispositif électronique programmable 4, étant entendu que la référence 4 peut également désigner, en variante, une pluralité de dispositifs électroniques programmables interconnectés.

5 Le centre de calcul et de traitement 2 comporte également des unités électroniques de stockage d'information 6, adaptées à stocker un large volume de données.

De plus, le réseau de transport R comporte des équipements électroniques, par exemple chaque station est équipée d'un ensemble 8 de portiques électroniques 8A à 8D, et chaque usager est muni d'une carte permettant d'accéder au réseau et ayant un  
10 identifiant unique associé, au moins entre son entrée sur le réseau et sa sortie. Les portiques électroniques 8A à 8D sont équipés de capteurs adaptés à lire les données de la carte, qui est par exemple munie d'une puce et de moyens de communication de données.

15 Ainsi, le réseau de transport R est équipé d'un système permettant d'enregistrer, en lien avec un identifiant de carte, une heure d'entrée sur le réseau et une station d'entrée associée, ainsi qu'une heure de sortie et une station de sortie associée.

Les portiques électroniques sont adaptés à transmettre les données d'entrée/sortie enregistrées au centre de supervision et de calcul 2. Ces données d'entrée/sortie sont  
20 mémorisées par exemple dans les unités de stockage d'information 6.

Dans un mode de réalisation l'ensemble 10 de véhicules de transport comporte des trains adaptés à communiquer avec le centre de supervision et de calcul 2, et à recevoir des ordres de commande, par exemple par l'intermédiaire d'émetteurs/récepteurs radio.

25 Le réseau R comporte des équipements 12 facilitant la mobilité, par exemple des escalators 12A, des tapis roulants 12B ou des ascenseurs 12C. Dans un mode de réalisation, au moins une partie des équipements 12 est adaptée à recevoir des commandes du centre de supervision et de calcul 2, par exemple pour le réglage de la vitesse de fonctionnement ou l'arrêt des escalators et des tapis roulants.

30 Le réseau R comporte également des équipements électroniques 14 tels que des panneaux d'affichage, distribués dans les stations ou sur les plateformes, permettant d'afficher des informations diverses relatives au fonctionnement du réseau.

Le centre de supervision et de calcul 2 est adapté à recevoir des informations complémentaires 16 de systèmes de communication distants, par exemple des  
35 informations de planning ou de maintenance utiles pour la mise en fonctionnement des divers éléments du réseau R.

Le dispositif électronique programmable 4 du centre de de supervision et de calcul 2 est adapté à mettre en œuvre un procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau selon l'invention, et, le cas échéant, une modification des paramètres de fonctionnement du réseau en fonction des indicateurs prédits pour effectuer une régulation de flux dans le réseau.

Les indicateurs de fonctionnement du réseau sont prédits, pour un intervalle temporel futur, ultérieur à un instant temporel courant.

Un indicateur de fonctionnement du réseau associé à un intervalle temporel donné est par exemple le temps d'attente moyen pour au moins une plateforme du réseau pour ledit intervalle temporel, ou une charge moyenne en nombre de passagers en attente sur une plateforme du réseau durant l'intervalle temporel ou la charge moyenne des véhicules de transport de passagers d'une ligne donnée durant l'intervalle temporel ou le nombre moyen de trains manqués pour cause de surcharge par un passager, sur une plateforme donnée, durant l'intervalle temporel considéré.

Un paramètre de fonctionnement du réseau est par exemple un affichage sur les panneaux d'affichage 14, la fréquence des trains sur une ligne donnée, la capacité de charge des trains (par exemple le nombre de rames), la vitesse de fonctionnement des équipements 12, un mode de fonctionnement des portiques électroniques d'accès 8 (par exemple bloqué ou fonctionnement lent ou fonctionnement rapide).

Dans un mode de réalisation, le dispositif électronique programmable 4 comporte un processeur 20 apte à mettre en œuvre :

- un module 22 collecte et mémorisation de données d'entrées/sortie de trajets effectifs pendant une fenêtre d'observation passée, précédant l'instant temporel courant, ladite fenêtre d'observation passée ayant un instant de début distant de l'instant temporel courant d'une durée inférieure ou égale à un premier seuil prédéterminé,

- un module 24 d'application d'un algorithme d'estimation, à partir de données collectées durant un premier intervalle temporel, d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé durant ce premier intervalle temporel,

- un module 26 de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer, pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre d'observation et avant ledit premier intervalle temporel, au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour le premier intervalle temporel,

- un module 28 de détermination d'un mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique, pertinent à l'instant temporel courant en fonction des indicateurs calculés par les modules 24 et 26,

-un module 30 de mise en œuvre du mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique déterminé pour calculer, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées et mémorisées, au moins un indicateur de fonctionnement prédit associé à un deuxième intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur à l'instant temporel courant.

Le dispositif électronique programmable 4 comporte également un module 32 de calcul de paramètres de fonctionnement à modifier en fonction du ou des indicateurs de fonctionnement prédits et de transmission des paramètres, ou de commandes permettant de modifier ces paramètres, vers les équipements concernés.

Dans un mode de réalisation, ces modules 22 à 32 sont réalisés sous forme d'instructions de programme d'ordinateur, exécutables par le dispositif programmable. En alternative, ils sont réalisés par des composants logiques programmables, ou encore sous forme de circuits intégrés (ou ASIC) dédiés.

Des détails de mise en œuvre des divers modules mis en œuvre par un dispositif électronique programmable apte à mettre en œuvre l'invention sont donnés ci-après.

Dans un mode de réalisation, le centre de supervision et de calcul 2 permet la transmission d'indicateurs de fonctionnement prédits vers des équipements utilisateur 18A...18C, par exemple des smartphones ou tout autre équipement adapté à recevoir des communications sans fil, de manière à prévenir les utilisateurs/passagers du réseau d'éventuelles congestions du réseau. Cela permet une régulation de flux indirecte, les passagers recevant par exemple une alerte de congestionnement étant alors capables de modifier leur trajet (itinéraire ou horaire par exemple).

La figure 2 est un exemple schématique simplifié de topologie d'une partie de réseau de transport R comprenant des lignes  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$ , et des stations A, B, C et D, ainsi que d'autres stations, représentées par de nœuds et non référencées à la figure 2.

Les plateformes ne sont pas représentées. Ainsi, la correspondance entre lignes impliquant un changement de plateforme n'est pas représentée sur la figure 2.

Un trajet entre une station de départ A et une station d'arrivée B est défini par un ensemble de lignes et de correspondances permettant de relier A et B.

Dans l'exemple illustré, plusieurs trajets sont possibles pour se rendre de la station A à la station B.

Il est prévu d'enregistrer des données d'entrée dans le réseau R/sortie du réseau R sont enregistrées systématiquement dans le réseau de transport, en association avec un identifiant Id, par exemple un identifiant Id de carte d'abonnement de passager.

Il est à noter qu'il est possible de collecter des données d'entrée /sortie associées à un identifiant, sans toutefois connaître le trajet effectif du passager dans le réseau.

Une donnée d'entrée comporte une station d'entrée sur le réseau, par exemple une station A, ainsi qu'une date et heure d'entrée dans la station, notée  $T_A$ , en relation avec un identifiant Id.

5 Une donnée de sortie comporte une station de sortie du réseau, par exemple une station B, ainsi qu'une date et heure de sortie de la station B, notée  $T_B$ , en relation avec un identifiant Id.

La ligne  $L_1$  relie les stations A et B en six arrêts selon un premier trajet.

10 Il existe une première possibilité de correspondance avec la ligne  $L_2$ , à partir de la station C. Le trajet effectué à partir de la station A, sur la ligne  $L_1$  puis sur la ligne  $L_2$  à partir de la station C de correspondance est un deuxième trajet entre A et B et comporte 3 arrêts.

15 Il existe également une possibilité de correspondance avec la ligne  $L_3$ , à partir de la station D, le troisième trajet entre A et B totalisant dans ce cas 9 arrêts. On distingue a priori 3 trajets possibles différents entre les stations A et B. On suppose qu'en l'absence d'incidents le premier trajet et le deuxième trajet ont des durées similaires, et le troisième trajet est deux fois plus long.

La figure 3 est un synoptique des principales étapes d'un procédé de prédiction d'indicateur(s) de fonctionnement d'un réseau de transport selon un mode de réalisation de l'invention.

20 Le procédé comporte une première étape 40 d'obtention de données 38, soit à partir de mémoires 6, soit à partir d'une interface de communication avec un serveur distant ou avec une interface d'entrée/sortie du dispositif électronique programmable mettant en œuvre le procédé.

25 Les données comportent des données d'entrées/sortie de trajets effectifs effectués pendant une fenêtre d'observation passée.

30 La fenêtre d'observation passée est déterminée par rapport à un instant temporel courant  $T_C$  d'application du procédé. Par exemple, la fenêtre d'observation est une fenêtre de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures précédant l'instant courant  $T_C$ . Dans un mode de réalisation, la fenêtre d'observation comprend une journée complète. Dans une variante, la fenêtre d'observation début au début de la journée courante.

De manière plus générale, la fenêtre d'observation passée considérée se situe dans un passé proche par rapport à l'instant temporel courant. De préférence, l'instant temporel de début de la fenêtre d'observation précède l'instant temporel courant d'une durée inférieure ou égale à un seuil, par exemple de 15 minutes.

35 Les données reçues 38 comportent également des informations sur le réseau de transport R, les lignes, les stations par exemple :

- des coordonnées GPS des stations et/ou des plateformes ;
- des durées de transfert entre plateformes ;
- des informations de planification des trains ;

Les données 38 sont collectées et mémorisées à l'étape 40, qui est suivie d'une  
5 étape 42 d'application d'un algorithme d'estimation d'au moins un indicateur de  
fonctionnement du réseau de transport estimé durant un premier intervalle temporel. Le  
premier intervalle temporel est compris dans la fenêtre d'observation passée, et il est  
défini par un instant temporel de départ  $T_{11}$  et un instant temporel de fin  $T_{12}$ .

De préférence, le premier intervalle temporel est de l'ordre de 15 minutes.

10 Par exemple, l'indicateur de fonctionnement estimé est le temps moyen d'attente  
pour chaque plateforme de chaque station du réseau pendant le premier intervalle  
temporel.

De préférence, l'algorithme de calcul utilisé est l'algorithme décrit dans la  
demande de brevet FR1700181, qui présente une bonne efficacité calculatoire.

15 Cet algorithme d'estimation d'indicateur de fonctionnement de réseau de transport  
comprend une étape préalable de calcul et d'enregistrement, pour chaque couple de  
stations du réseau, d'au moins un trajet choisi entre les deux stations du couple de  
stations, en fonction de données statiques caractérisant le réseau de transport. Il  
comprend ensuite pour chaque donnée d'entrée/sortie obtenue pour le premier intervalle  
20 temporel considéré :

-une estimation d'une durée effective de trajet et une sélection d'un trajet entre  
station d'entrée et station de sortie parmi les trajets choisis en association avec le couple  
de stations formé par la station d'entrée et la station de sortie ;

-un calcul d'au moins un indicateur caractérisant le fonctionnement du réseau,  
25 comprenant le calcul d'un temps d'attente moyen pour chaque plateforme du réseau  
durant le premier intervalle temporel par mise en œuvre d'un algorithme itératif mettant en  
œuvre, à chaque itération :

- pour chaque donnée d'entrée/sortie, un calcul d'une différence temporelle  
entre la durée estimée du trajet sélectionné et la durée effective du trajet ;

30 -lorsque le trajet sélectionné comprend au moins une correspondance via  
une plateforme de chargement/déchargement, une affectation d'une fraction de  
ladite différence temporelle à chaque temps d'attente associé à une plateforme de  
correspondance.

Le temps d'attente durant le premier intervalle temporel pour chaque plateforme  
35 du réseau est mis à jour à chaque itération.

A l'issue de l'étape 42 on obtient un premier indicateur de fonctionnement du réseau estimé, associé au premier intervalle temporel, qui est le temps d'attente moyen par plateforme, et optionnellement, d'autres indicateurs de fonctionnement estimés, e.g. charge moyenne par plateforme ou par véhicule sont également calculés.

5 L'étape 42 est suivie d'une étape 44 de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour ledit premier intervalle temporel. Pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, on calcule un indicateur prédit à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre d'observation  
10 et avant ledit premier intervalle temporel, et de valeurs d'indicateurs de fonctionnement estimées, par exemple selon l'algorithme d'estimation préalablement décrit en référence à l'étape 42, pour des intervalles de temps compris dans la fenêtre d'observation et antérieurs au premier intervalle temporel.

Les algorithmes d'apprentissage automatique sont paramétrés par des paramètres  
15 d'apprentissage, qui sont obtenus lors d'une étape d'apprentissage 43 préalable, et qui sont mémorisés. L'étape d'apprentissage 43 utilise, de manière classique, de très larges volumes de données et nécessite beaucoup de calculs. Elle est effectuée avec une fréquence temporelle faible, par exemple à plusieurs mois d'intervalle, sur des larges volumes de données collectées pendant une période d'apprentissage longue durée. Par  
20 exemple, la période d'apprentissage est comprise entre 1 et 36 mois, et de préférence égale à 14 mois de manière à prendre en compte les saisonnalités. Les données d'apprentissage comprennent, sur la période d'apprentissage, des valeurs d'indicateur de fonctionnement du réseau de transport par plateforme estimé par un algorithme d'estimation, par tranches d'intervalles temporels, par exemple de 15 minutes, le nombre  
25 d'entrées/sorties par station et par tranche d'intervalle temporel, des informations de calendrier (par exemple week-ends et jours fériés).

Les paramètres d'apprentissage calculés pour chacun des algorithmes d'apprentissage automatique sont mémorisés.

Par exemple, les algorithmes d'apprentissage automatique utilisés comprennent  
30 d'une part la méthode de prédiction basée sur des forêts d'arbres décisionnels (en anglais « random forest classifiers »), et d'autre part la méthode dite de « gradient boosting ».

Bien entendu, d'autres méthodes dans le domaine de l'intelligence artificielle (ou « machine learning » en anglais) connues dans l'état de la technique sont utilisables.

Dans un mode de réalisation particulier de l'étape 44, un premier algorithme  
35 d'apprentissage automatique Meth1 utilisant des forêts d'arbres décisionnels est appliqué

sur N jeux de données différents, N étant un nombre entier positif supérieur ou égal à 2 et donc N résultats de prédiction d'indicateurs de fonctionnement sont obtenus.

Par exemple, les jeux de données diffèrent par la sous-fenêtre d'observation temporelle choisie, par exemple : 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 1 heure et 30 minutes, 2 heures, avant le premier intervalle temporel considéré. Chaque jeu de données est un sous-ensemble des données collectées à l'étape 40.

Dans ce mode de réalisation de l'étape 44, un deuxième algorithme d'apprentissage automatique Meth2 utilisant le « gradient boosting » est appliqué sur M jeux de données différents, M étant un nombre entier positif supérieur ou égal à 2 et donc M résultats de prédiction d'indicateurs de fonctionnement sont obtenus.

De la même manière que pour l'algorithme Meth1, par exemple, les jeux de données diffèrent par la sous-fenêtre d'observation temporelle choisie, par exemple : 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 1 heure et 30 minutes, 2 heures, avant le premier intervalle temporel considéré.

Ainsi, à l'issue de l'étape 44 on obtient plusieurs ensembles d'indicateurs de fonctionnement prédits pour le premier intervalle temporel considéré, chaque ensemble d'indicateurs prédit étant associé à un algorithme d'apprentissage automatique et à une sous-fenêtre d'observation temporelle.

Dans un mode de réalisation, chaque ensemble d'indicateurs de fonctionnement prédits comprend un seul indicateur de fonctionnement prédit, par exemple le temps d'attente moyen prédit pour le premier intervalle temporel par plateforme du réseau de transport.

Ensuite à l'étape 46 on met en œuvre une étape de détermination d'un mélange pondéré d'algorithmes d'apprentissage automatique (en anglais « Mixture Model »), le plus pertinent à l'instant temporel courant, parmi les méthodes testées. Ici, la pertinence désigne l'efficacité de prédiction, il s'agit donc du mélange pondéré d'algorithmes d'apprentissage automatique qui permet de prédire un indicateur de fonctionnement le plus proche de l'indicateur de fonctionnement estimé.

Le mélange pondéré d'algorithmes d'apprentissage permet d'obtenir un algorithme d'apprentissage automatique agrégé qui est performant à l'instant courant, pour l'indicateur de fonctionnement choisi.

Par exemple, lors de cette étape on compare les indicateurs de fonctionnement prédits calculés à l'étape 44, un par un, avec les indicateurs de fonctionnement estimés à l'étape 42, et on détermine les indicateurs les plus proches, puis la détermination d'un mélange pondéré d'algorithmes d'apprentissage en découle.

Dans une variante de mise en œuvre, l'étape 46 met en œuvre une boucle d'optimisation des pondérations définissant le mélange pondéré d'algorithmes d'apprentissage automatique. Le mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pertinent à l'instant courant déterminé à l'étape 46 est alors utilisé à l'étape 5 48 pour prédire un ensemble d'indicateurs de fonctionnement  $\{IF_1, \dots, IF_K\}$  du réseau pour un deuxième intervalle temporel, qui est un intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur ou égal à l'instant temporel courant.

Par exemple, le deuxième intervalle temporel est défini par un instant de début  $T_{21}$  et un instant de fin  $T_{22}$ , avec  $T_{21}$  égal à l'instant temporel courant  $T_C$  et  $T_{22}$  égal à l'instant 10 temporel courant  $T_C$  plus 15 minutes.

L'ensemble d'indicateurs de fonctionnement prédit  $\{IF_1, \dots, IF_K\}$  peut être limité, par exemple, à un temps d'attente moyen prédit  $IF_1$  pour le deuxième intervalle temporel futur, pour chaque plateforme du réseau.

Dans un mode de réalisation, on détermine des séries d'indicateurs de 15 fonctionnement prédits pour des deuxièmes intervalles temporels successifs. Par exemple, on détermine des séries d'indicateurs de fonctionnement prédits par tranches d'un quart d'heure pour les 3 heures suivant l'instant temporel courant.

Avantageusement, le procédé utilise un mélange pondéré de plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique, entraînés sur différents un sous-ensemble des données 20 collectées dans le passé, la pondération associée à ce mélange pondéré étant apprise en temps réel.

Ces indicateurs de fonctionnement prédits sont mémorisés et transmis à d'autres modules adaptés à les exploiter pour réguler le fonctionnement du réseau de transport à l'étape 50.

25 Lors d'une étape ultérieure 52, en lien avec une horloge non représentée, des nouveaux premier et deuxième intervalles temporels sont sélectionnés, par rapport à un instant temporel futur. Lorsque le temps s'est écoulé et l'instant temporel courant est égal à cet instant temporel futur, les étapes 40 à 48 sont itérées.

Par exemple, les étapes 40 à 48 sont itérées avec une fréquence temporelle 30 rapide, par exemple tous les quarts d'heure. Avantageusement, le mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pertinent à l'instant temporel courant est adaptatif et est effectué dynamiquement, quasiment en temps réel.

Ainsi, les indicateurs de fonctionnement prédits  $\{IF_1, \dots, IF_K\}$  sont mis à jour avec cette fréquence temporelle de répétition rapide, donc quasiment en temps réel.

35 La figure 4 est un synoptique des principales étapes d'un procédé de régulation de flux dans un réseau de transport de passager selon un mode de réalisation, utilisant un

procédé de prédiction d'indicateur(s) de fonctionnement du réseau tel que décrit ci-dessus.

Le procédé comporte une première étape 60 de prédiction d'indicateurs de fonctionnement sur un intervalle temporel futur par rapport à l'instant temporel courant.

5 Le procédé décrit ci-dessus est mis en œuvre à l'étape 60.

Puis à l'étape 62 les indicateurs de fonctionnement prédits sont publiés, par exemple via une application dédiée, vers des équipements utilisateur, par exemple des smartphones, permettant ainsi aux utilisateurs/passagers d'être informés quasiment en temps réel du fonctionnement du réseau à prévoir durant le deuxième intervalle temporel, c'est-à-dire dans un futur proche, notamment le temps d'attente moyen, la charge des plateformes et des véhicules. Ces indicateurs de fonctionnement prédits sont alors soit exploitables directement par les utilisateurs, soit exploitables par des applications intermédiaires, pour calculer par exemple un trajet optimisé en temps ou en confort entre une station A et une station B du réseau.

15 A l'étape 64, mise en œuvre sensiblement en parallèle de l'étape 62, les indicateurs de fonctionnement prédits sont mis en œuvre dans des calculs pour calculer des paramètres de fonctionnement du réseau souhaités durant l'intervalle temporel associé.

Par exemple, la vitesse de fonctionnement des escalators 12A, des tapis roulants 12B ou des portiques électroniques 8A à 8D est calculée, pour éviter d'ouvrir l'accès à une plateforme donnée pour laquelle une surcharge été prédite à un nombre trop important de passagers. En parallèle, la capacité des trains pour certaines lignes ou la fréquence de circulation est augmentée. En cas de sous-charge prédite, la capacité des trains pour certaines lignes ou la fréquence de circulation est diminuée, et par exemple certains tapis roulants ou escalators sont mis en arrêt. Par conséquent, avantageusement, la consommation d'énergie électrique est diminuée. Ainsi, le flux de passagers dans le réseau sera régulé.

Les paramètres de fonctionnement calculés à l'étape 64 sont transmis, éventuellement sous forme de commandes à appliquer, à divers équipements électroniques du réseau à l'étape 66, par exemple aux équipements 12 facilitant la mobilité dans le réseau.

Les paramètres de fonctionnement calculés sont alors appliqués par les équipements électroniques concernés à l'étape 68.

Avantageusement, l'invention permet d'améliorer la régulation du flux de passagers, et par conséquent d'optimiser l'utilisation des ressources (e.g. électricité), de

prévenir l'usure du matériel et, en cas de surcharge prévue, d'améliorer la sécurité et le confort des passagers.

REVENDEICATIONS

- 1.- Procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station
- 5 comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le procédé comportant une étape, préalable à un instant temporel courant, de :
- a) collecte et mémorisation (40) de données d'entrées/sortie de trajets effectifs
- 10 effectués pendant une fenêtre d'observation passée, précédant l'instant temporel courant, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte, pour au moins un premier intervalle temporel compris dans ladite fenêtre d'observation, des étapes de :
- b) application (42) d'un algorithme d'estimation, à partir desdites données collectées durant ledit premier intervalle temporel, d'au moins un indicateur de
- 15 fonctionnement du réseau de transport estimé durant ledit premier intervalle temporel,
- c) mise en œuvre (44) d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer, pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre
- 20 d'observation et avant ledit premier intervalle temporel, au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour ledit premier intervalle temporel,
- d) détermination (46) d'un mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique, pertinent à l'instant temporel courant, en fonction
- 25 desdits indicateurs de fonctionnement du réseau de transport prédits et de l'indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé pour ledit premier intervalle temporel,
- e) pour au moins un deuxième intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur ou concomitant à l'instant temporel courant, mise en œuvre (48) dudit mélange
- 30 pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer au moins un indicateur de fonctionnement prédit associé à chaque deuxième intervalle temporel.
- 2.- Procédé selon la revendication 1, dans lequel ledit indicateur de fonctionnement du réseau de transport est choisi parmi un temps d'attente moyen pour
- 35 chaque plateforme du réseau, une charge moyenne en nombre de passagers en attente

sur une plateforme du réseau, une charge moyenne, en nombre de passagers, par véhicule de transport.

5 3.- Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel les étapes b) à e) sont répétées avec une fréquence temporelle prédéterminée.

10 4.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique comprend des méthodes de décision basées sur des forêts d'arbres décisionnels et des méthodes de régression de gradient.

15 5.- Procédé selon la revendication 4, dans lequel l'étape c) de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique comprend une mise en œuvre d'un même algorithme d'apprentissage automatique avec plusieurs sous-ensembles de données d'entrée/sortie différents, collectés pendant des sous-fenêtres d'observation temporelle de durées différentes.

20 6.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comportant en outre une étape préalable d'apprentissage de paramètres pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, utilisant des données sur au moins une période d'apprentissage longue durée, de durée supérieure à un mois.

25 7.- Procédé de régulation de flux d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le réseau comportant en outre un des équipements électroniques et un centre de supervision et de calcul adapté à communiquer avec lesdits équipements, le procédé de régulation de flux étant caractérisé en ce qu'il comprend, à un instant temporel courant :

30 -prédiction (60) d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau selon un procédé de prédiction conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 6 ;

-utilisation (62, 64, 66, 68) dudit au moins un indicateur de fonctionnement du réseau pour la régulation du flux de passagers dans le réseau.

35 8.- Procédé selon la revendication 7, dans lequel l'étape d'utilisation comporte des étapes de :

-calcul (64) d'au moins un paramètre de fonctionnement du réseau à partir du ou des indicateurs de fonctionnement prédits,

-transmission (66) dudit au moins un paramètre ou d'une commande associée à au moins un équipement électronique du réseau,

5        -modification (68) du fonctionnement dudit équipement électronique en fonction dudit paramètre.

9.- Procédé selon la revendication 7, dans lequel l'étape d'utilisation comporte une publication (62) dudit au moins un indicateur de fonctionnement à destination  
10 d'équipements utilisateur adaptés à communiquer sans fil.

10.- Programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont mise en œuvre par un dispositif électronique programmable, mettent en œuvre un procédé de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau  
15 de transport de passagers conforme aux revendications 1 à 6.

11. Système de prédiction d'au moins un indicateur de fonctionnement d'un réseau de transport de passagers, le réseau comportant un ensemble de stations, chaque station comportant au moins une plateforme de chargement et/ou déchargement de  
20 passagers dans un véhicule de transport du réseau, le réseau étant équipé d'un système permettant d'enregistrer, en association avec un identifiant, des données d'entrée/sortie du réseau, le système comportant un module de collecte et mémorisation de données d'entrées/sortie de trajets effectifs effectués pendant une fenêtre d'observation passée, précédant un instant temporel courant,

25        le système étant caractérisé en ce qu'il comporte au moins un processeur de calcul adapté à mettre en œuvre, pour au moins un premier intervalle temporel compris dans ladite fenêtre d'observation :

30        -un module (24) d'application d'un algorithme d'estimation, à partir desdites données collectées durant ledit premier intervalle temporel, d'au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé durant ledit premier intervalle temporel,

35        - un module (26) de mise en œuvre d'une pluralité d'algorithmes d'apprentissage automatique pour calculer, pour chaque algorithme d'apprentissage automatique, à partir d'au moins un sous-ensemble des données collectées durant ladite fenêtre d'observation et avant ledit premier intervalle

temporel, au moins un indicateur de fonctionnement du réseau de transport prédit pour ledit premier intervalle temporel,

5                   - un module (28) de détermination d'un mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique, pertinent à l'instant temporel courant, en fonction desdits indicateurs de fonctionnement du réseau de transport prédits et de l'indicateur de fonctionnement du réseau de transport estimé pour ledit premier intervalle temporel,

10                  - pour au moins un deuxième intervalle temporel futur, ayant un instant de début postérieur ou concomitant à l'instant temporel courant, un module (30) de mise en œuvre dudit mélange pondéré des algorithmes d'apprentissage automatique pertinent déterminé pour calculer au moins un indicateur de fonctionnement prédit associé à chaque deuxième intervalle temporel.

15