

DESCRIPTION

TITRE : Procédé et système de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport

La présente invention concerne un procédé et un système de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport, en particulier un réseau de transport ferré urbain.

L'invention se situe dans le domaine des systèmes de gestion automatisée des réseaux de transport urbains, par exemple des réseaux de métro, et plus généralement dans tout réseau de transport de passagers.

Dans de tels réseaux de transport, la régulation en fonction de l'affluence des passagers est critique, une affluence dépassant un certain seuil pouvant induire, au-delà de l'inconfort, des risques de sécurité pour les passagers.

Un réseau de transport de passagers, en particulier un réseau ferré urbain, 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, en général selon deux sens de circulation opposés.

De plus, un tel réseau de transport comporte, dans chaque station, 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 de validation des titres de transport, et chaque usager est muni d'un titre de transport, par exemple une carte lisible par un capteur, permettant de valider le titre de transport pour un trajet, une durée etc. Certains réseaux peuvent contenir de tels portiques de validation sur des plateformes d'accès à une pluralité de stations ou de plateformes du réseau. Plus généralement, on appellera lieu de validation tout lieu du réseau comportant un ou plusieurs portiques de validation de titres de transport.

Ainsi, le réseau de transport est équipé d'un système permettant d'enregistrer des données de validation de titres de transport, en lien avec un lieu de validation et une date de validation, par exemple d'entrée dans le réseau.

Les procédés et systèmes de prédiction d'affluence ou de charge des plateformes de chargement/déchargement d'un réseau de transport sont généralement basés sur un

traitement des données de validation historiques pour une prédiction dite long terme, qui permet de dégager des prédictions de charge par exemple en fonction des journées de semaine ou de week-end, et en fonction d'horaires dans la journée, permettant ainsi de distinguer des périodes de forte affluence, et de caractériser la charge attendue, par exemple en semaine ouvrée pendant les créneaux généralement appelés « horaires de bureau ».

La prédiction de charge ou d'affluence permet à un opérateur, exploitant du réseau de transport, de prévoir divers paramètres du réseau, i.e. des paramètres de fonctionnement des véhicules et des équipements des stations, et également le nombre d'agents d'assistance en station, pour assurer la sécurité des passagers et pour maintenir leur confort. Par exemple, des véhicules de transport plus fréquents, de plus grande capacité, par exemple des véhicules à étage, sont prévus pour les jours et horaires de forte affluence, et à l'inverse, un espacement de la fréquence des véhicules est prévu aux horaires de faible affluence. En plus d'assurer la sécurité et la qualité de service, cela permet d'ajuster au mieux la consommation de ressources (par exemple, d'énergie électrique dépensée), l'usure des véhicules.

Néanmoins, de tels procédés de prédiction automatisés ne permettent pas de s'adapter en temps réel à des pics d'affluence inattendus, dus à des événements qui ne sont pas récurrents sur une longue période temporelle, et donc il existe un risque de surcharge ou d'affluence trop important, non anticipé, qui peut aller jusqu'à compromettre la sécurité des passagers.

Un objectif de la présente invention est de remédier à cet inconvénient de l'état de la technique.

A cet effet, l'invention propose, selon un aspect, un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport, en particulier un réseau de transport ferré urbain, le réseau de transport comportant un ensemble de lieux de validations d'entrées et/ou de sorties de passagers et un système permettant d'enregistrer des données de validations effectives par lieu de validation. Ce procédé comporte les étapes suivantes mises en œuvre par un système de calcul:

à une première fréquence d'exécution,

- apprentissage et application de modèles de prédiction statistique long terme, chaque modèle de prédiction statistique long terme étant associé à un lieu de validation et étant calculé pour obtenir, pour une première durée de prédiction, une série temporelle de prédictions de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire choisie, lesdites séries temporelles formant des prédictions de validations de référence ;

○ apprentissage d'un unique modèle de prédiction court terme, applicable pour l'ensemble des lieux de validation, et permettant de prédire, pour une deuxième durée de prédiction inférieure à la première durée de prédiction, un nombre de validations par intervalle temporel de durée unitaire et par lieu de validation formant des prédictions de validations court terme ;

à une deuxième fréquence d'exécution, supérieure à la première fréquence d'exécution, des étapes mises en œuvre à un instant temporel d'exécution :

○ agrégation des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire durant une période d'historique par rapport à l'instant temporel d'exécution, pour obtenir des données de validation agrégées,

○ application dudit unique modèle de prédiction court terme sur les données de validation agrégées, pour obtenir des prédictions de validations court terme sur la deuxième durée de prédiction, par lieu de validation et par intervalle temporel ;

○ comparaison, par lieu de validation et par intervalle temporel, de la prédiction de validations de référence et de la prédiction de validations à court terme, et en cas de différence supérieure à un seuil d'alerte prédéterminé, levée d'alerte.

Avantageusement, le procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport permet de prédire des nombres de validations sur des intervalles temporels suivant un instant temporel d'exécution, prenant en compte des données récentes permettant ainsi de capter des changements par rapport à des prédictions de validations de référence, calculées à une fréquence moins élevée. Le procédé est ainsi apte à apporter une meilleure prévision d'affluence en cas de changement ponctuel non récurrent.

Avantageusement, une alerte est levée en cas de constatation d'un changement, supérieur à un premier seuil prédéterminé, par rapport aux prédictions de validations de référence.

Le procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, prises indépendamment ou selon toutes les combinaisons techniquement envisageables.

Si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un premier seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une alerte de premier niveau de priorité est levée.

Si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un deuxième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une alerte de deuxième niveau de priorité est levée, le procédé comportant en

outre une mise en œuvre en temps réel d'une mesure corrective dans le réseau de transport permettant de réguler le flux de passagers arrivant sur des plateformes associées au lieu de validation.

Si la prédiction de validations de référence dépasse la prédiction de validations à court terme d'une valeur supérieure à un troisième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une mesure de régulation d'équipements du réseau est mise en œuvre.

L'unique modèle de prédiction court terme prend en entrée en outre des prédictions de validations de référence sur une période ultérieure à l'instant temporel d'exécution et des données de référence du réseau de transport.

Les données de référence du réseau de transport incluent des données vectorielles représentatives des lieux de validation et des données vectorielles représentatives de distances entre lieux de validation du réseau de transport.

L'unique modèle de prédiction court terme est un réseau de neurones profond comportant une pluralité de couches, entraîné sur des données de validations effectives pour effectuer la prédiction de validations court terme pour chaque lieu de validation et chaque intervalle temporel.

Chaque modèle de prédiction statistique long terme est un modèle auto-régressif adapté pour prédire une série temporelle de nombres de validations de référence.

La première fréquence d'exécution est égale à une semaine, la première durée de prédiction est égale à un jour, le procédé comportant un apprentissage d'un modèle de prédiction statistique long terme par jour de la semaine, par type de jour de la semaine et par lieu de validation, sur la base de données de validation effectives collectées pour un même jour de la semaine, de même type et pour ledit lieu de validation.

La deuxième fréquence d'exécution est inférieure à une heure, ladite deuxième durée de prédiction est égale à un nombre d'heures, et la durée unitaire d'intervalle temporel est égale à un quart d'heure.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un système de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport, en particulier un réseau de transport ferré urbain, le réseau de transport comportant un ensemble de lieux de validations d'entrées et/ou de sorties de passagers et un système permettant d'enregistrer des données de validations effectives par lieu de validation. Ce système de supervision automatisée comporte un système de calcul configuré pour mettre en œuvre: à une première fréquence d'exécution,

- un module d'apprentissage et d'application de modèles de prédiction statistique long terme, chaque modèle de prédiction statistique long terme étant associé à un lieu de validation et étant calculé pour obtenir, pour une première durée de prédiction,

une série temporelle de prédictions de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire choisie, lesdites séries temporelles formant des prédictions de validations de référence ;

- un module d'apprentissage d'un unique modèle de prédiction court terme, applicable pour l'ensemble des lieux de validation, et permettant de prédire, pour une deuxième durée de prédiction inférieure à la première durée de prédiction, un nombre de validations par intervalle temporel de durée unitaire et par lieu de validation formant des prédictions de validations court terme ;
- à une deuxième fréquence d'exécution, supérieure à la première fréquence d'exécution, à un instant temporel d'exécution :
- un module d'agrégation des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire durant une période d'historique par rapport à l'instant temporel d'exécution, pour obtenir des données de validation agrégées,
- un module d'application dudit unique modèle de prédiction court terme sur les données de validation agrégées, pour obtenir des prédictions de validations court terme sur la deuxième durée de prédiction, par lieu de validation et par intervalle temporel ;
- un module de comparaison, par lieu de validation et par intervalle temporel, de la prédiction de validations de référence et de la prédiction de validations à court terme, et en cas de différence supérieure à un seuil d'alerte prédéterminé, un module de levée d'alerte.

Ce système est configuré pour mettre en œuvre un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport tel que brièvement décrit ci-dessus, selon tous ses modes de réalisation.

Selon une caractéristique, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un premier seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, le module de levée d'alerte est configuré pour lever une alerte de premier niveau de priorité.

Selon une caractéristique, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un deuxième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, le module de levée d'alerte est configuré pour lever une alerte de deuxième niveau de priorité, le système comportant en outre un module de mise en œuvre en temps réel d'une mesure corrective dans le réseau de transport permettant de réguler le flux de passagers arrivant sur des plateformes associées au lieu de validation

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 supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport tel que brièvement décrit ci-dessus, lorsque ces instructions sont exécutées par un dispositif électronique 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 électronique programmable, mettent en œuvre un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport 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 :

[Fig 1] la figure 1 est un exemple schématique de système de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig 2] la figure 2 est un synoptique des principales étapes d'un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig 3] la figure 3 est une représentation graphique schématique de séries temporelles de nombres de validations ;

[Fig 4] la figure 4 illustre schématiquement la répartition temporelle de données de validation en entrée et sortie de la prédiction court terme selon un mode de réalisation.

L'invention sera décrite ci-après dans son application dans la supervision d'un réseau de transport ferré urbain, typiquement un réseau de métro.

La figure 1 illustre schématiquement un système de supervision d'un réseau de transport de passagers.

Le système de supervision comprend des capteurs 4A...4N, par exemple intégrés dans des portiques de validation, appelés simplement portiques par la suite, configurés pour récupérer des données de validation de titres de transport de voyageurs, par exemple des données de validation d'entrée lors de l'entrée dans le réseau de transport et/ou des données de validation de sortie du réseau de transport.

Dans un mode de réalisation, les données de validation utilisées sont les données de validation d'entrée, une validation de titre de transport, appelée ci-après validation

effective, étant enregistrée lorsqu'un passager présente son titre de transport à son entrée dans le réseau de transport.

Chaque capteur 4A ... 4N est associé à une localisation spatiale dans le réseau, par exemple à une station.

5 Une donnée de validation comporte un identifiant de localisation spatiale dans le réseau, et une information de datation comportant une date/heure de validation. L'information de datation peut également comporter une indication de jour de la semaine. L'heure est indiquée sous toute forme standard connue, par exemple heure/minutes/secondes sur un intervalle de 24h.

10 De plus, une donnée de validation comprend, dans un mode de réalisation, un identifiant de titre de transport.

Le système de supervision comprend également un système de calcul central 6, comportant un ou plusieurs dispositifs électroniques programmables (e.g. des ordinateurs) adaptés à communiquer entre eux.

15 Dans un mode de réalisation, le système de calcul 6 est un dispositif électronique programmable.

Ce système de calcul comporte une interface de communication 8 adaptée à communiquer avec les capteurs 4A à 4N, par un protocole de communication filaire ou sans fil, l'interface de communication 8 étant notamment adaptée à recevoir les données de validations effectives récupérées par les capteurs. Ces données de validation effectives 20 sont mémorisées au fur et à mesure dans une unité de mémoire électronique 12, adaptée à mémoriser des données.

Le système de calcul 6 comporte en outre une unité électronique de calcul 14, composée d'un ou plusieurs processeur(s) de calcul, adaptée à communiquer avec l'unité de mémoire électronique 12 et avec l'interface de communication 8 via un bus de communication de données. 25

Le processeur de calcul 14 est apte à exécuter des calculs et des instructions de code de programme d'ordinateur ou instructions logicielles lorsque le dispositif électronique programmable 6 est mis sous tension.

30 Le processeur de calcul 14 est configuré exécuter pour des modules réalisés sous forme d'instructions logicielles pour mettre en œuvre un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon l'invention.

Ces modules comprennent :

35 - un module 18 d'apprentissage et d'application de modèles de prédiction statistique long terme, chaque modèle de prédiction statistique long terme étant associé à

un lieu de validation et étant calculé pour obtenir, pour une première durée de prédiction, une série temporelle de prédictions de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire choisie, lesdites séries temporelles formant des prédictions de validations de référence ;

- 5 - un module 20 d'apprentissage d'un unique modèle de prédiction court terme, applicable à l'ensemble des lieux de validation, et permettant de prédire, pour une deuxième durée de prédiction inférieure à la première durée de prédiction, un nombre de validations par intervalle temporel de durée unitaire et par lieu de validation formant des prédictions de validations court terme.

10 Les prédictions de validations de référence 25 sont mémorisées entre deux mises en œuvre du module 18.

Dans un mode de réalisation, les modèles de prédiction statistique long terme ne sont pas mémorisés après avoir été calculés et appliqués pour la prédiction.

15 Les divers paramètres 27 définissant l'unique modèle de prédiction court terme sont mémorisés dans l'unité de mémoire électronique 12. Par exemple, l'unique modèle de prédiction court terme est un réseau de neurones utilisant une représentation vectorielle des données comme expliqué plus en détail ci-après.

Les modules 18 et 20 sont par exemple mis en œuvre à une première fréquence d'exécution, par exemple toutes les semaines.

20 La première durée de prédiction est par exemple égale à une journée, le nombre de modèles de prédiction statistique entraînés étant suffisant pour prédire une semaine complète, par lieu de validation et par intervalle temporel dans la journée. L'intervalle temporel a une durée unitaire choisie, par exemple égale au quart d'heure, à la demi-heure, à l'heure.

25 De préférence, une distinction entre jours ouvrés et jours non ouvrés (week-end ou jours fériés) est effectuée.

De préférence, le module 18 met en œuvre des modèles de prédiction statistique distincts par lieu de validation, type de jour de la semaine (jour ouvré ou non ouvré) et jour de la semaine. De tels modèles de prédiction statistique seront décrits en détail ci-après.

30 La deuxième durée de prédiction est par exemple de l'ordre de H heures, par exemple de 2 à 5 heures, l'unique modèle de prédiction court terme étant adapté pour, lorsqu'il est mis en œuvre, prédire les validations pour l'ensemble des lieux de validation pendant les H heures suivant l'instant temporel d'exécution, en d'autres termes pendant la deuxième durée de prédiction, par intervalles temporels de durée unitaire.

35 Le processeur de calcul 14 est en outre configuré pour mettre en œuvre, avec une deuxième fréquence d'exécution supérieure à la première fréquence d'exécution :

-un module 22 d'agrégation des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire durant une période d'historique par rapport à l'instant temporel d'exécution, pour obtenir des données de validation agrégées ;

5 -un module 24 d'application de l'unique modèle de prédiction court terme sur les données de validation agrégées, pour obtenir des prédictions de validations court terme sur la deuxième durée de prédiction, par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire;

-un module 26 de comparaison des prédictions de validations de référence et des prédictions de validation à court terme et

10 -un module 28 d'alerte en cas de dépassement de seuils d'alerte.

En particulier, deux seuils d'alerte sont considérés, un premier seuil d'alerte indiquant un inconfort des passagers induit par une affluence plus importante que celle prévue par les prédictions de validations de référence, et un deuxième seuil d'alerte indiquant un risque de sécurité pour les passagers.

15 Ces alertes peuvent être transmises via un système de notification à un ou plusieurs opérateurs du réseau.

De préférence, la deuxième fréquence d'exécution correspond à la durée unitaire, par exemple l'exécution est effectuée toutes les 15 minutes.

20 De plus, le processeur de calcul 14 est configuré pour mettre en œuvre, optionnellement, un module 30 de contrôle/commande d'équipements 32A, 32B, 32M du réseau, ces équipements étant par exemple des escaliers mécaniques (ou escalators) ou tapis roulants 32A, des portiques 32B, des panneaux d'affichage 32M etc, suite au dépassement d'un des seuils d'alerte, afin de prendre des mesures correctives quasiment en temps réel. Bien entendu la liste d'équipements 32A à 32M n'est pas exhaustive.

25 Ce module 30 de contrôle/commande est par exemple programmé pour automatiquement commander des mesures correctives de ralentissement de l'accès à certaines stations ou plateformes de chargement du réseau de transport par : ralentissement de la vitesse des escalators ou tapis roulants, modification de la direction de certains portails d'entrée/sortie ; commander des affichages sur des panneaux de station ; commander des modifications de la fréquence de circulation de véhicules et la modification dynamique des tables d'horaires, ou modification de capacité des véhicules mis en circulation.

30 Dans un mode de réalisation, les modules 18, 20, 22, 24, 26, 28 et 30 sont réalisés sous forme d'instructions logicielles formant un programme d'ordinateur, qui, lorsqu'il est exécuté par un dispositif électronique programmable, met en œuvre un procédé de

supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon l'invention.

En variante non représentée, les modules 18, 20, 22, 24 26, 28 et 30 sont réalisés chacun sous forme de composants logiques programmables, tels que des FPGA (de l'anglais *Field Programmable Gate Array*), des microprocesseurs, des composants GPGPU (de l'anglais *General-purpose processing on graphics processing*), ou encore de circuits intégrés dédiés, tels que des ASIC (de l'anglais *Application Specific Integrated Circuit*).

Le programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles est en outre apte à être enregistré sur un support d'enregistrement d'informations, non-transitoire et lisible par ordinateur. Ce support lisible par ordinateur est par exemple, un médium apte à mémoriser les instructions électroniques et à être couplé à un bus d'un système informatique. A titre d'exemple, ce support est un disque optique, un disque magnéto-optique, une mémoire ROM, une mémoire RAM, tout type de mémoire non-volatile (par exemple EPROM, EEPROM, FLASH, NVRAM), une carte magnétique ou une carte optique.

La figure 2 est un logigramme des principales étapes d'un procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport selon un mode de réalisation.

Le procédé comprend une étape préliminaire 40 d'obtention de seuils d'alerte, consistant à configurer le premier seuil d'alerte indiquant un inconfort des passagers induit par une affluence plus importante que celle prévue par les prédictions de validations de référence, et le deuxième seuil d'alerte indiquant un risque de sécurité pour les passagers.

Dans un mode de réalisation, ces premier et deuxième seuils d'alerte sont fixés par des experts et mémorisés pour le réseau de transport dans son ensemble.

Dans un mode de réalisation alternatif, des premier et deuxième seuils d'alerte sont associés aux lieux de validation, en fonction d'informations caractérisant le réseau de transport, e.g. taille de la station, nombre ou capacités d'accueil des passages de plateformes de chargement/déchargement dans une station etc.

Ces premier et deuxième seuils d'alerte sont mémorisés.

Le procédé comprend également une étape 42 d'apprentissage et d'application de modèles de prédiction statistique long terme. L'étape 42 est mise en œuvre à une première fréquence d'exécution, par exemple hebdomadaire, afin de réaliser des prédictions de données de validation pour une semaine suivante, chaque modèle de prédiction statistique étant adapté pour réaliser une prédiction des validations dans le réseau de transport sur une semaine suivante.

Dans un mode de réalisation, les modèles de prédiction statistique sont des modèles de prédiction auto-régressifs de prédiction de séries temporelles, par exemple des modèles ARIMA (pour « Auto-Regressive Integrated Moving Average »).

Par exemple l'étape 42 comprend l'apprentissage de huit modèles de prédiction statistique de séries temporelles par lieu de validation, un par jour de la semaine, et un autre pour les jours fériés.

Ainsi, pour un réseau comportant P lieux de validation $(7+1) \times P$ modèles de prédiction statistique sont mis au point.

L'apprentissage d'un modèle est basé sur un historique de données de validations effectives préalablement mémorisées. Par exemple, pour un jour donné de la semaine, e.g. un lundi non férié, des données de validations des Q précédents lundis non férié enregistrées sont extraites des données de validations 10 enregistrées, avec par exemple Q compris entre 10 et 30.

La figure 3 illustre schématiquement un exemple de séries temporelles de nombres de validations. Dans cet exemple, une série temporelle 45 de nombres de validations enregistrées par unité temporelle (ou durée unitaire), par exemple par quart d'heure, pour un lieu de validation donné, est illustrée sous forme de graphe. L'axe des abscisses est un axe temporel et l'axe des ordonnées représente le nombre de validations par unités de 1000 validation (1K).

Des séries temporelles 43A, 43B, 43C correspondant au jour de la semaine choisi, e.g. le lundi, lorsqu'il ne s'agit pas d'un jour férié, sont extraites et agrégées pour former une nouvelle série temporelle 45, qui est utilisée comme séquence d'entraînement pour l'apprentissage d'un modèle de prédiction statistique (e.g. modèle ARIMA).

L'apprentissage permet d'obtenir les coefficients du modèle à appliquer pour obtenir une prédiction de validations, i.e. une prédiction de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire (e.g. quart d'heure) pour le jour de la semaine considéré. Si on considère un intervalle temporel d'un quart d'heure, une journée entière est représentée par 96 points. La prédiction permet alors d'obtenir une série temporelle de 96 échantillons $\{n_i\}$, chaque échantillon d'indice i ayant une valeur n_i étant égale au nombre de validations prédit pour l'intervalle temporel t_i . Cela permet de prédire la charge selon le moment de la journée, avec une granularité fine.

Les nombres de validations calculés par cette prédiction sont appelés par la suite validations de référence D1, qui sont mémorisées jusqu'à l'application suivante de l'étape 42.

Dans un mode de réalisation, les modèles de prédiction statistique ne sont pas mémorisés, ils sont ré-entraînés à la première fréquence d'exécution choisie, e.g. chaque semaine.

De retour à la figure 2, le procédé comprend ensuite une étape 44 d'apprentissage d'un modèle de prédiction court terme, pour une deuxième durée de prédiction, par exemple 5 égale à 3 heures, et pour l'ensemble des lieux de validation considérés.

De préférence, ce modèle de prédiction court terme est un réseau de neurones dense et profond incluant des représentations vectorielles.

De manière connue, un réseau de neurones dense est composé d'une succession 10 de couches, chaque couche comprenant une pluralité d'éléments appelés neurones. Dans un réseau de neurones dense, chaque neurone d'une couche reçoit en entrée de résultats fournis par chaque neurone de la couche précédente et calcule une valeur de sortie, fournie en entrée de la couche suivante. Chaque entrée d'un neurone est associée à un poids, également appelé poids synaptique, qui est typiquement un nombre réel. Le neurone 15 effectue une sommation de ses entrées pondérées, le résultat de cette sommation étant fourni à une fonction dite fonction d'activation. La fonction d'activation est une fonction permettant d'introduire une non-linéarité dans le traitement. Diverses fonctions d'activation (hyperbolique, sigmoïde, linéaire rectifiée) sont applicables. En complément optionnel, chaque neurone applique en outre un facteur multiplicatif appelé biais, la valeur délivrée à 20 la couche suivante est alors le produit de la valeur de biais et de la valeur de sortie de la fonction d'activation.

L'architecture d'un réseau de neurones profond tel que décrit ci-dessus est définie par le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, le nombre de paramètres d'entrée et de sortie.

25 Le réseau de neurones est également défini par les valeurs des divers paramètres (poids synaptiques et, le cas échéant, valeurs de biais), ces valeurs étant obtenues dans une phase d'apprentissage sur des données d'entraînement.

Par exemple, l'entraînement permet de déterminer des valeurs des paramètres du réseau de neurones qui minimisent une distance entre les données de validation prédites 30 et des données de validation effectives enregistrées, e.g. les nombres de validations prédites et enregistrées par intervalle temporel de durée unitaire, la distance à minimiser étant par exemple l'erreur quadratique moyenne.

Dans son application dans le procédé décrit, le réseau de neurones profond forme un modèle de prédiction court terme permettant de prédire, pour chaque intervalle temporel 35 (e.g. quart d'heure) de la deuxième période de prédiction (e.g. H=3 heures), un nombre de validations pour chaque lieu de validation du réseau de transport.

A titre d'exemple non limitatif, le modèle de prédiction court terme est formé par un réseau de neurones à 5 couches, mettant en œuvre une fonction d'activation ReLU (pour « Rectified Linear Unit ») et comportant un nombre décroissant de neurones par couche (par exemple 600, 480, 300, 240, 12) pour un nombre d'entrée de 1500 et un nombre de sortie de 12.

Par exemple, pour un réseau comportant $L=100$ lieux de validation, le modèle de prédiction court terme fournit 100×12 nombres de validations prédits.

Les données fournies en entrée du réseau de neurones sont par exemple :

- une représentation vectorielle des lieux de validation, les lieux de validation étant les stations du réseau de transport dans un cas d'application ;
- une matrice de distances, représentative de distances entre lieux de validation, par exemple en utilisant une distance de 1 entre lieux adjacents sur une ligne du réseau ;
- une représentation vectorielle des jours de la semaine et d'une valeur booléenne représentant un jour férié ;
- une représentation vectorielle des indices d'intervalles temporels à prédire, par exemple numérotés de 0 à 95 sur une journée lorsque la durée d'intervalle temporel est d'un quart d'heure ;
- des premières données de validations, qui sont des données de validations effectives préalablement enregistrées, dans le passé par rapport à l'instant temporel de calcul, sur une durée d'historique, par exemple pour chaque intervalle temporel par exemple au quart d'heure sur une durée de 12 heures, soit 12×4 intervalles temporels par lieu de validation ;
- des deuxièmes données de validations, qui sont des prédictions de validation de référence, prédites à l'étape 42, pour chaque lieu de validation, pour la deuxième durée de prédiction, par exemple pour les 3 heures démarrant à l'instant temporel de calcul, pour chaque intervalle temporel par exemple au quart d'heure, soit $3 \times 4 = 12$ valeurs (le nombre de sortie du modèle).

La représentation vectorielle des lieux de validation et la matrice de distances sont obtenues à partir de données de référence du réseau de transport, ces données de références étant des données qui définissent le réseau de transport (sa topologie, le nombre de lignes, de stations, de plateformes etc).

Avantageusement, l'utilisation des prédictions de validations de référence en entrée du modèle de prédiction court terme, ces prédictions de validations de référence étant par exemple calculées en début de semaine, permet de corriger le modèle en fonction d'informations récentes.

La figure 4 illustre schématiquement, sur des axes temporels respectifs T1 et T2, un segment 51 représentatif des premières données de validation sur l'axe T1, et un segment 53 représentatif des deuxièmes données de validation sur l'axe T2, par rapport à un instant temporel d'exécution t considéré. Ces deux segments forment les données fournies en entrée du modèle de prédiction court terme.

Lorsqu'il est mis en œuvre, le modèle de prédiction réalise une prédiction des données de validations sur la deuxième durée temporelle (e.g. 3 heures), représentées sous forme de segment 55 à la figure 4.

Comme déjà indiqué ci-dessus, les étapes 42 et 44 sont répétées avec une première fréquence d'exécution, par exemple hebdomadaire.

Le procédé comprend en outre des étapes répétées avec une deuxième fréquence d'exécution, supérieure à la première fréquence d'exécution, par exemple tous les quarts d'heure. Ainsi la deuxième fréquence d'exécution correspond à la durée unitaire d'intervalle temporel.

Ces étapes comprennent une étape 46 d'agrégation des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel pour obtenir des données de validation agrégées. Les données de validation effectives étant fournies au niveau le plus détaillé, par transaction individuelle, elles sont agrégées par station et sur l'intervalle temporel (e.g. dernier quart d'heure) à chaque intervalle temporel, et stockées pour pouvoir être utilisés dans l'étape 48, combinées aux agrégations précédentes. L'agrégation sera aussi utilisée plus tard dans l'étape 42 et 44.

Le procédé comporte ensuite une étape de prédiction fréquente 48, par application de l'unique modèle de prédiction, mis au point à l'étape 44, par exemple le réseau de neurones profond, pour obtenir des données de validations prédites pour la deuxième durée de prédiction (e.g. 3h), suivant l'instant temporel d'exécution, en d'autres termes, pour les 3 prochaines heures, et pour chaque intervalle temporel et chaque lieu de validation.

Le modèle de prédiction est appliqué à l'étape de prédiction fréquente 48, comme expliqué ci-dessus, sur un ensemble de données d'entrée comportant des premières données de validations effectives agrégées, obtenues sur une durée d'historique, et des deuxièmes données de validations, qui sont des prédictions de validations de référence, obtenues à l'étape 42.

A l'issue de l'étape de prédiction fréquente 48 sont obtenues des prédictions de validations D2 à court terme. En particulier, l'étape 48 fournit, pour chaque lieu de validation,

un nombre de validations prédit par intervalle temporel pour les H prochaines heures, e.g. les 3 prochaines heures.

Ensuite est mise en œuvre une comparaison 50 qui effectue, par lieu de validation et par intervalle temporel, la comparaison de la prédiction de validations de référence et de la prédiction de validations à court terme. Par exemple, la comparaison consiste à effectuer la différence, pour chaque lieu de validation et chaque intervalle temporel, entre le nombre de validations prédit et le nombre de validations de référence correspondant.

Si la prédiction de validations court terme, ie le nombre de validations prédit par le modèle de prédiction court terme, dépasse la prédiction de validations de référence, sur un même intervalle temporel et un même lieu de validation, d'une valeur supérieure ou égale au premier seuil l'alerte, une alerte indiquant une dégradation de la qualité de service (confort des passagers) est levée à l'étape de levée d'alerte 52.

Si la prédiction de validations court terme dépasse la prédiction de validations de référence, sur un même intervalle temporel et un même lieu de validation, d'une valeur supérieure ou égale au deuxième seuil l'alerte, une alerte indiquant un risque de sécurité pour les passagers est levée à l'étape de levée d'alerte 52.

Ainsi, dès que le nombre de validations prédit est supérieur au nombre de validations de référence correspondant d'une valeur supérieure ou égale au premier seuil d'alerte, une alerte est levée.

Ces alertes sont par exemple différenciées par une priorité de traitement associée, le dépassement du premier seuil d'alerte provoquant la levée d'une alerte de premier niveau de priorité, le dépassement du deuxième seuil d'alerte provoquant la levée d'une alerte de deuxième niveau de priorité, supérieur au premier niveau de priorité. En d'autres termes, en cas de dépassement du deuxième seuil d'alerte, la priorité de traitement est supérieure.

Suite à une alerte, transmise par exemple vers un système de notifications d'alertes à gérer, indiquant un dépassement du deuxième seuil d'alerte, il est également prévu, dans un mode de réalisation, d'effectuer un contrôle/commande automatique d'équipements réseau, ces équipements étant par exemple des escalators ou tapis roulants, des portiques, des panneaux d'affichage. Par exemple, la vitesse des escalators, tapis roulants et portiques d'entrée est diminuée en fonction de l'alerte pour ralentir le flux des passagers arrivant en plateforme et réguler le flux avec des files d'attente en amont de la plateforme. Le système de supervision recevant l'alerte informe les opérateurs et peut par exemple déclencher une procédure d'opération standard, c'est-à-dire une séquence d'événements prédéfinie prévue pour ce cas d'usage.

Il sera possible aussi de définir des seuil d'alertes sous le fonctionnement de référence (eg un troisième seuil d'alerte qui est un seuil d'alerte inférieur) afin d'alerter et de réguler

automatiquement des équipements électriques consommateurs d'énergie électrique comme la climatisation. Par exemple, si la différence entre la prédiction de validations de référence, et la prédiction de validations court terme, sur un même intervalle temporel et un même lieu de validation, est un nombre positif supérieur audit troisième seuil d'alerte, une
5 alerte de régulation des ressources est levée.

Cela permet d'ajuster leur fonctionnement en prévision d'un flux de passager prédit de façon consécutive plusieurs fois sous le seuil d'alerte inférieur, par exemple une prédiction basse pour une station pour les 2 prochaines heures.

Les étapes 42 et 44 forment un premier groupe 60 d'étapes du procédé effectuées
10 répétitivement à la première fréquence d'exécution, par exemple hebdomadaire.

Les étapes 46 à 50 forment un deuxième groupe 62 d'étapes du procédé, qui sont les étapes fréquentes, effectuées répétitivement à la deuxième fréquence d'exécution qui est de préférence inférieure à une heure, par exemple toutes les 15 minutes ou toutes les 30 minutes.

Les étapes 52 et 54 ne sont effectuées qu'en cas de besoin, suite à une
15 comparaison positive à l'étape 50.

Avantageusement, le procédé proposé fournit une prédiction court terme avec une bonne précision grâce à la combinaison des données de validations effectives mémorisées et de données de validations de référence prédites par un modèle de prédiction statistique
20 long terme.

Avantageusement, l'apprentissage des paramètres, ou en d'autres termes, l'entraînement, des divers modèles de prédiction se fait à une première fréquence alors qu'une prédiction court terme se fait à une deuxième fréquence plus élevée, ce qui permet d'économiser des ressources calculatoires.

Avantageusement, l'apprentissage des modèles s'effectuant très régulièrement, par
25 exemple à fréquence hebdomadaire, cela permet d'absorber les saisonnalités annuelles.

Avantageusement, le procédé présenté réalise une régulation automatisée des ressources du réseau de transport en fonction de la prédiction d'affluence à court terme, permettant à la fois d'améliorer le confort et la sécurité des passagers et d'économiser des
30 ressources (e.g. consommation d'énergie électrique) du réseau.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport, en particulier un réseau de transport ferré urbain, le réseau de transport comportant un ensemble de lieux de validations d'entrées et/ou de sorties de passagers et un système permettant d'enregistrer des données de validations effectives par lieu de validation, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes mises en œuvre par un système de calcul (6):
- à une première fréquence d'exécution,
 - apprentissage et application (42) de modèles de prédiction statistique long terme, chaque modèle de prédiction statistique long terme étant associé à un lieu de validation et étant calculé pour obtenir, pour une première durée de prédiction, une série temporelle de prédictions de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire choisie, lesdites séries temporelles formant des prédictions de validations de référence ;
 - apprentissage (44) d'un unique modèle de prédiction court terme, applicable pour l'ensemble des lieux de validation, et permettant de prédire, pour une deuxième durée de prédiction inférieure à la première durée de prédiction, un nombre de validations par intervalle temporel de durée unitaire et par lieu de validation formant des prédictions de validations court terme ;
 - à une deuxième fréquence d'exécution, supérieure à la première fréquence d'exécution, des étapes mises en œuvre à un instant temporel d'exécution :
 - agrégation (46) des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire durant une période d'historique par rapport à l'instant temporel d'exécution, pour obtenir des données de validation agrégées,
 - application (48) dudit unique modèle de prédiction court terme sur les données de validation agrégées, pour obtenir des prédictions de validations court terme sur la deuxième durée de prédiction, par lieu de validation et par intervalle temporel ;
 - comparaison (50), par lieu de validation et par intervalle temporel, de la prédiction de validations de référence et de la prédiction de validations à court terme, et en cas de différence supérieure à un seuil d'alerte prédéterminé, levée d'alerte (52).
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un premier seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une alerte de premier niveau de priorité est levée.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un deuxième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une alerte de deuxième niveau de priorité est levée, le procédé comportant en outre une mise en œuvre (54) en temps réel d'une mesure corrective dans le réseau de transport permettant de réguler le flux de passagers arrivant sur des plateformes associées au lieu de validation.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel, si la prédiction de validations de référence dépasse la prédiction de validations à court terme d'une valeur supérieure à un troisième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, une mesure de régulation d'équipements du réseau est mise en œuvre.

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'unique modèle de prédiction court terme prend en entrée en outre des prédictions de validations de référence sur une période ultérieure à l'instant temporel d'exécution et des données de référence du réseau de transport.

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel les données de référence du réseau de transport incluent des données vectorielles représentatives des lieux de validation et des données vectorielles représentatives de distances entre lieux de validation du réseau de transport.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel ledit unique modèle de prédiction court terme est un réseau de neurones profond comportant une pluralité de couches, entraîné sur des données de validations effectives pour effectuer la prédiction de validations court terme pour chaque lieu de validation et chaque intervalle temporel.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel chaque modèle de prédiction statistique long terme est un modèle auto-régressif adapté pour prédire une série temporelle de nombres de validations de référence.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 dans lequel ladite première fréquence d'exécution est égale à une semaine, la première durée de prédiction est égale à un jour, le procédé comportant un apprentissage d'un modèle de prédiction statistique long terme par jour de la semaine, par type de jour de la semaine et par lieu de validation, sur la base de données de validation effectives collectées pour un même jour de la semaine, de même type et pour ledit lieu de validation.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel ladite deuxième fréquence d'exécution est inférieure à une heure, ladite deuxième durée de prédiction est égale à un nombre d'heures, et la durée unitaire d'intervalle temporel est égale à un quart d'heure.

11. Programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont mises en œuvre par un dispositif électronique programmable, mettent en œuvre de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport conforme aux revendications 1 à 10.

- 5 12. Système de supervision automatisée de l'affluence de passagers à court terme dans un réseau de transport, en particulier un réseau de transport ferré urbain, le réseau de transport comportant un ensemble de lieux de validations d'entrées et/ou de sorties de passagers et un système permettant d'enregistrer des données de validations effectives par lieu de validation, le système de supervision automatisée étant caractérisé en ce qu'il comporte un système de calcul (6) configuré pour mettre en œuvre:
- 10 en ce qu'il comporte un système de calcul (6) configuré pour mettre en œuvre:
- à une première fréquence d'exécution,
 - un module d'apprentissage et d'application (18) de modèles de prédiction statistique long terme, chaque modèle de prédiction statistique long terme étant associé à un lieu de validation et étant calculé pour obtenir, pour une première durée de prédiction, 15 une série temporelle de prédictions de nombres de validations par intervalle temporel de durée unitaire choisie, lesdites séries temporelles formant des prédictions de validations de référence ;
 - un module d'apprentissage (20) d'un unique modèle de prédiction court terme, applicable pour l'ensemble des lieux de validation, et permettant de prédire, pour 20 une deuxième durée de prédiction inférieure à la première durée de prédiction, un nombre de validations par intervalle temporel de durée unitaire et par lieu de validation formant des prédictions de validations court terme ;
 - à une deuxième fréquence d'exécution, supérieure à la première fréquence d'exécution, à un instant temporel d'exécution :
 - 25 ○ un module d'agrégation (22) des données de validation effectives par lieu de validation et par intervalle temporel de durée unitaire durant une période d'historique par rapport à l'instant temporel d'exécution, pour obtenir des données de validation agrégées,
 - un module d'application (24) dudit unique modèle de prédiction court terme sur les données de validation agrégées, pour obtenir des prédictions de validations 30 court terme sur la deuxième durée de prédiction, par lieu de validation et par intervalle temporel ;
 - un module de comparaison (28), par lieu de validation et par intervalle temporel, de la prédiction de validations de référence et de la prédiction de validations à court terme, et en cas de différence supérieure à un seuil d'alerte prédéterminé, un module 35 de levée d'alerte (28).

13. Système selon la revendication 12, dans lequel, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un premier seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, le module de levée d'alerte (28) est configuré pour lever une alerte de premier niveau de priorité.

5 **14.** Système selon la revendication 12 ou 13, dans lequel, si la prédiction de validations à court terme dépasse la prédiction de validations de référence d'une valeur supérieure à un deuxième seuil d'alerte pour au moins un lieu de validation, le module de levée d'alerte (28) est configuré pour lever une alerte de deuxième niveau de priorité, le système comportant en outre un module (30) de mise en œuvre en temps réel d'une mesure
10 corrective dans le réseau de transport permettant de réguler le flux de passagers arrivant sur des plateformes associées au lieu de validation.