

L'outil PREDAFLU pour la surveillance et l'anticipation des venues aux urgences lors des épidémies virales hivernales

Guillaume BOULEUX

Décision et Information pour les Systèmes de Production
21 Av. Jean-Capelle, 69621 Villeurbanne, France
guillaume.bouleux@insa-lyon.fr

Résumé – Dans ce travail, j'aborde la résolution des problématiques d'encombrement ou de tension dans les services d'accueil des urgences par la constitution d'outils d'aide à la décision pour le pilotage des services. Je m'intéresse donc à proposer des indicateurs précoces et préventifs de venues anormales au sein des services et à caractériser les problèmes organisationnels au travers des flux de patients. Afin de permettre aux responsables de services d'accueil des urgences de disposer aujourd'hui d'une application leur permettant d'anticiper les venues dues aux épidémies virales hivernales, nous avons proposé un ensemble d'indicateurs, statistiques au début puis topologiques, et extrait les codes diagnostics impactant le plus l'organisation des services. L'application PREDAFLU qui est également le nom du projet financé par le ministère de la santé sous l'instrument PREPS-DGOS (PREPS-15-000668), est le résultat de ces travaux.

Abstract – In this work, I address the resolution of congestion or stress problems in emergency departments by developing decision support tools for the management of services. I am therefore interested in proposing early and preventive indicators of abnormal arrivals within the services and in characterizing the organizational problems through the patient flows. In order to allow the managers of emergency services to have today an application allowing them to anticipate the arrivals due to the winter viral epidemics, we proposed a set of indicators, statistical at the beginning then topological and extracted the diagnostic codes impacting most the organization of the services. The PREDAFLU application which is also the name of the project granted by the Ministry of Health under the PREPS-DGOS funding, is the result of this work.

Quotidiennement, et c'est une réalité que chacun perçoit, les services d'accueil des urgences sont confrontés à des flux d'arrivée de patients qui par leurs natures, peuvent provoquer un encombrement ou une tension. C'est souvent le cas pour les épidémies dites saisonnières. Même si les systèmes d'information qui équipent les services intègrent de plus en plus des indicateurs d'aide à la décision, peu d'efforts ont été menés pour donner un suivi, éventuellement prédictif, de ces flux particuliers et encore moins pour proposer des indicateurs précoces images d'un début de dérive du système. L'outil opérationnel succinctement décrit dans ce papier, permet le pilotage d'un service d'urgences pédiatriques pour les épidémies virales dues au Virus Respiratoire Syncytial (VRS) et de l'Influenza (grippe) et donne une alerte préventive pour les flux d'entrées adultes pour les complications cardio-respiratoires identifiées comme symptômes de l'infection des virus précédemment cités.

1 Un outil statistique simple

Construire un détecteur précoce de venues massives aux urgences peut s'apparenter à la problématique du *change point detection*. Si l'on considère que les admissions aux urgences sont un phénomène prédictible la plupart du temps, lors d'une épidémie, les venues deviennent non-prédictibles et un phénomène anormal apparaît. La détection de cette anomalie repré-

sente le changement d'état du phénomène associé aux arrivées des patients et caractérise le début d'une épidémie. C'est à partir de ce constat que nous avons donc appliqué des méthodes existantes pour la détection de changement d'état. En particulier, la méthode dite du *Serfling* est une méthode employée par les organismes de surveillance sanitaire depuis quelques années maintenant. Il s'agit d'approximer par un processus multipériodique le flux d'admissions aux urgences des patients avec l'idée de capturer la périodicité et les variations haute fréquence sans pouvoir capturer le côté outlier dans les données qui représente l'aspect non-prédictif de l'épidémie. Ainsi, le modèle paramétrique obtenu est comparé à la courbe réelle des admissions. Lorsque la courbe réelle dépasse celle du modèle, il est considéré que l'épidémie débute. Le modèle sinusoïdal multipériodique utilisée est le suivant

$$\hat{x}(t) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t + \hat{\beta}_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} t\right) + \dots + \hat{\beta}_{n_p+2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{n_p}} t\right).$$

Dans [1] est discuté de l'estimation des différents paramètres du modèle. Cette procédure généralement employée pour des données hebdomadaires ne peut s'appliquer aux admissions aux urgences sur la base de données quotidiennes dues à de trop fortes variations des admissions. Nous avons donc proposé d'améliorer la détection en analysant statistiquement la série des erreurs de prédiction du modèle. L'indicateur statistique largement employé en maintenance prédictive sur les machines tour-

nantes est le kurtosis. Nous avons alors mis en place un détecteur basé sur l'évolution du kurtosis des erreurs de prédiction. Les résultats sont exposés dans [1]. Ci-après en Figure 1, une image du fonctionnement global du détecteur ainsi qu'une image montrant le retard d'activation du plan hivernal des urgences pédiatriques du CHU de Saint-Etienne par rapport à la détection faite par l'outil statistique. Sur cet exemple, l'outil n'était pas encore mis en place. En se positionnant du côté temps réel et opérationnel, on peut notamment s'apercevoir que l'activation du plan hivernal par la direction du CHU a été donnée presque 3 semaines après la détection, alors même que l'affluence aux urgences était en diminution et que l'épidémie était proche de sa fin.

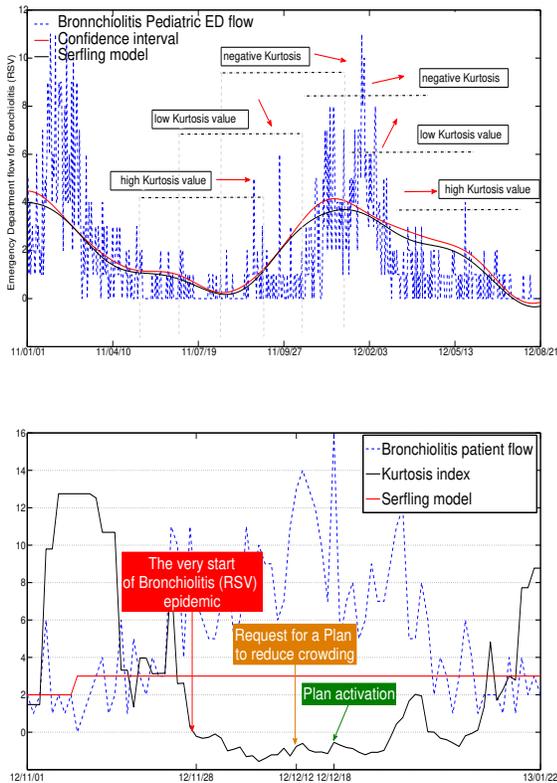


FIGURE 1 – En haut, la figure explicative du fonctionnement du kurtosis sur le flux d'arrivées des patients avec diagnostic de bronchiolite sur 1 année. En bas, illustration de l'intérêt de l'indicateur de kurtosis pour la mise en place du plan hivernal en pédiatrie.

Ces résultats positifs nous ont ensuite amenés à modéliser plus finement ce processus d'admissions. Nous nous sommes par conséquent tournés vers des éléments théoriques sur les processus périodiquement corrélés, menant doucement à la théorie de la dilatation des opérateurs. Ainsi, les travaux théoriques de [2], [3] ont permis d'élaborer un nouvel indicateur précoce basé sur la topologie des processus.

2 Topologie de séries temporelles

L'objectif étant d'améliorer la détection précoce de venues massives aux urgences, ici pédiatriques, afin d'améliorer la mise en place du plan hivernal défini par l'ARS, nous avons cherché comment la description de la non-stationnarité périodique obtenue dans [2], [3] pouvait nous y amener. L'idée a été de trouver la distorsion de la non-stationnarité périodique du flux de patients à appliquer afin que le départ à la non-stationnarité soit le plus marqué. Cela a fait objet de la publication [4]. Un nouveau détecteur est ainsi né et est basé sur les étapes décrites ci-après.

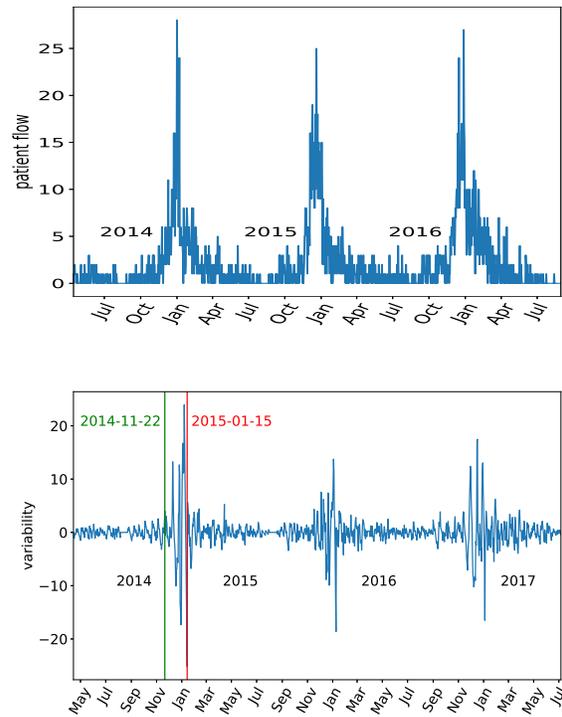


FIGURE 2 – En haut, flux d'admissions pour les patients diagnostiqués bronchiolite pendant 3 années. En bas représentation d'un exemple de la variabilité des admissions dont la valeur moyenne est nulle.

Distordre la non-stationnarité périodique du flux de patients a été possible grâce à une technique employée pour l'analyse auto-similaire des processus, la Detrended Fluctuation Analysis (DFA) [4], [5]. Cette technique nous permet d'extraire la non-stationnarité périodique et d'en contrôler la distorsion, *i.e.* l'amplitude, et la durée des fortes variabilités. Un exemple est donné par la Figure 2 où en haut un flux d'admissions aux urgences pédiatriques pour symptômes de bronchiolite est affiché et en bas figure l'extraction de la non-stationnarité périodique. Pour créer le nouveau détecteur, nous avons approximé la trajectoire dynamique de l'extraction de la non-stationnarité (Figure 2) par une intégration de type Hankel [6]. Chacune des colonnes de la matrice ainsi obtenue est alors associée à un point dans un espace euclidien. La collection des points forme

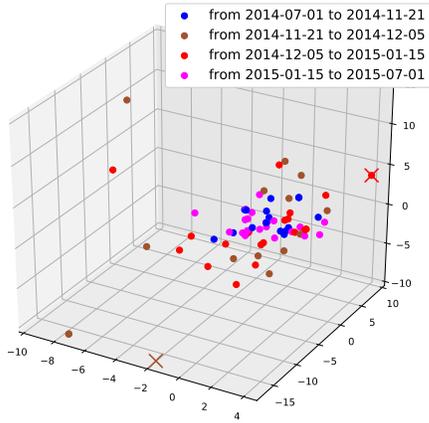


FIGURE 3 – Trajectoire échantillonnée dans \mathbb{R}^3 de la non-stationnarité périodique de la Figure 2.

un nuage de points, représentatifs de la trajectoire. Pour une fenêtre glissante de 3 échantillons, nous avons tracé la trajectoire échantillonnée obtenue (Fig. 3). Sur ce graphique, nous avons coloré quatre périodes pour mettre en évidence des faits majeurs. En particulier, les périodes du 2014-07-01 au 2014-11-21 et du 2015-01-15 au 2015-07-01 présentent des points ayant le même comportement. Ils sont concentrés à l'intérieur d'une boule et semblent tous être presque également espacés. Ceci est vraiment intéressant car ces deux périodes sont associées à des faibles arrivées aux urgences et il n'y a pas d'épidémie de VRS à cette époque. Au contraire, pour la période du 2014-11-21 au 2014-12-05, les points ne sont plus également espacés mais ils s'étalent dans l'espace. Cette période représente le début de l'épidémie de VRS et correspond alors à des arrivées anormalement élevées aux urgences. Pour la dernière période, qui a débuté le 2014-12-05 et s'est terminée le 2015-01-15, certains des points ont des coordonnées élevées et d'autres sont concentrés à l'intérieur d'une boule aux coordonnées faibles. Cette période correspond à la diminution de l'épidémie et indique donc une diminution des admissions aux urgences. De cette représentation nous pouvons donc envisager la détection du début de l'épidémie.

Pour ce faire, nous avons en temps réel caractérisé la topologie de ce nuage de points par l'homologie persistante et déterminer un indicateur principal $\text{Bar}_{\max}(k) = \max_{\mathcal{D}_k} \{l_i\}$, $i = 1, \dots, N_{p_k}$ où $l_j = y_j - x_j$ représente la durée de vie dans le diagramme de persistance et N_{p_k} le nombre de points du nuage à l'instant temporel d'évaluation k [4] et $\mathcal{D}_k = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N_{p_k}}$ représente le diagramme de persistance calculé à l'instant k . Nous avons appliqué cet indicateur sur le flux de patients des urgences et confronté ses performances par rapport à quelques méthodes largement plébiscitées dans le domaine de la produc-

tion de soins ou de biens manufacturiers. Les résultats de [4] permettent d'apprécier les très bonnes performances de l'indicateur que nous proposons relativement aux performances des autres méthodes.

Le gain apporté par ce nouvel indicateur est pluriel. D'une part il a une plus grande précocité que l'indicateur initialement proposé (Détection par le kurtosis) et d'autre part il fournit une alarme unique ne laissant aucune ambiguïté dans la prise de décision.

3 Clustering de séries temporelles

Même si les diagnostics cliniques, conséquence d'un virus respiratoire, sont relativement bien documentés dans la littérature médicale, l'engorgement dans les services d'accueil des urgences peut être dû à l'adjonction d'autres pathologies ou d'autres virus moins recherchés. Il est également bien documenté [7] que les virus respiratoires hivernaux (ou du moins jusqu'en 2020 et anté-COVID-19) impactent fortement le service d'accueil des urgences adultes avec une augmentation très nette de la durée moyenne de séjour pour une partie de la population. A la différence de l'enfant, la charge virale chez l'adulte est moindre ou plus délicate à détecter par de simples tests virologiques. De plus, les tests virologiques systématiques ont un coût important que l'hôpital ne peut prendre en charge. Seuls les patients hospitalisés sont testés afin d'éviter d'éventuelles contagions. Enfin, les laboratoires rendent leurs résultats disponibles de manière hebdomadaire ne permettant pas réellement d'avoir une surveillance fine. L'image de la présence virale donnée par la virologie n'est donc pas une image exacte de la présence des virus et ne permet pas d'identifier les patients dont les diagnostics peuvent correspondre à une conséquence de l'infection virale. Il faut pouvoir extraire de l'ensemble des données d'entrées, le flux de patients impactant le plus l'organisation des urgences adultes lors de la présence des virus hivernaux.

Afin d'être précoce dans la détection de venues anormales aux urgences adultes, une hypothèse soutenue par les urgentistes pédiatriques est que l'infection virale chez l'enfant et notamment celle du VRS, intervient en amont des contaminations chez l'adulte. Or la détection virale chez l'enfant est bien plus simple et moins coûteuse.

À partir des données d'entrées, nous disposons d'une base de multiples séries temporelles associées chacune à un code diagnostic. Lorsqu'un patient arrive, le médecin référence dans son dossier médical généralement un diagnostic principal et deux ou trois autres diagnostics secondaires. De même, nous disposons de séries temporelles associées à la détection du virus chez un enfant testé.

L'idée revient alors à utiliser l'information virale obtenue par test chez l'enfant comme une information non négligeable à utiliser pour l'adulte [7]. Parmi toutes les approches possibles, l'approche par clustering des séries temporelles a été adoptée.

Elle permet facilement de se servir des séries temporelles des virus comme attracteur pour les séries temporelles associées aux codes diagnostics des adultes.

Les enjeux soulevés par cette approche se concentrent sur le choix de l'espace de représentation des séries temporelles et la modification des méthodes de clustering pour s'adapter à l'espace de représentation, *i.e.* la caractérisation des distances à utiliser sur ces espaces pour le clustering [6], [8]. Une fois les codes diagnostics obtenus, il ne reste plus qu'à construire le flux de patients associé et à le surveiller. L'injection des séries temporelles sur l'espace de Stiefel associé à l'algorithme HDBSCAN modifié pour vivre sur cet espace, est le paradigme qui a donné les meilleurs résultats [6].

4 L'application PREDAFLU

Toutes ces méthodes de suivi, prédiction et d'aide à la décision ont été implémentées dans une application web dédiée <http://predafllu.chu-st-etienne.fr> (Figure 4) et aujourd'hui utilisée par les CHU de Saint-Etienne, Grenoble et Genève.

Références

- [1] G. BOULEUX, E. MARCON et O. MORY, "Early Index for Detection of Pediatric Emergency Department Crowding," *Biomed. Heal. Informatics, IEEE J.*, t. 19, n° 6, p. 1929-1936, 2015.
- [2] M. DUGAST, G. BOULEUX et E. MARCON, "Representation and characterization of nonstationary processes by dilation operators and induced shape space manifolds," *Entropy*, t. 20, n° 9, p. 717, 2018.
- [3] G. BOULEUX, M. DUGAST et E. MARCON, "Information Topological Characterization of Periodically Correlated Processes by Dilation Operators," *IEEE Trans. Inf. Theory*, t. 65, n° 10, p. 6484-6495, 2019.
- [4] M. DUGAST, G. BOULEUX, O. MORY et E. MARCON, "Improving Health Care Management Through Persistent Homology of Time-Varying Variability of Emergency Department Patient Flow," *Biomed. Heal. Informatics, IEEE J.*, t. 23, n° 5, p. 2174-2181, 2019.
- [5] S. A. EMINE, G. BOULEUX, H. HAUBA et E. MARCON, "Emergency Department Overcrowding Detection by a Multifractal Analysis," in *IFAC Symp. Biol. Med. Syst.*, t. 51, Sao paulo, 2018, p. 104-109.
- [6] C. PÉALAT, G. BOULEUX et V. CHEUTET, "Improved time series clustering based on new geometric frameworks," *Pattern Recognit.*, p. 108 423, nov. 2021.
- [7] B. MOREL, G. BOULEUX, A. VIALON et al., "Evaluating the Increased Burden of Cardiorespiratory Illness Visits to Adult Emergency Departments During Flu and Bronchiolitis Outbreaks in the Pediatric Population : Retrospective Multicentric Time Series Analysis," *JMIR Public Heal. Surveill.*, t. 8, n° 3, e25532, mars 2022.

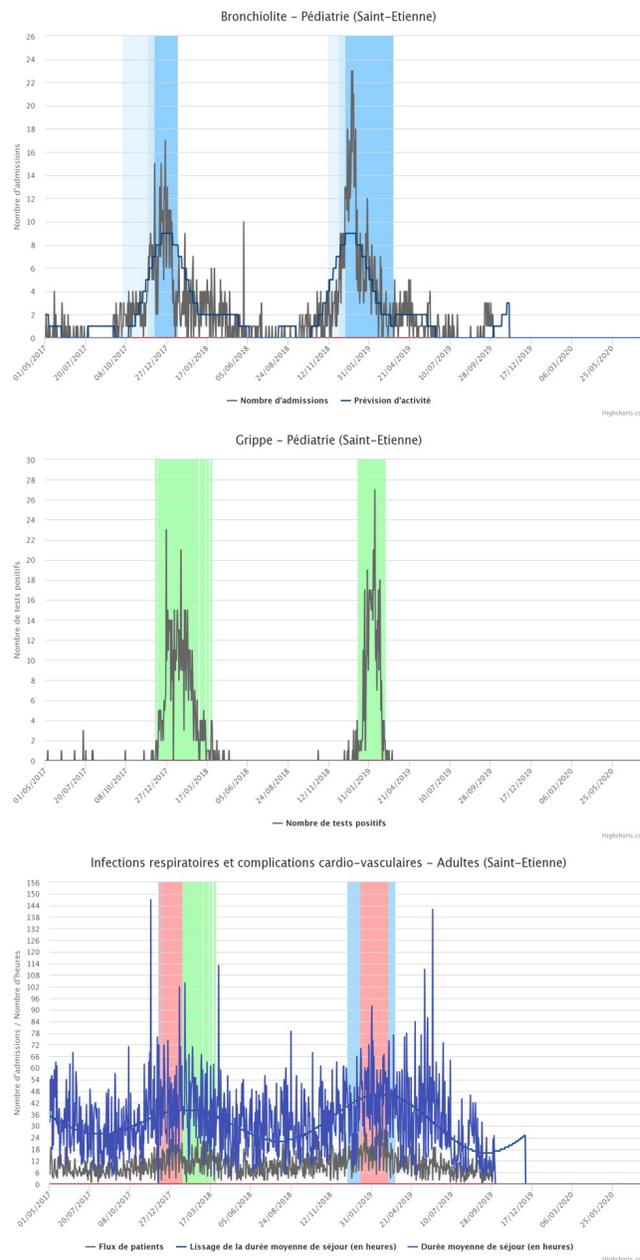


FIGURE 4 – Images du tableau de bord de l'application PREDAFLU. En haut, flux quotidien des patients diagnostiqués bronchiolite, avec la prédiction, et les 3 niveaux d'alertes. Au milieu, tests quotidiens positifs à l'Influenza (grippe) avec la détection en vert. En bas, représentation du flux quotidien de patients adultes de plus de 60 ans pour les pathologies déterminées par les algorithmes de clustering.

- [8] C. PÉALAT, G. BOULEUX et V. CHEUTET, "Using a manifold-based approach to extract clinical codes associated with winter respiratory viruses at an emergency department," *Heal. Care Manag. Sci. Springer*, submitted, 2022.