

Habituation à la ventilation non invasive diagnostiquée par diagrammes de récurrences et entropies de Shannon

H. Rabarimanantsoa¹, C. Letellier¹, L. Achour², A. Cuvelier³, & J.-F. Muir³

¹ CORIA UMR 6614 — Université de Rouen, BP. 12, 76801 Saint-Etienne du Rouvray cedex

² ADIR Association — GRHV UPRES EA, Université de Rouen

³ Service de Pneumologie — CHU de Rouen

rabari@coria.fr

Résumé. Introduits pour visualiser les propriétés de récurrences des systèmes dynamiques, les diagrammes de récurrences sont communément interprétés par des indices statistiques. Parmi ceux-ci, l'entropie de Shannon dont une nouvelle définition a été donnée récemment afin qu'elle soit corrélée au plus grand exposant de Lyapunov, nous permet de quantifier objectivement la qualité mécanique des interactions patient-ventilateur lors d'une ventilation non invasive. Deux entropies de Shannon — S_P et S_T — respectivement calculées à partir de la pression aérienne et de la durée des cycles ventilatoires issus du circuit de ventilation ont permis de quantifier le taux d'asynchronismes patient-ventilateur et la variabilité respiratoire du patient. En traçant une carte définie sur ces deux entropies, il est alors possible de suivre l'habituation des patients lors des séances de ventilation et/ou de modifier les réglages du ventilateur jusqu'à l'obtention d'une qualité optimale des interactions patients-ventilateur, c'est-à-dire qu'il atteigne la zone optimale de la carte définie par deux entropies inférieures à 1, ce qui correspond à moins de 10% d'asynchronismes et une faible variabilité respiratoire.

Abstract. Introduced to visualize the recurrence properties of dynamical systems, the recurrence plots are usually interpreted by statistical measures. Among them, the Shannon entropy for which a new definition has been recently given to make it correlated with the largest Lyapunov exponent, allows us to quantify objectively the mechanical quality of patient-ventilator interactions during noninvasive ventilation. Two Shannon entropies — S_P et S_T — computed from the airway pressure and from the total duration of ventilatory cycles allow to quantify the rate of patient-ventilator asynchronisms and the patient respiratory variability, respectively. By tracing a map based on these two entropies, it is possible to follow patients' training during noninvasive ventilation and to modify the ventilator settings in order to reach the optimal zone of the map defined by the two entropies less than 1, that corresponds to a rate of asynchronisms less than 10% and a low respiratory variability.

1 Introduction

Une dynamique chaotique est une dynamique déterministe présentant des oscillations avec des fluctuations impossibles à prévoir à long terme. Pourtant, la trajectoire représentative d'une telle dynamique chaotique est bornée dans l'espace des phases, c'est-à-dire que, bien que ne se répétant jamais égale à elle-même, elle reste dans un domaine bien délimité de l'espace des phases. De ce fait, un comportement chaotique présente nécessairement des propriétés de récurrences — non triviales — qui permettent à la trajectoire de décrire des objets complexes mais structurés. Les diagrammes de récurrences ont été introduits par Eckmann, Kamphorst et Ruelle [1] pour étudier ces propriétés de récurrence. Ils se définissent comme une matrice carrée R_{ij} construite comme suit. Il est regardé si chaque point de la trajectoire $\{x_i\}_{i=1}^N$ est proche ou non d'un autre point x_j . Si la distance entre deux points est inférieure à un seuil prédéfini ϵ , les points sont dits récurrents et sont associés à un point noir ; dans le cas contraire, ils sont non récurrents et sont associés à un point blanc. Ceci se traduit par une matrice $N \times N$ telle que

$$R_{ij} = \theta(\epsilon - \|x_i - x_j\|) \quad (1)$$

où $\theta(x_i)$ est la fonction de Heaviside.

Dans cette étude, l'entropie de Shannon (indice statistique des diagrammes de récurrences) sera utilisée pour quantifier les interactions patient-ventilateur en ventilation non invasive et pour suivre l'habituation des patients à leur ventilation.

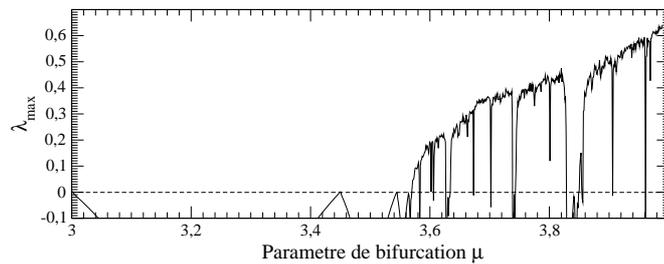
2 Diagrammes de récurrences et entropie de Shannon

De manière générale, l'entropie de Shannon se définit comme :

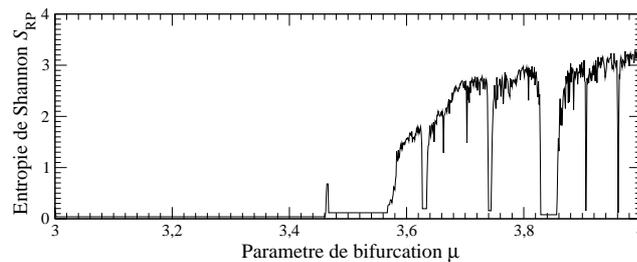
$$S = - \sum_{n=1}^N P_n \log(P_n) \quad (2)$$

où P_n désigne la probabilité d'observation d'un évènement n et N représente le nombre d'évènements différents considérés.

Par définition, une entropie quantifie le degré d'information apporté par le système, c'est-à-dire le degré de complexité de la dynamique. C'est pourquoi la conjecture de Pesin affirme que l'entropie de Kolmogorov doit croître au fur et à mesure que le comportement chaotique se développe. Dans les travaux précédents [2] utilisant l'entropie de Shannon, l'évènement n désigne un segment diagonal de n points récurrents. L'entropie ainsi définie quantifie le degré de récurrence —de périodicité— et non de complexité. Aussi, cette entropie est inversement proportionnelle au plus grand exposant de Lyapunov, puisque ce dernier est une bonne estimation de la complexité du système. Cette définition de l'entropie de Shannon est donc contraire à son sens usuel et ne vérifie pas la conjecture de Pesin. Pour pallier à ce désaccord, une nouvelle définition de l'entropie de Shannon a récemment été proposée [3] : il suffit de remplacer la probabilité d'observer des segments diagonaux de points récurrents par la probabilité d'observer des segments diagonaux de points **non** récurrents. L'entropie de Shannon ainsi redéfinie croît alors au fur et à mesure que la dynamique se développe comme cela est attendu (Fig. 1). La robustesse du calcul de l'entropie de Shannon est équivalente à celle du calcul du plus grand exposant de Lyapunov [3].



(a) Plus grand exposant de Lyapunov



(b) Entropie de Shannon redéfinie

Fig.1. Evolutions corrélées du plus grand exposant de Lyapunov λ_{max} et de l'entropie de Shannon S_{RP} en fonction du paramètre μ de la fonction logistique.

3 Applications à la ventilation non invasive.

La ventilation non invasive est aujourd'hui un moyen de traitement efficace pour soulager l'insuffisance respiratoire [4]. Elle consiste à apposer un masque au visage du patient et à lui relier un ventilateur qui lui

insufflera de l'air à chacun de ses efforts inspiratoires. Cependant, il arrive que le ventilateur ne réponde pas de façon adéquate à la demande du patient ; dans ce cas, nous sommes en présence d'asynchronismes et cela peut être néfaste au patient. Puisque le patient est au repos durant sa séance de ventilation, il doit respirer régulièrement, son besoin en oxygène étant constant. Des fluctuations du rythme respiratoire reflètent donc un conflit entre le patient et le ventilateur, traduisant un certain inconfort du patient. Le taux d'asynchronismes et la variabilité respiratoire sont donc essentiels pour la quantification de la nature des interactions patient-ventilateur dont dépend le succès de la ventilation.

L'asynchronisme le plus rencontré est le non déclenchement du ventilateur suite à un effort inspiratoire du patient. Il est reconnaissable à partir de données non invasives (débit et pression) issues du circuit de ventilation (Fig. 2a). Lors d'un cycle normal le ventilateur se déclenche et la pression au sein du circuit de ventilation atteint une valeur de pression inspiratoire pré-réglée (IPAP) tandis que lors d'un cycle non déclenché, la pression reste à la valeur de la pression expiratoire pré-réglée (PEEP) (Fig. 2b). Puisque la valeur de la pression détermine si le cycle est déclenché ou non, les diagrammes de récurrences à partir des maxima de pression atteintes au cours de chaque cycle servent à calculer une première entropie de Shannon, notée S_P . D'autre part, puisque la variabilité respiratoire joue un rôle important dans le confort du patient, les diagrammes de récurrences à partir de la durée totale de chaque cycle respiratoire servent à calculer une seconde entropie de Shannon, notée S_T . Le choix de ces deux variables — les maxima de pression et les durées totales des cycles respiratoires —, est d'autant plus pertinent puisqu'il a été montré qu'une estimation de l'entropie de Shannon à partir de variables discrètes (applications de premier retour à une section de Poincaré) est plus probante qu'une estimation à partir de variables continues (séries temporelles) [3].

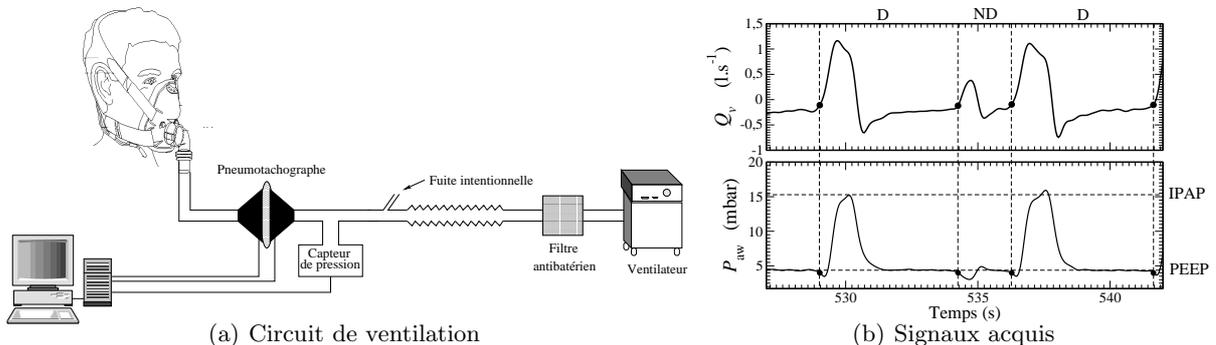
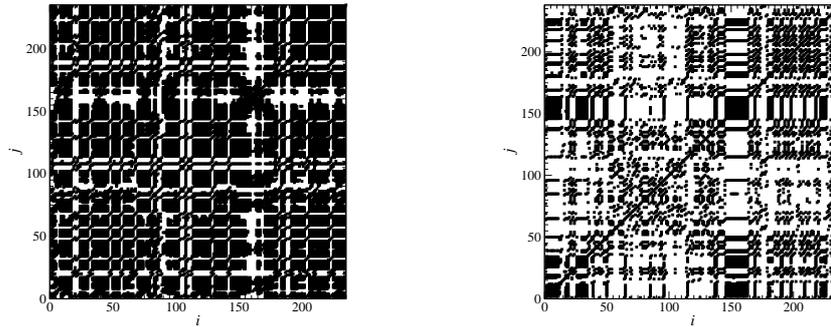


Fig.2. Les évolutions de débit et de pression (b) sont respectivement obtenues par le pneumotachographe et le capteur de pression insérés au sein du circuit de ventilation (a) dans le cas d'une ventilation à deux niveaux de pression (IPAP=16mbar et PEEP=4mbar). Présence d'un cycle non déclenché (ND) entre deux cycles déclenchés (D).

Un premier protocole d'étude a été réalisé [5] ; il impliquait douze sujets dont quatre patients souffraient d'une Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive (P_1 à P_4), quatre patients avaient un Syndrome d'Obésité Hypoventilation (P_5 à P_8) et les quatre derniers sujets étaient sains (S_9 à S_{12}). Chaque sujet était ventilé durant six séances avec une pression inspiratoire variant de 10 à 20 mbar, par palier de 2 mbar. Les entropies S_P à partir des maxima de pression et S_T à partir des durées totales des cycles respiratoires étaient ensuite calculées pour chaque séance.

Sur les 69 enregistrements de notre protocole, l'entropie de Shannon S_P s'est trouvée fortement corrélée au taux d'asynchronismes avec un coefficient de corrélation égal à 0,92. L'entropie de Shannon S_P estimée à partir des maxima de pression est donc un excellent quantificateur du taux d'asynchronismes [6].

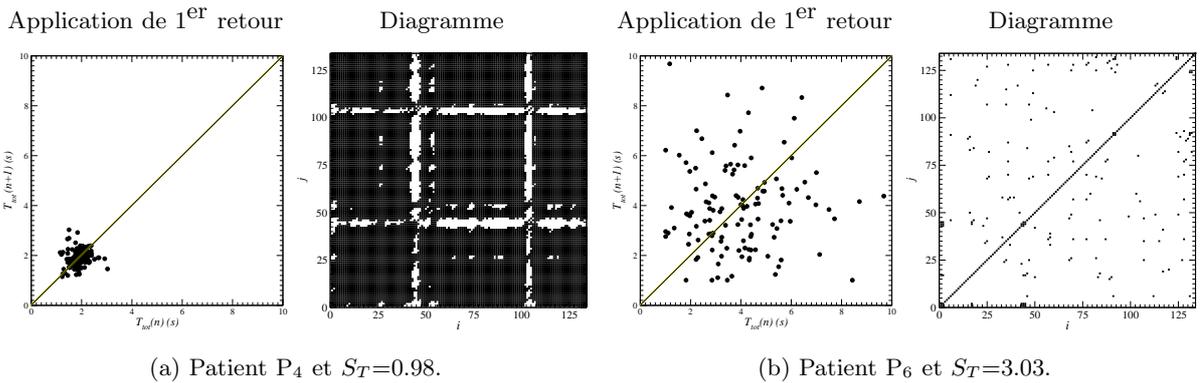
A partir des applications de premier retour sur la durée totale des cycles respiratoires (Fig. 4), il est facile de distinguer les deux cas : une variabilité respiratoire faible (Fig. 4a) et une variabilité respiratoire



(a) IPAP=10 mbar, ND=8%, $S_P = 0,91$ (b) IPAP=16 mbar, ND=31%, $S_P = 2,18$

Fig.3. Diagrammes de récurrences obtenus à partir des maxima de la pression aérienne pendant les cycles respiratoires enregistrés sur le patient P_5 souffrant d'un Syndrome d'Obésité Hypoventilation (pour deux niveaux d'IPAP différents). Plus le taux d'asynchronismes (ND) est élevé, plus le diagramme de récurrences présente de larges zones noires et plus l'entropie de Shannon S_P est élevée.

forte (Fig. 4b). Les diagrammes de récurrences construits sur la durée des cycles respiratoires qui leurs sont associés reflètent également ce constat (Fig. 4). L'entropie de Shannon S_T permet donc de quantifier la variabilité respiratoire (Fig. 4).



(a) Patient P_4 et $S_T=0.98$.

(b) Patient P_6 et $S_T=3.03$.

Fig.4. Exemple du suivi de la régularité du cycle respiratoire pour un patient souffrant de Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive, P_4 , et d'un patient atteint de Syndrome d'Obésité Hypoventilation, P_6 . Les diagrammes de récurrences et l'entropie de Shannon S_T permettent de distinguer clairement la variabilité respiratoire (IPAP=16 mbar).

Ainsi, les entropies de Shannon S_P et S_T permettent de quantifier deux aspects des interactions patient-ventilateur : quantification du taux d'asynchronismes, et quantification de la variabilité respiratoire. Nous considérerons par la suite qu'une entropie de Shannon S_P inférieure à 1 correspond à un faible taux d'asynchronismes (<10%) et une entropie de Shannon S_T inférieure à 1 signifie une faible variabilité respiratoire.

4 Habitude à la ventilation non invasive

A partir des 69 enregistrements du protocole, les entropies S_T sont tracés en fonction des entropies S_P , conduisant à une carte reflétant les interactions patient-ventilateur (Fig. 5) [6,7].

Typiquement, quatre zones correspondant à quatre types d'interactions patient-ventilateur sont distinguées sur la carte. La première zone est celle définie par $S_P < 1$ et $S_T < 1$: ce sont des patients qui sont synchronisés au ventilateur et qui respirent régulièrement. C'est donc la zone où les interactions patient-ventilateur sont optimales. La seconde zone correspond à $S_P > 1$ et $S_T < 1$: les patients maintiennent leur rythme respiratoire régulier quel que soit le taux d'asynchronismes. Le patient respire à son rythme sans se préoccuper du déclenchement (ou non) du ventilateur. La troisième zone est définie par $S_P < 1$ et $S_T > 1$: ce sont des patients qui acceptent mal leur ventilateur malgré un déclenchement relativement correct du ventilateur. Ces patients ne sont pas habitués à la ventilation ou ils sont "stressés". Enfin la quatrième zone est définie par $S_T > 1$ et $S_T > 1$: les patients ont à la fois une grande variabilité respiratoire et un taux élevé d'asynchronismes. Ces patients ne sont pas habitués à la ventilation ou les réglages du ventilateur ne leur conviennent pas. Cette dernière zone est la plus critique pour le patient car la qualité mécanique de la ventilation est très mauvaise. Cette carte permet de suivre l'adéquation des paramètres pour les différentes séances de ventilation et de modifier les réglages du ventilateur afin que le patient atteigne la zone optimale.

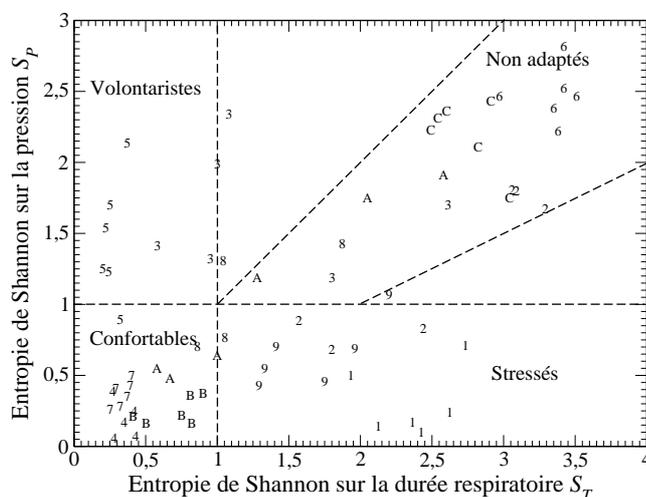


Fig.5. Entropie de Shannon S_P en fonction de l'entropie de Shannon S_T pour les 69 enregistrements du protocole. Les indices i (i de $[1 ; 9]$) désignent le sujet P_i pour les 6 valeurs d'IPAP. Les lettres A,B et C désignent respectivement les sujets S_{10} , S_{11} et S_{12} .

Le phénomène d'habitude peut également être mis en évidence avec notre carte. Pour cela quatre sujets sains novices sont ventilés une fois par semaine, en gardant constant les réglages du ventilateur. Au fur et à mesure des séances d'habitude, le chemin suivi sur la carte est différent pour chaque sujet (Fig. 6). Le premier sujet S_1 n'atteint jamais la zone optimale en dépit des six séances d'habitude. Le sujet S_2 est situé directement dans la zone optimale dès la première séance et reste dans cette zone les séances suivantes. Les sujets S_3 et S_4 sont les cas les plus "intéressants" car, au fur et à mesure des séances, leur interaction avec le ventilateur s'améliore jusqu'à atteindre la zone optimale. Ces quatre exemples montrent qu'il existe une habitude à la ventilation non invasive, dépendant non seulement de la physiologie mais aussi de la psychologie (volonté de la personne). En effet, comme ce sont des sujets sains, la maladie ne peut expliquer l'inadéquation au ventilateur (cas du sujet S_1).

5 Conclusion

Les diagrammes de récurrences peuvent être utilisés pour caractériser les propriétés de récurrence dans les systèmes dynamiques, particulièrement dans le domaine de la biomédecine. Une nouvelle définition de

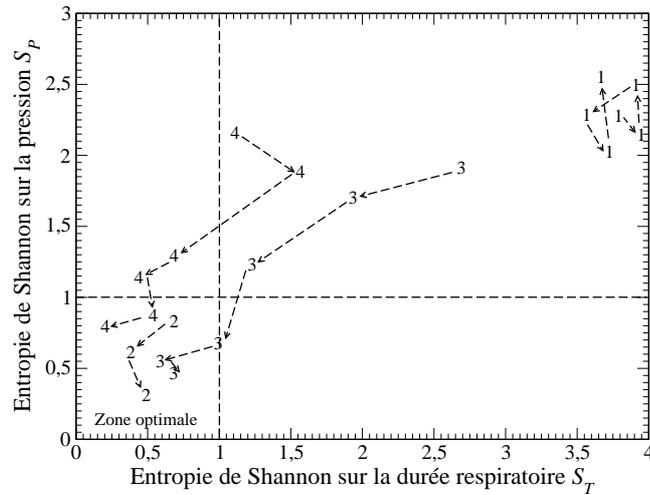


Fig.6. Entropie de Shannon S_P en fonction de l'entropie de Shannon S_T pour quatre sujets sains novices. Les indices i (i de $[1 ; 4]$) désignent le sujet S_i . Les flèches indiquent le passage d'une séance d'habituatation à la suivante. L'habituatation du sujet S_3 et S_4 est bien observée.

l'entropie de Shannon a été utilisée pour qu'elle puisse croître lorsque le chaos se développe, comme le suggère la conjecture de Pesin. En ventilation non invasive (traitement de l'insuffisance respiratoire), nous avons montré que cette approche offrait une caractérisation de la dynamique des interactions patient-ventilateur. En effet, la présence des asynchronismes et la variabilité du rythme respiratoire peuvent ainsi être finement suivies grâce à deux entropies de Shannon. A partir d'une carte définie par ces entropies, les médecins pneumologues possèdent maintenant des quantificateurs précis qui leur permettent d'ajuster les réglages du ventilateur et de mieux entraîner leur patient par le suivi du phénomène d'habituatation.

Remerciements

La bourse de thèse de H. Rabarimanantsoa est financée par ADIR Association.

Références

1. J.-P. ECKMANN, S. OLIFFSON KAMPHORST & D. RUELLE, Recurrence Plots of Dynamical Systems, *Europhysics Letters*, **4**, 973-977, 1987.
2. L. L. TRULLA, A. GIULIANI, J. P. ZBILUT & C. L. WEBBER JR., Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients, *Physics Letters A*, **223** (4), 255-260, 1996.
3. C. LETELLIER, Estimating the Shannon entropy : recurrence plots versus symbolic dynamics, *Physical Review Letters*, **96**, 254102, 2006.
4. M. VITACCA, F. RUBINI, K. FOLIO, S. SCALVINI, S.NAVA & N. AMBROSINO, Non invasive modalities of positive pressure ventilation improve the outcome of acute exarcebations in COLD patients. *Intensive Care in Medicine*, **19**, 450-455, 1993.
5. L. ACHOUR, C. LETELLIER, A. CUVELIER, E. VÉRIN, J.F. MUIR, Asynchrony and cyclic variability in pressure support noninvasive ventilation, *Computers in Biology and Medicine*, **37**, 1308-1320, 2007.
6. H. RABARIMANANTSOA, L.ACHOUR, C. LETELLIER, A. CUVELIER & J.F. MUIR, Recurrence plots and Shannon entropy for a dynamical analysis of asynchronisms in mechanical noninvasive ventilation, *Chaos*, **17**, 015113, 2007.
7. C. LETELLIER, H. RABARIMANANTSOA, L. ACHOUR, A. CUVELIER, J.F. MUIR, Recurrence plots for dynamical analysis of non-invasive mechanical ventilation, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **366**, 621-634, 2008.