

# Tribologie et dynamique non linéaire d'un contact. Application à la mesure des propriétés de surfaces fibreuses.

S. DIA, S. FONTAINE, M. RENNER

*Laboratoire de Physique et de Mécanique Textiles, EAC CNRS 7189, Ecole Nationale Supérieure  
d'Ingénieurs Sud Alsace - Université de Haute-Alsace, Mulhouse*

## Résumé :

*Ce travail concerne la Tribologie par l'analyse non linéaire du signal généré lors d'un contact dynamique sur surfaces textiles. Nous proposons un développement de l'analyse des résultats expérimentaux obtenus par un appareil développé et breveté au Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, nommé Modalsens. Notre contribution porte sur une analyse des résultats par des outils mathématiques fondés sur la dynamique non linéaire. L'objectif principal de ce travail est d'atteindre une signature dynamique de l'interaction dynamique Procédé de mesure / matériau évalué afin de dégager de nouveaux estimateurs tribologiques de surfaces complexes tels les textiles.*

## Abstract :

*This work concerns the Tribology by nonlinear analysis of the signal generated during a dynamic contact on textile surfaces. We propose a development and the analysis of experimental results obtained by a patented instrument, named Modalsens. Our contribution is focussed on the analysis of the results by mathematical tools based on nonlinear dynamics. The main objective of this work is to achieve a dynamic signature of the interaction between Modalsens and the material evaluated, in order to identify new tribological estimators of complex surfaces such textiles.*

**Mots clefs:** Tribologie, dynamique non linéaire, textiles

## 1. Introduction

Nombre de phénomènes non linéaires et difficilement prédictibles nous entourent. Ces types d'événement suivent néanmoins, s'ils sont déterministes, deux principes fondamentaux [1]: les situations dans lesquelles ils se produisent évoluent toujours de manière similaire et ces situations se sont déjà produites et se produiront encore. La nature hautement non linéaire de certains signaux dynamiques mesurés posent la question de la pertinence de l'utilisation des transformées de Fourier. En effet, ces opérations sont essentiellement destinés à l'analyse de phénomènes linéaires et occultent les informations non linéaires. C'est un peu comme si on essayait d'analyser un signal non linéaire en portant des lunettes qui filtrent tout ce qui n'est pas linéaire. Dès lors, il est naturel de se pencher sur les techniques de caractérisation de phénomènes en analyse vibratoire non linéaire. En 1890, Poincaré fut l'un des pionniers de l'analyse des phénomènes redondant en dynamique [2]. Il fallut attendre plus de 70 ans pour que ses observations puissent être étudiées avec des ordinateurs suffisamment puissants. Notre équipe a développé, au sein du LPMT, une méthode de mesure multidirectionnelle d'un état de surface, nommée Modalsens [3,4,5,6]. Cette méthode repose sur l'entrée en vibration d'une lame (précontrainte, encastrée-appuyée) dans ses modes propres lorsqu'elle frotte sur la surface analysée. Ce travail propose de dépasser l'analyse FFT du signal qui est un outil de la dynamique linéaire pour utiliser des outils de traitement de série de données permettant d'observer les espaces de phase via : des invariants traditionnels comme la dimension, l'exposant de Lyapunov, le diamètre de l'espace des phases ou encore l'entropie de Shannon et via des outils d'analyse de redondance des trajectoires de phase comme les «Recurrence Plots». En prenant pour base une population de surfaces textiles soigneusement choisie, les principaux résultats de ce travail ont pour objectif de dégager de nouveaux estimateurs pour la caractérisation de surfaces fibreuses.

## 2. Observations d'un espace des phases

### 2.1 D'un point de vue global, grâce à ses invariants

Lorsqu'un système dynamique, autonome ou non, évolue dans son espace des phases physique de dimension  $d$ , il est décrit par le vecteur  $s(t) = \{s_1, s_2, \dots, s_d\}$  à  $d$  coordonnées indépendantes. Chaque état du système à un instant donné est alors fonction des états précédents de sorte qu'il existe une fonction  $f_i$  telle que :  $\bar{s}_{t+1} = f_i(\bar{s}_t)$ . Dès lors, connaître  $f_i$  revient à construire les trajectoires du système dans son espace des phases de dimension  $d$ . Lorsqu'on regarde une série de données  $x(t)$  qui décrit un système dynamique  $\bar{s}$ , c'est comme si on regarde une projection du vecteur  $\bar{s}$  dans un espace à une dimension. Dans ce cas, une série de données temporelles est issue d'une transformation  $h$  (projection) telle que :

$$h : M^d \rightarrow \mathcal{R}^1 \quad (1)$$

$$\bar{s}_t \rightarrow x(t) = h(\bar{s}_t) \text{ pour } t = \{1 \dots N\}$$

Pour reconstruire l'espace des phases dans un espace de dimension  $d$ , à partir d'une série de données temporelles unique, on utilise la propriété montrée à l'équation 1 ci-dessus. En 1980, Packard et al [7] travaillèrent sur la reconstruction de l'espace des phases à partir de données temporelles discrètes de période d'échantillonnage  $t$  donnée. Ils partirent de l'idée qu'une série de données temporelle contient naturellement la dimension de l'espace de phases. Plus tard, le théorème de Takens (1981) [8] prouva qu'on peut reconstruire l'espace des phases grâce à une séquence d'observations des différents états d'un système dynamique et donc grâce à une série de données temporelles.

En connaissant la dimension de l'espace des phases  $d$  décrit par la série de données temporelle, il est dès lors possible de construire des vecteurs  $x_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau})$  représentant  $n$  séquences du signal qui permettent sa description. Les coordonnées de ces vecteurs sont « distantes » d'un temps  $\tau$  appelé *delay*, qui change selon la nature du signal analysé. Il est alors possible de décrire la série de donnée grâce à la matrice ci-dessous, à l'équation 4.

$$X = \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_0 & u_{0+\tau} & \dots & u_{(d-1)\tau} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_i & u_{i+\tau} & \dots & u_{i+(d-1)\tau} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n-1} & u_{n-1+\tau} & \dots & u_{n-1+(d-1)\tau} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Le *delay*  $\tau$  peut être, selon Takens, choisi arbitrairement lorsque les séries de données ne contiennent pas de bruit. Dans le cas de signaux réels, le choix de ce *delay* doit être fait de manière précautionneuse de manière à ce que chaque coordonnée garde son indépendance vis à vis de chacune des autres. Il en va d'ailleurs de même pour la détermination de la dimension  $d$  de l'espace des phases.

### Entropie de Shannon

Une série de données temporelles n'est autre qu'une succession d'états dont la progression peut être linéaire ou non. Shannon (1916 – 2001), inventa la notion d'entropie statistique appliquée à des séries de données. Cette fonction mathématique chiffre l'information contenue ou délivrée par une source. De manière très similaire à l'entropie thermodynamique, l'entropie de Shannon est définie pour une variable aléatoire  $X$  avec  $n$  réalisations possibles et se chiffre par :

$$H_b = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \ln P_i \text{ avec } P_i = P(X=X_i), i=\{1 \dots n\}. \quad (2)$$

L'approche statistique de Shannon permet de scinder en trois, les types de signaux susceptibles d'être étudiés : les signaux déterministes périodiques et linéaires dont l'entropie sera nulle. Ces signaux sont traditionnellement étudiés grâce aux outils de l'analyse linéaire (régression, analyse de Fourier...), les signaux déterministes mais non linéaires dans lesquelles des redondances existent mais sont distribuées de manières erratiques voire chaotiques (Ces signaux auront une entropie finie) et enfin, les signaux stochastiques, complètement non déterministes dont l'entropie sera infinie. Pour les deux premiers types de signaux, l'espace des phases se verra doté de trajectoires montrant des redondances et des confinements caractéristiques du fait de la dynamique du système étudié.

**Dimension de l'espace des phases**

La dimension de l'espace des phases est un des invariants les plus utilisés [9]. Elle chiffre le nombre de variables indépendantes nécessaire pour reconstituer et décrire pleinement l'évolution du système dynamique étudié. Cette valeur est toujours un entier. Pour déterminer la dimension d'un espace des phases d'un système dynamique non linéaire, la méthode du *false nearest neighbor* a été proposée par Kennel *et al* en (1992) [10]. Le principe de cette méthode est de vérifier si deux vecteurs  $x_i=(u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau})$  et  $x_j=(u_j, u_{j+\tau}, \dots, u_{j+(d-1)\tau})$  restent proches lorsqu'on leur rajoute une coordonnée, donc lorsqu'on passe d'une dimension d'observation  $d$  à  $d+1$ . Pour ce faire, Kennel *et al* définissent, à partir d'une série temporelle de points, la distance  $R_d(n, r)$  entre un vecteur  $x_i=(u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau})$  et son  $r^{\text{ième}}$  voisin  $x'_i=(u'_i, u'_{i+\tau}, \dots, u'_{i+(d-1)\tau})$  :

$$R_d^2(n, r) = \sum_{k=0}^{d-1} [u_{i+k\tau} - u'_{i+k\tau}]^2 \quad (3)$$

Lorsqu'on ajoute une coordonnée aux vecteurs  $x_i$  et  $x'_i$ , la variation de distance  $R_{d+1}(n, r) - R_d(n, r)$  est alors évaluée au regard de  $R_d(n, r)$ , via le ratio :

$$\left[ \frac{R_{d+1}^2(n, r) - R_d^2(n, r)}{R_d^2(n, r)} \right]^{1/2} = \frac{|u_{i+d\tau} - u'_{i+d\tau}|}{R_d(n, r)} > R_{tol} \quad (4)$$

Où  $R_{tol}$  est un seuil de tolérance à partir duquel on considère que la distance entre vecteurs  $x_i$  et  $x'_i$  a varié de manière significative lors du passage de la dimension  $d$  à  $d+1$  et sont donc considérés comme faux voisins dans l'espace de dimension  $d$ .

**Exposant de Lyapunov**

Les systèmes dynamiques dit chaotiques mais déterministes sont caractérisés par une sensibilité extrême à de petites variations de leurs conditions initiales. Le mathématicien Russe Alexander Lyapunov (1857-1918) introduisit la quantité dite de « l'exposant de Lyapunov ». Cet exposant vise à quantifier à quelle vitesse le comportement d'un système dynamique est susceptible de diverger selon les conditions initiales qu'on lui applique.

Soit un système dynamique dont le comportement est défini par une suite temporelle de points  $f(x_i)$   $\{i = 0..n\}$ . La fonction  $f$  est réputée dérivable. Ses conditions initiales sont définies par l'état  $x_0$ . Supposons maintenant qu'on fasse varier ces conditions initiales de  $e_0$ , de telle manière à ce que  $f(x_0)$  devienne  $f(x_0 + e_0)$ . Après  $(n+1)$  états successifs, la variation de l'état  $f(x_n)$  s'écrira  $f(x_n + e_n)$  de sorte que l'amplification des variations d'états entre  $x_0$  et  $x_n$  sera quantifié par le ratio :

$$\ln \left| \frac{e_n}{e_0} \right| = \ln \left( \left| \frac{e_n}{e_{n-1}} \right| \cdot \left| \frac{e_{n-1}}{e_{n-2}} \right| \dots \left| \frac{e_1}{e_0} \right| \right) = \sum_{i=1}^n \ln \left| \frac{e_i}{e_{i-1}} \right| \quad (5)$$

$$\text{Or } \left| \frac{e_i}{e_{i-1}} \right| = \left| \frac{f(x_{i-1} + e_{i-1}) - f(x_{i-1})}{e_{i-1}} \right| \xrightarrow{e_{i-1} \rightarrow 0} |f'(x_{i-1})| \quad (6)$$

On déduit l'exposant de Lyapunov comme la limite à l'infini de la moyenne arithmétique de la somme présentée à l'équation 6, ci-dessus :  $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln |f'(x_{i-1})| \right)$  (7)

Il est clair que si  $\lambda > 0$ , cela signifie que  $\ln |e_n/e_0| > 0$  et donc que  $|e_n/e_0| > 1$ . Dans ce cas, l'erreur initiale est amplifiée et le système sera très sensible à ses conditions initiales.

**2.2 D'un point de vue local, de part l'analyse de ses récurrences D'un point de vue local, de part l'analyse de ses récurrences**

Pour observer les trajectoires dans l'espace des phases à dimension  $d$ , tout en conservant la dynamique du système étudié, Eckmann *et al* (1987) [11] partirent du constat que les outils traditionnellement utilisés jusqu'alors, comme la dimension de l'espace des phases seule, l'entropie ou encore les exposants de

Lyapunov, portaient la limite de l'exclusive analyse de systèmes dynamiques autonomes ou dont les temps dynamiques caractéristiques doivent être largement plus faibles que la durée de la série temporelle analysée. S'appuyant alors sur le théorème de Takens, ils introduisirent les diagrammes de récurrence (Recurrence Plots ou RP) visant à révéler les récurrences dans les trajectoires de phases, c'est-à-dire les moments où une telle trajectoire visite la même zone de l'espace des phases. Lorsqu'on a reconstitué la matrice des coordonnées retardées, les récurrences dans l'espace des phases sont détectées par des comparaisons systématiques entre tous les couples de vecteurs  $x_i$  et  $x_j$ . Ces opérations de comparaisons se font par le biais de la fonction d'Heaviside de la manière suivante :

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \quad i, j \in \{0, \dots, n-1\} \tag{8}$$

Avec  $\varepsilon$ , la distance seuil qui caractérise l'étendue du voisinage entre deux vecteurs et  $\Theta(x)$ , la fonction d'Heaviside.

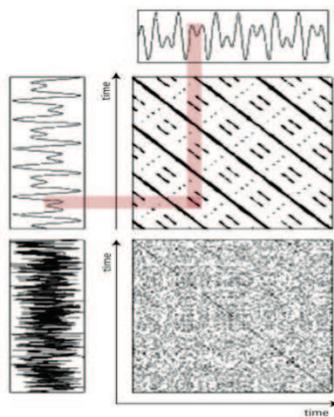


FIG.1 – Recurrence Plots, en bas signal aléatoire et en haut, signal périodique.

Cette opération revient à vérifier si les vecteurs  $x_i$  et  $x_j$  sont voisins, c'est-à-dire, s'ils sont confinés dans une boule de rayon  $\varepsilon$ . Si tel est le cas, la  $R_{i,j}$  prend la valeur 1 et 0 sinon. On construit alors une matrice binaire, symétrique, dite de récurrence. En règle générale, on représente graphiquement cette matrice en attribuant la couleur noire aux points valant 1, et 0 aux autres. On obtient ainsi un « recurrence plot » ou diagramme de récurrence dont les deux axes sont temporels. A titre d'exemple, la Figure 1 ci-contre illustre des exemples de diagrammes de récurrence obtenus sur des fonctions connues. On voit nettement apparaître des différences significatives. Les diagrammes de récurrence montrent donc des motifs, à petite et à grande échelle, très différents selon la nature des signaux analysés. Une première approche qualitative est nécessaire pour comprendre les signaux analysés. Dans le cas illustré, un signal aléatoire se traduit par un moucheté caractéristique de redondances aléatoires dans l'espace des phases. A contrario, l'organisation en diagonales est typique de signaux périodiques.

Lors de l'exploration des récurrences dans l'espace des phases d'un système déterministe non linéaire, des quantifications sont nécessaires pour pouvoir classer et comparer entre eux ces systèmes dynamiques complexes. Dans cette optique, les matrices de récurrences peuvent faire l'objet de traitements afin d'en extraire des paramètres dits de quantification des diagrammes de récurrence. De plus, des paramètres dits de Recurrence Quantification Analysis permettent de mettre des chiffres sur les observations qualitatives qu'on peut effectuer sur les diagrammes de récurrence (tableau 1).

| Recurrence Rate                             | Déterminisme   | Laminarité  | Trapping Time  |
|---|--|---|--|
| $RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}$ | $DET = \frac{\sum_{l=\min}^N l \cdot p(l)}{\sum_{l=1}^N l \cdot p(l)}$   | $LAM = \frac{\sum_{v=\min}^N v \cdot p(v)}{\sum_{v=1}^N v \cdot p(v)}$  | $TT = \frac{\sum_{v=\min}^N v \cdot p(v)}{\sum_{v=\min}^N p(v)}$ |
| Pourcentage de points récurrents            | Pourcentage de points récurrents disposés sur les diagonales. $p(l)$ est l'histogramme des longueurs $l$ des diagonales. | Pourcentage de points récurrents disposés sur les lignes verticales. $p(v)$ est l'histogramme des longueurs $v$ des verticales. | Longueur moyenne des lignes verticales.                          |

TAB.1 – Quatre paramètres de quantification des diagrammes de récurrences

### 3. Investigations expérimentales

#### Tribomètre Modalsens

Le principe de Modalsens repose sur un dispositif de type "lamelle - disque". Le matériau testé est placé sur un disque en rotation pendant qu'une lamelle précontrainte frotte sur sa surface (Figure 2). Lors du frottement, la lamelle est excitée et interagit avec la surface mesurée. Les vibrations non linéaires engendrées sont alors analysés dans leurs espaces des phases.

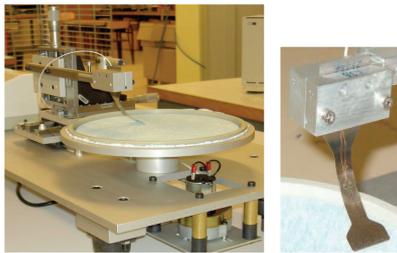


FIG. 2 – Dispositif Modalsens

### Surfaces mesurées

Les surfaces que nous avons choisies illustrent des familles d'assemblages fibreux ainsi que des familles de comportements de surface. En considérant les paramètres de structure et leurs origines, ces lots d'échantillons, au nombre de 17, se composent de tissus de différentes matières, de non-tissés de masses surfaciques différentes et de différentes matières, d'un tricot velours très pileux ainsi que de surfaces papetières. Les principales caractéristiques de certaines de ces surfaces sont listées dans le tableau 2 ci-dessous.

| Type de surface           | Nom            | Masse surfacique     | Composition                 |
|---------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|
| Feuilles de papier dessin | P90            | 90 g/m <sup>2</sup>  | 100% Cellulose              |
|                           | P125           | 125 g/m <sup>2</sup> | 100% Cellulose              |
|                           | P180           | 180 g/m <sup>2</sup> | 100% Cellulose              |
|                           | P224           | 224 g/m <sup>2</sup> | 100% Cellulose              |
| Lingettes non tissées     | J <sub>1</sub> | 75 g/m <sup>2</sup>  | 100% Polyester              |
|                           | J <sub>2</sub> | 38 g/m <sup>2</sup>  | 100% Polyester              |
|                           | J <sub>3</sub> | 50 g/m <sup>2</sup>  | 65% viscose & 35% Polyester |
|                           | J <sub>4</sub> | 45 g/m <sup>2</sup>  | 100 % Viscose               |

TAB.2 – Exemple de surfaces étudiées dans ce travail

### Résultats expérimentaux

Pour chacune des surfaces étudiées, nous avons calculé les entropies de Shannon, exposants de Lyapunov et la dimension de l'espace des phases pour un signal temporel Modalsens d'une durée de 5 secondes, échantillonné à 1000 Hz. Cette durée de 5 secondes correspond à une rotation complète du plateau de mesure (12 tr/min). Chaque valeur correspond à une moyenne de 5 mesures. Ces valeurs sont affichées avec leur intervalle de confiance IC 95% y afférant. Sur les mêmes séries temporelles, les Recurrence Plots ont été tracés (Figure 3).

| Surface | Entropies de Shannon |        | Exposant max de Lyapunov |        | Dimension d |
|---------|----------------------|--------|--------------------------|--------|-------------|
|         | Moyenne              | IC 95% | Moyenne                  | IC 95% | Average     |
| P90     | 767,05               | 111,16 | 0,0019                   | 0,0004 | 6           |
| P125    | 540,12               | 40,87  | 0,0030                   | 0,0006 | 6           |
| P180    | 488,53               | 34,77  | 0,0034                   | 0,0004 | 6           |
| P240    | 452,66               | 58,50  | 0,0039                   | 0,0006 | 6           |
| J1      | 373,75               | 28,01  | 0,0058                   | 0,0005 | 6           |
| J2      | 412,81               | 41,34  | 0,0054                   | 0,0006 | 6           |
| J3      | 463,14               | 42,30  | 0,0052                   | 0,0005 | 6           |
| J4      | 384,05               | 46,24  | 0,0058                   | 0,0004 | 6           |

TAB.3 – Indicateurs globaux des espaces de phases pour les surfaces papetières et pour les non tissés J's

Comme on peut le constater, sur le tableau 3, la dimension de l'espace des phases est de 6 quel que soit le type de surface analysée. Par ailleurs, lorsque le grammage des papiers augmente, c'est-à-dire lorsque la rugosité de ces surfaces augmente, on peut constater que l'entropie des signaux Modalsens décroît alors que la sensibilité du système aux conditions initiales croît (exp. de Lyapunov). On constate le même type de comportement entre J<sub>1</sub> et J<sub>2</sub> et entre J<sub>4</sub> et J<sub>3</sub>. Pour ces dernières surfaces, la diminution de la masse surfacique (J<sub>2</sub> vs J<sub>1</sub>) entraîne une augmentation de l'entropie, couplée à une très légère diminution de l'exposant de Lyapunov. Cependant, lorsqu'on change de matériau et lorsqu'on ajoute du PET à la viscose (J<sub>3</sub> vs J<sub>4</sub>), on remarque que l'entropie augmente fortement alors que la sensibilité au chaos stagne.

Ces observations sont complétées par l'analyse des RP (figure 3) où l'augmentation de la masse surfacique papetière génère des successions de régimes dynamiques de moins en moins redondants. De plus, il existe une grande différence graphique entre les RP qui cartographient les papiers et ceux qui cartographient les non tissés. Ces différences de signatures non linéaires de contact sont logiques dès lors que les structures étudiées sont radicalement différentes. On observe ainsi, pour les papiers, des zones de non redondances (zone blanches liées aux fortes amplitudes du signal) qui s'organisent en rayons fins alors que ces zones se

transforment en secteurs radiaux larges sur les non tissés, faisant apparaître une structuration différente de des séquences des régimes dynamiques le long d'un tour de plateau.

Ces résultats montrent clairement que les RP peuvent servir de signature du couplage capteur Modalsens / Surface analysée. Les paramètres globaux et les RP peuvent donc servir d'outil de caractérisation fine des états de surfaces complexes et hautement compressibles, telles les surfaces textiles. Lors de la présentation orale, nous montrerons comment les paramètres de quantification des RP permettent de faire le lien entre la signature du contact et l'analyse de chacune des surfaces que nous avons étudiées.

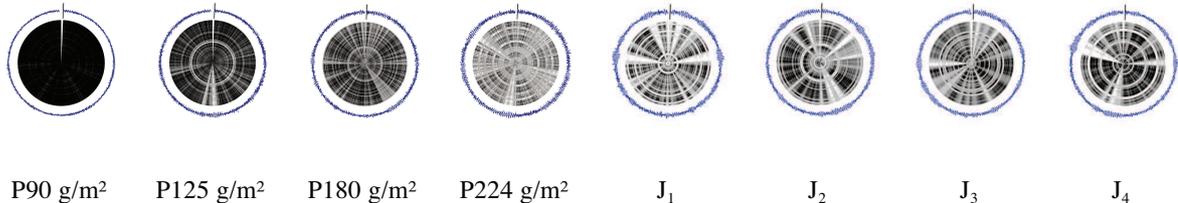


FIG3. – Représentation Polaire des Recurrence Plots sur les surfaces papetières et sur les non tissés J's. La couronne représente le signal temporel source qui a permis de calculer ces RP.

#### 4. Conclusions

Suite à ces caractérisations des régimes dynamiques non linéaires lors du contact entre le capteur Modalsens et chaque surface analysée, on conclut que l'analyse non linéaire des régimes dynamiques de Modalsens renseigne sur la façon dont le contact se développe à l'interface. L'apport de ce travail réside ainsi dans le fait que le frottement sur matériaux fibreux peut être considéré comme un agencement et une succession de régimes dynamiques non linéaires séquencés, plus ou moins ordonnés et plus ou moins sensibles au chaos. Ces analyses permettent d'accéder à des signatures Procédé/Matériaux qui renseignent sur le développement du frottement et qui permettent leur caractérisation tribologique.

#### Références

- [1] Marwan N., Romano C.M., Thiel M., Kurths J., "Recurrence Plots for the analysis of complex systems", *Physics Reports*, N°438, p 237-329, 2007.
- [2] Poincare H., " Sur le problème des trois corps et des équations de la dynamique", *Acta Mathematica* 13, 1890.
- [3] Bueno M.-A., Fontaine S., Renner M., "Dispositif pour évaluer l'état de surface d'un matériau et procédé de mise en œuvre dudit dispositif" - BUENO M.-A., FONTAINE S., et RENNEN M., "Dispositif pour évaluer l'état de surface d'un matériau et procédé de mise en œuvre dudit dispositif" (2000), Brevet **Français** n° 7490, Brevet **USA** N°6,810,744 Brevet **Européen** n° 1290405 (FR, DE, GB, Turquie, IT, Espagne, Pays Bas, Suède, Suisse), Brevet **Israélien** n° 153256
- [4] Fontaine S., Renner M., Marsiquet C. "Mechanical behaviors in shearing transverse compression of fibrous asperities: application to the characterization of surface quality of textile materials", *Textile Research Journal*, 79 (16), 1502-1521, Octobre 2009. Impact factor 1,096.
- [5] Marsiquet C., Fontaine S., Renner M., "Resonant behavior of a preloaded blade - three dimensional representation of surface measurements on fibrous structures", *Experimental Techniques*, 32 (6), 30-40, Nov / Dec 2008. Impact factor 0,500.
- [6] Fontaine S., Marsiquet C., Renner M., Bueno M.A., "Characterization of Roughness – Friction: Example with Nonwovens", *Textile Research Journal*, 75 (12), 826-832, Décembre 2005. Impact factor 1,096.
- [7] Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S., "Geometry from a time series", *Physical Review Letters*, vol 45, N°9, p 712-715, 1980.
- [8] Takens F., Rand D.A. And Young L.S., "Detecting strange attractors in turbulence", *Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics*, vol 898, p366-381, 1981.
- [9] Emmanoulopoulos D., "Non linear Time Series Analysis of BL Lac Light curves", Dissertation submitted to the Combined Faculties for the Natural Science and for mathematics of the Ruperto-Carola University of Heidelberg, Germany", p 35-52, 25th July 2007.
- [10] Kennel M.B., Brown R., Abarbanel, H.D.I., "Determining embedding for phase-space reconstruction using a geometrical construction", *Physical Review A*, vol 45, N°6, p 3403-3411, 1992.
- [11] Eckmann J.P., Oliffson Kamphorst S., Ruelle D., "Recurrence plots of Dynamical Systems", *Europhysics Letters*, vol 9, N°4, p 973-977, 1987.