



**HAL**  
open science

## Approche interdisciplinaire-physiologique, psychologique et de traitement du signal-du stress induit au sein d'une interface de résolution de problèmes

E Blons, V Deschodt-Arsac, E. Grivel, V. Lespinet-Najib

### ► To cite this version:

E Blons, V Deschodt-Arsac, E. Grivel, V. Lespinet-Najib. Approche interdisciplinaire-physiologique, psychologique et de traitement du signal-du stress induit au sein d'une interface de résolution de problèmes. ERGO'IA 2018, Oct 2018, Bidart, France. hal-01882618

**HAL Id: hal-01882618**

**<https://hal.science/hal-01882618>**

Submitted on 27 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Approche interdisciplinaire – physiologique, psychologique et de traitement du signal – du stress induit au sein d’une interface de résolution de problèmes

E. Blons  
estelle.blons@ims-  
bordeaux.fr

V. Deschodt-Arsac  
veronique.arsac@u-  
bordeaux.fr

E. Grivel  
eric.grivel@ims-  
bordeaux.fr

V. Lespinet-Najib  
veronique.lespinet@  
ensc.fr

Univ. Bordeaux, IMS, UMR 5218, Talence, France

## RESUME

Le stress correspond à un processus cognitif au cours duquel un sujet évalue et prend en compte les menaces et les défis de son environnement. Il n’est pas uniquement un stimulus ou une réponse, mais peut être induit par le contexte d’apprentissage (interférences visuelles et sonores) et l’interface utilisée (pression temporelle et feedbacks). Notre étude vise à analyser les effets psycho-physiologiques d’un stress induit associé à une charge cognitive. Pour ce faire, les sujets sont confrontés à des tâches de résolution de problèmes, combinées ou non à différents niveaux de stress. Des tests psychologiques sont utilisés afin de quantifier les niveaux d’anxiété et de charge cognitive. Le traitement des signaux cardiaques (intervalles RR) enregistrés fournit des paramètres issus d’une analyse temporelle, des indicateurs de puissance fondés sur une analyse spectrale et des indices de régularité. Nos résultats montrent qu’une approche interdisciplinaire psychologique, physiologique et statistique permet de différencier le stress d’une tâche cognitive simple.

## Mots Clés

Stress ; Signaux biologiques ; Variabilité de fréquence cardiaque ; Complexité physiologique ; Charge cognitive ; MSE ; DFA.

## ABSTRACT

Stress is equivalent to a cognitive process in which a subject estimates and takes into account his environment threats and challenges. Hence, it is not only a stimulus nor a response but can be induced from the learning process (visual and sound interferences) and from the interface employed (temporal pressure and feedbacks). Our study aims at analyzing the psycho-physiological effects of an induced stress associated to a cognitive load. For this purpose, the subjects are led to do tasks in which they have to solve problems, combined or not with different stress levels. Psychological tests are used to quantify anxiety and cognitive load levels. Analysis of cardiac signals (RR intervals) provides us with parameters from a time-domain

analysis, power indicators based on a spectral analysis and regularity indices. Combining psychological, physiological and statistical analysis makes it possible to differentiate stress from a simple cognitive task.

## ACM Classification Keywords

•Applied computing ~Systems biology, •Applied computing ~Psychology, •Human-centered computing ~Laboratory experiments, •Hardware ~Digital signal processing

## 1. INTRODUCTION

La notion de stress est un phénomène sociétal majeur qui suscite des enjeux sanitaires et économiques croissants. Présent à différentes échelles, dans le milieu professionnel ou sportif, le stress est au centre des préoccupations de l’Organisation Mondiale de la Santé. Bien que son évaluation ainsi que sa gestion restent difficiles à appréhender, le mot « stress », couramment employé aujourd’hui, est au carrefour d’une multitude de disciplines.

Selon l’Agence Européenne de Sécurité et de Santé au Travail en 2004 : « le stress est un état accompagné de plaintes ou de dysfonctionnements, physiques, psychologiques ou sociaux, et résulte du fait que les individus se sentent inaptes à combler un écart avec les exigences ou les attentes le concernant. [...] Le stress n’est pas une maladie, mais une exposition prolongée au stress peut causer des problèmes de santé ». Ce concept polysémique a été décrit au sein de plusieurs cadres théoriques et de différentes modélisations scientifiques. Ainsi, les travaux de Lazarus et Folkman ont permis de définir une approche transactionnelle [18]. Le stress est alors décrit comme un processus multifactoriel et dynamique, qui possède une dimension subjective et qui résulte d’une transaction entre un individu et son environnement. En effet, l’individu est un agent actif qui peut influencer l’impact d’un agent stressant, par des stratégies cognitives, émotionnelles, comportementales ou bien somatiques. Le stress consisterait donc en « une transaction entre la personne et l’environnement, dans laquelle la situation est évaluée par l’individu comme débordant ses ressources et pouvant mettre en danger son bien-être » [18].

Les agents stressants se caractérisent selon l’intensité, la fréquence et la durée d’exposition. Les études actuelles mettent en évidence une relation entre situation prolongée de stress et risque pathologique. Un stress quotidien augmente de plus de deux fois le risque de développer un accident voire une pathologie cardiovasculaire, rendant ce risque équivalent à celui

---

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the Owner/Author.

Copyright is held by the owner/author.

ERGO’IA, 3 - 5 Octobre, 2018, Bidart, France.

décrit pour le diabète, l'hypercholestérolémie et l'hypertension artérielle.

D'un point de vue neurocognitif, le stress cible spécifiquement les aires du cerveau impliquées dans la coordination de la cognition et des émotions : l'hippocampe, le cortex préfrontal et l'amygdale. En effet, les études en imagerie fonctionnelle mettent en évidence une réactivité amygdalienne plus importante chez les sujets stressés au cours de la présentation de stimuli à forte charge émotionnelle [17]. Kim *et al.* [12] montrent une relation linéaire négative entre le niveau d'anxiété et la connectivité entre amygdale et région préfrontale. Enfin, les travaux de Thayer démontrent qu'en situation de stress, l'interconnexion cœur-cerveau est altérée [20]. L'activation exagérée de l'amygdale inhibe le tractus solitaire qui, lui-même, inhibe le bulbe rachidien, siège du système autonome cardiaque [9]. Les régulations cardiaques seraient donc modifiées lorsque les sujets sont stressés de manière chronique [20].

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC, intervalles de temps entre deux battements cardiaques ou intervalles RR) est l'une des caractéristiques étudiées pour analyser le fonctionnement du système autonome cardiaque. De nombreux indices, issus d'une analyse temporelle, précisant la puissance véhiculée dans certaines bandes de fréquences ou évaluant la régularité de la séquence, sont utilisés dans la littérature afin de quantifier les effets de stimuli extérieurs, tels que le stress ou la charge cognitive [1, 15, 19, 21]. Cette dernière peut se définir par l'intensité du traitement cognitif mis en œuvre par un individu pour réaliser une tâche donnée dans un contexte particulier [5]. Une étude récente [23] montre l'intérêt de l'utilisation d'indices de régularité afin d'analyser les interconnexions entre régulations cardiaques et système nerveux central à partir du traitement des signaux de VFC [3]. Ces indices seraient des paramètres essentiels à la compréhension des mécanismes entre régulations centrales et périphériques puisque les paramètres « classiques » temporels ou fréquentiels ne suffiraient pas à analyser des signaux physiologiques qui sont par nature chaotiques [7, 22].

L'objectif de notre étude est d'étudier les effets de stress induits sur des tâches de résolution de problèmes à partir de traitement de signaux psycho-physiologiques. Des influences réciproques existent en effet entre charge cognitive et stress [10].

Cette analyse permettra d'étudier les relations entre les régulations du système nerveux autonome et les régulations centrales, à partir notamment de l'étude d'indices de régularité des signaux autonomes cardiaques.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Population

Seize sujets, 12 femmes et 4 hommes, de langue maternelle française, ont participé à cette étude (âge :  $38.5 \pm 4.2$  ans). Les sujets ont volontairement été sélectionnés de manière hétérogène dans l'objectif, à terme, de déterminer des signatures psycho-physiologiques individuelles. Aucun sujet de l'étude ne présentait de pathologie cardio-respiratoire et n'a reçu de traitement médical durant la phase expérimentale. Il fut demandé aux participants de ne pas absorber des quantités de café ou de

thé trop importantes durant toute la procédure expérimentale, de s'abstenir de ces boissons et d'éviter toute alimentation trop lourde les matins précédant les enregistrements physiologiques afin de contrôler l'impact de ces variables sur les réponses autonomes cardiaques. Tous les sujets ont adhéré à l'étude en signant le document de consentement éclairé.

### 2.2. Procédure Expérimentale

#### Situations Expérimentales

Les sujets ont réalisé 4 situations expérimentales : une situation de référence (Réf), une situation de tâches cognitives (Tc), et deux situations de tâches cognitives et de stress (S) induit : de faible niveau stressant (Tc+S1) et de niveau stressant élevé (Tc+S2). L'ordre des situations Tc, Tc+S1 et Tc+S2 fut contrebalancé. Lors de la situation Réf, les sujets ont regardé un documentaire animalier calme en position assise et relaxée, durant 10 minutes. En situations Tc, Tc+S1 et Tc+S2 les sujets furent confrontés à des tâches cognitives sur ordinateur. Les sujets devaient rester silencieux durant l'ensemble des situations. Chacune de ces situations durait de 7 à 8 minutes.

#### Tâches Cognitives

Chacune des 3 situations de tâches cognitives, Tc, Tc+S1 et Tc+S2, était composée de questions de logique, de mémorisation et de calcul mental. Vingt-trois questions étaient posées au sujet durant Tc, 28 lors de la tâche Tc+S1 et 31 lors de la tâche Tc+S2. Un équilibre concernant la nature des questions fut conservé entre les trois tâches. Les scores de performance cognitive en termes de pourcentages moyens de réussite furent calculés à partir des réponses enregistrées sur le clavier de l'ordinateur par les participants.

#### Situations de Stress, Tc+S1 et Tc+S2

Afin d'induire deux niveaux de stress graduels, le contexte d'apprentissage a été modifié en générant des interférences visuelles et sonores tant dans l'environnement du sujet que sur l'interface utilisée, avec des feedbacks négatifs et une pression temporelle.

Durant Tc+S1 : la réalisation de l'ensemble des questions devait être réalisée dans un temps limité de 7 minutes et une audience inattentive avec effet de présence et de distraction auditive et visuelle était ajoutée.

En situation Tc+S2 : chaque question était affichée durant un temps prédéfini, non contrôlable par le sujet ; deux personnes constituaient une audience attentive et évaluative, et des perturbations sonores furent diffusées. Pour Tc+S1 et Tc+S2, des feedbacks négatifs visuels apparaissaient lors de réponses fausses pour amplifier le stress induit.

#### Questionnaires Psychologiques

Deux questionnaires furent présentés aux sujets à la suite de chacun des tests : le questionnaire d'anxiété état de Spielberger [8, 18] et le NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) [4]. Le questionnaire d'anxiété état se compose de 20 items permettant de recueillir le ressenti des sujets sur des échelles de type Likert en 4 points. Le NASA-TLX (dans sa version complète) est un questionnaire permettant de mesurer la charge cognitive du sujet. Il évalue 6 dimensions de la charge sur des échelles de 1 à 100. Les contributions de

chacune de ces dimensions sont considérées grâce à des comparaisons deux à deux permettant de pondérer le score de charge obtenu.

### Mesures de la Variabilité de Fréquence Cardiaque

Les intervalles temporels entre deux contractions ventriculaires cardiaques, ou intervalles RR, ont été enregistrés sur des périodes de sept à dix minutes en fonction des situations expérimentales. Les enregistrements furent effectués à partir de l'utilisation de ceintures Polar® H10 reliées par Bluetooth à l'application pour smartphone Elite HRV®. Les enregistrements furent réalisés en position assise dans une pièce calme à 20°C entre 10 heures et 12 heures afin de limiter les effets liés à la chronobiologie.

## 2.3. Présentation des Indices Retenus pour Analyser la Variabilité de la Fréquence Cardiaque

Partant des séries d'intervalles RR, différents types de caractéristiques peuvent être déduites.

### Indices Fondés sur l'Analyse Temporelle

Deux paramètres sont pris en compte :

- la moyenne des séries d'intervalles RR.
- la somme au carré des différences successives de deux intervalles RR, plus connu sous l'acronyme anglais RMSSD. Il s'agit d'un paramètre classique d'analyse de la variabilité cardiaque représentant la variabilité à court terme et la modulation vagale.

### Indices de Puissance Fondés sur une Analyse Fréquentielle

Les bandes fréquentielles 0.04-0.15 Hz et 0.15-0.5 Hz illustrent

	Réf	Tc	Tc+S1	Tc+S2
Anxiété état	31.6 ± 1.7	34.1 ± 2.1	40.2 ± 3.3 <sup>#</sup>	45.5 ± 2.7 <sup>**###</sup>
Charge cognitive	26.7 ± 2.8	56.4 ± 3.5 <sup>***</sup>	65.5 ± 3.5 <sup>***###</sup>	72.7 ± 3.3 <sup>***###</sup>
Performance de réussite	-	70.9 ± 3.9	58.5 ± 3.6 <sup>#</sup>	47.1 ± 2.9 <sup>###*</sup>

respectivement les contributions des systèmes sympathique et parasympathique du système nerveux autonome cardiaque [19]. Pour obtenir les puissances véhiculées dans ces bandes de fréquence, notées *LF* et *HF*, une analyse spectrale est menée. Différents types d'approches existent, des techniques dites basse-résolution fondées sur la transformée de Fourier aux méthodes à haute résolution telles que Capon, MUSIC, ESPRIT [13].

De plus, la valeur normalisée de *HF* est calculée afin d'étudier la balance sympatho-vagale. Elle vérifie :

$$HF_{n.u.} = \frac{HF}{LF+HF} \quad (1)$$

### Indices de Régularité

La régularité des intervalles RR peut être une signature que l'on peut envisager pour distinguer différentes familles de sujets. Plus la variabilité du signal est importante, plus le sujet est sain

et en bonne santé. Cette analyse visant à mettre en valeur la propension au chaos peut reposer sur l'analyse entropique [16] ou encore l'analyse entropique multi-échelle, *Multiscale entropy* (MSE) en anglais [6]. Nous avons utilisé cette méthode. Elle opère comme suit : une valeur d'entropie est calculée pour chaque niveau d'échelle. L'aire de la courbe résultante est représentée dans un plan dont l'abscisse correspond au niveau d'échelle et l'ordonnée la valeur de l'entropie. L'aire de la courbe résultante, linéaire par morceau, est alors étudiée.

L'analyse de régularité peut aussi se ramener à estimer l'exposant de Hurst, qui caractérise la régularité globale d'un signal [11]. Ce dernier permet de mesurer si le processus est à mémoire longue ou non. Plusieurs approches ont été proposées comme le Modified R/S (MR/S), la méthode dite des variances agrégées pour les séries ou des approches dans le domaine fréquentiel comme l'estimateur de Whittle local, ou encore l'analyse des fluctuations redressées, *Detrended Fluctuations Analysis* en anglais (DFA) [14]. C'est cette dernière méthode que nous avons considérée dans notre étude. Le DFA est obtenu comme suit :

- après intégration, la séquence RR étudiée est divisée en segments de taille *n*.
- la tendance locale de chaque segment se déduit en utilisant un critère de type moindres-carrés. La séquence globale RR intégrée s'exprime donc comme la somme de la tendance linéaire par morceaux et d'un résidu.
- la racine carrée de la puissance du résidu, *F(n)*, est calculée pour différentes longueurs du segment. En théorie, la représentation de son logarithme en fonction du logarithme de la longueur du segment correspond à une ligne droite avec une pente notée  $\alpha$ .
- $\alpha$  est estimé au sens des moindres carrés à partir des différents couples (*F(n),n*).

## 2.4. Analyse Statistique

Les valeurs moyennes des différents indices retenus sont présentées avec l'erreur standard de la moyenne.

Les données cognitives, psychologiques et physiologiques obtenues lors des quatre situations (Réf, Tc, Tc+S1 et Tc+S2) sont comparées à partir des tests ANOVA à mesures répétées.

**Tableau 1. Valeurs des scores d'anxiété état, de charge cognitive et de performance en situations Réf, Tc, Tc+S1 et Tc+S2. Différences avec Réf, \*\**P*<0.01, \*\*\**P*<0.001. Différences avec Tc, #*P*<0.05, ##*P*<0.01, ###*P*<0.001.**

**Différences entre Tc+S1 et Tc+S2, \**P*<0.05.**

Les comparaisons par paires sont ensuite effectuées en utilisant le test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité statistique, noté *P*, est fixé à 0.05.

## 3. RESULTATS

### 3.1. Analyse Psychologique des Sujets

Le niveau d'anxiété des sujets reste stable en situation de tâches de résolution de problèmes et augmente lorsque les sujets sont soumis à des stimuli stressants (Tableau 1).

La charge cognitive augmente lors des situations. Elle est supérieure lorsque le sujet effectue une tâche cognitive en étant soumis à un stress important (Tc+S2).

### 3.2. Performances aux Tests Cognitifs

En situation de tâches cognitives (Tc), le score de performance cognitive ou taux de réussite moyen, est

	Réf	Tc	Tc+S1	Tc+S2
Intervalles RR (ms)	870 ± 30	898 ± 25	873 ± 25	858 ± 21
RMSSD (ms <sup>2</sup> )	36 ± 5	49 ± 5*	43 ± 6 <sup>#</sup>	43 ± 5
LF	23.1 ± 2.8	32.3 ± 3.6*	29.0 ± 3.8	30.3 ± 3.8
HF	28.9 ± 5.0	38.3 ± 5.6*	32.4 ± 5.1	31.5 ± 4.3
HF <sub>n.u.</sub>	0.52 ± 0.03	0.52 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.49 ± 0.02
Entropie (MSE)	3.59 ± 0.15	4.21* ± 0.15	4.00 ± 0.15	3.81 ± 0.15
α (DFA)	1.27 ± 0.06	1.18 ± 0.05	1.22 ± 0.07	1.26 ± 0.07

**Tableau 2.** Valeurs des indices temporels, de puissance et de régularité des signaux de variabilité de fréquence cardiaque en situations Réf, Tc, Tc+S1 et Tc+S2.

Différences avec Réf, \* $P < 0.05$ .

Différences avec Tc, <sup>#</sup> $P < 0.05$ .

significativement différent entre les situations expérimentales ( $P < 0.001$ ), il diminue respectivement entre les situations Tc et Tc+S1 ( $P < 0.05$ ) puis Tc+S1 et Tc+S2 ( $P < 0.05$ ) (Tableau 1). Les sujets fortement stressés démontrent ainsi un score significativement plus faible lors des tâches de résolution de problèmes.

### 3.3. Régulations du Système Autonome Cardiaque

Les valeurs moyennes de RMSSD, de LF, HF et HF normalisées (HF<sub>n.u.</sub>) et des indices de régularité (MSE et DFA) sont présentées dans le Tableau 2.

Aucune différence n'est observée entre les situations pour les valeurs moyennes des intervalles RR. Les fréquences cardiaques

des sujets restent donc stables au cours des différents tests. Les valeurs de RMSSD, LF et HF augmentent significativement entre la situation Réf et la situation Tc. Cela met en évidence un impact des tâches de résolution de problèmes sur les régulations autonomes cardiaques. La valeur de RMSSD diminue ensuite lorsque les sujets sont soumis à un premier niveau de stress (Tableau 2).

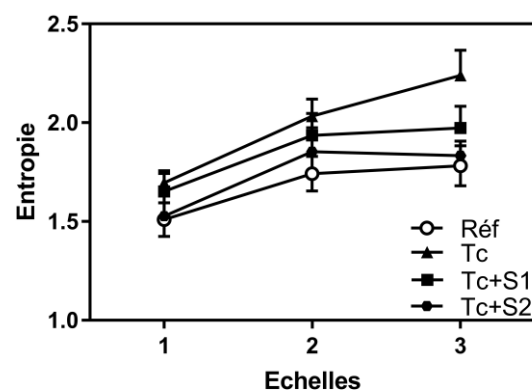
Les valeurs d'entropie calculées sur trois échelles à partir de la méthode MSE augmentent significativement entre Réf et Tc, et tendent à diminuer lorsque les sujets effectuent leurs tests cognitifs en situations Tc+S1 et Tc+S2 (Figure 1).

Aucune différence n'est observée entre les situations pour l'indice de régularité  $\alpha$ , calculé à partir de la méthode DFA.

## 4. DISCUSSION

L'objectif de ce travail est d'analyser les effets de stress sur les capacités psycho-physiologiques des sujets. La nature interdisciplinaire de notre étude a pour objectif d'utiliser des compétences en traitement du signal pour interpréter les altérations psycho-physiologiques liées aux situations stressantes induites.

Le premier résultat important de notre étude met en évidence un maintien des régulations autonomes



**Figure 1.** Analyse MSE des signaux de variabilité de fréquence cardiaque durant les situations Réf, Tc, Tc+S1, Tc+S2. Les valeurs d'entropie aux 3 échelles étudiées sont présentées. L'aire sous la courbe résultante définit le niveau d'entropie.

cardiaques associé à un état d'anxiété stable lorsque les sujets sont face à une résolution de problèmes. L'absence de modification au niveau de l'état d'anxiété des sujets ne peut être ici imputée à un désengagement des sujets sur cette phase de tests. En effet, l'augmentation de charge cognitive calculée à partir du test NASA-TLX confirme un recrutement des ressources cognitives. Chez nos sujets, la situation de réalisation de tâches cognitives (Tc) provoquerait une optimisation des processus cognitifs leur permettant de se concentrer sur les tâches sans développer de stress additionnel. Le caractère interdisciplinaire de notre étude permet de confirmer ce dernier résultat en mettant notamment en exergue la notion d'interconnectivité cœur-cerveau [23]. En effet, nous observons

une augmentation des indices physiologiques (RMSSD, HF) entre la situation de référence, pendant laquelle les sujets sont au calme, et la situation Tc durant laquelle ils réalisent les tâches de résolution de problèmes. Ce résultat montre la plus forte implication du système nerveux parasympathique dans cette situation [19], synonyme d'un meilleur état autonome cardiaque chez les sujets, souvent associé à un état de plénitude psychologique [7]. L'étude de la régularité du signal cardiaque par la méthode MSE nous permet de décrire une augmentation de l'entropie en situation Tc. Un niveau de régularité physiologique élevé a été rapporté dans la littérature associé à des capacités d'adaptations cognitives et motrices supérieures [21]. En utilisant également la méthode MSE, des auteurs ont mis en évidence des différences d'entropie en fonction des niveaux d'éveil des sujets, montrant ainsi la capacité de populations jeunes et en bonne santé à augmenter leur niveau d'entropie lorsqu'ils sont éveillés, en comparaison au niveau recueilli lors du sommeil [6]. Nous pouvons donc supposer que l'interconnectivité cœur-cerveau évoquée par Thayer est améliorée lorsque nos sujets sont engagés dans une tâche cognitive de résolution de problèmes sans modification de leur niveau de stress [23].

Le second résultat de l'étude s'appuie sur la description des dysrégulations autonomes cardiaques combinées à des augmentations de l'état d'anxiété et à des diminutions significatives des performances cognitives, lorsque les sujets sont soumis à des stimuli stressants, lors des tâches de résolution de problèmes identiques à celle de la situation Tc. Dès 1908, Yerkes et Dodson avaient déjà émis l'hypothèse de l'existence d'une zone optimale d'activation pour laquelle les performances étaient les meilleures [22]. D'autres travaux ont depuis repris et spécifié ce phénomène : l'ajout de facteurs de stress impose une augmentation combinée d'anxiété et de charge cognitive au dépend de la performance aux tests [2].

Bien que les indices fondés sur les analyses temporelles et fréquentielles ne confirment pas significativement les observations des caractéristiques psychologiques en situations stressantes, les indices de régularité que nous avons utilisés permettent d'aller plus loin s'agissant de l'analyse psycho-physiologique des sujets dans ces situations. La valeur plus élevée du niveau d'entropie décrite lors de la réalisation de tâches cognitives sans stress n'est plus observée lorsque les sujets sont stressés. L'entropie tend à diminuer pour revenir au niveau de référence. Cela peut paraître surprenant, car les sujets doivent toujours réaliser des tâches de résolution de problèmes, donc ils devraient a priori être caractérisés par une forte entropie de leur signal cardiaque. L'augmentation de l'état d'anxiété voire l'augmentation excessive de charge cognitive induite par les paramètres stressants semble donc impacter la régularité du signal cardiaque. Récemment, Dimitriev *et al.* [7] avaient également émis cette hypothèse en étudiant l'effet d'un stress induit par un examen universitaire sur un certain nombre de paramètres physiologiques, dont le niveau de complexité (entropie et  $\alpha$  par méthode DFA) du signal cardiaque. L'indice de régularité  $\alpha$  obtenu par la méthode DFA utilisée dans notre étude n'est quant à lui pas différent en fonction des situations contrairement à ce qui fut montré antérieurement dans une étude similaire [7, 23]. Cependant, si on compare précisément les caractéristiques psycho-physiologiques de nos sujets à celles,

par exemple, des sujets de l'étude de Dimitriev *et al.* [7], nous pouvons constater que les valeurs prises par  $\alpha$  sont relativement proches pour les deux populations. Une optimisation de cette analyse DFA pourrait très certainement permettre d'affiner la compréhension des résultats issus de cet indice appliqué aux signaux cardiaques.

En conclusion, cette étude apporte une approche psycho-physiologique intéressante de sujets soumis à un stress induit au sein de tâches de résolution de problèmes. L'utilisation d'outils provenant d'analyses de la régularité des signaux permet d'affiner cette approche en apportant une analyse fondée sur l'étude de la complexité des signaux biologiques, encore peu développée dans la littérature sur sujets sains. Cette analyse interdisciplinaire qui croise les effets physiologiques et les effets psychologiques, ressentis subjectifs, permet d'obtenir une analyse intégrée, plus globale des effets du stress. Notre objectif sera de déterminer par la suite les signatures individuelles des sujets leur permettant de répondre de manière optimale à des situations stressantes.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bernardi, L., Wdowczyk-Szulc, J., Valenti, C., Castoldi, S., Passino, C., Spadacini, G. and Sleight, P. Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *Journal of the American College of Cardiology*. 35, 6 (2000), 1462–1469.
- [2] Birkett, M.A. The Trier Social Stress Test protocol for inducing psychological stress. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*. 56 (2011).
- [3] Bishop, S.J. Neurocognitive mechanisms of anxiety: an integrative account. *Trends in Cognitive Sciences*. 11, 7 (2007), 307–316.
- [4] Cegarra, J. and Morgado, N. Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX 2009.
- [5] Chanquoy, L., Tricot, A. and Sweller, J. La charge cognitive: théorie et applications. *A. Colin*, 2007.
- [6] Costa, M., Goldberger, A.L. and Peng, C.-K. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 71, 2 Pt 1 (2005), 021906.
- [7] Dimitriev, D.A., Saperova, E.V. and Dimitriev, A.D. State Anxiety and Nonlinear Dynamics of Heart Rate Variability in Students. *PLoS One*. 11, 1 (2016), e0146131.
- [8] Gauthier, J. and Bouchard, S. A French-Canadian adaptation of the revised version of Spielberger's State-Trait Anxiety Inventory. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement*. 25, (1993), 559–578.
- [9] Gianaros, P.J. and Wager, T.D. Brain-Body Pathways Linking Psychological Stress and Physical Health. *Current Directions in Psychological Science*. 24, 4 (2015), 313–321.
- [10] Hart, S.G. and Staveland, L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*. P.A. Hancock and N. Meshkati, eds. North-Holland., (1988), 139–183.
- [11] Kestener, P. Analyse multifractale 2D et 3D à l'aide de la transformation en ondelettes : application en mammographie et en turbulence développée. *Université Sciences et Technologies - Bordeaux I*, (2003).
- [12] Kim, D., Kang, S.W., Lee, K.-M., Kim, J. and Whang, M.-C. Dynamic correlations between heart and brain rhythm during Autogenic meditation. *Frontiers in Human Neuroscience*. 7, (2013).
- [13] Marple, S.L. Digital Spectral Analysis: With Applications. *Prentice-Hall, Inc.*, (1986).
- [14] Peng, C.K., Havlin, S., Stanley, H.E. and Goldberger, A.L. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*. 5, 1 (1995), 82–87.

- [15] Perkins, S.E., Jelinek, H.F., Al-Aubaidy, H.A. and de Jong, B. Immediate and long term effects of endurance and high intensity interval exercise on linear and nonlinear heart rate variability. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 20, 3 (2017), 312–316.
- [16] Sabeti, M., Katebi, S. and Boostani, R. Entropy and complexity measures for EEG signal classification of schizophrenic and control participants. *Artificial Intelligence in Medicine*. 47, 3 (2009), 263–274.
- [17] Sakaki, M., Yoo, H.J., Nga, L., Lee, T.-H., Thayer, J.F. and Mather, M. Heart rate variability is associated with amygdala functional connectivity with MPFC across younger and older adults. *NeuroImage*. 139, (2016), 44–52.
- [18] Spielberger, C. *Manual for the state-trait anxiety inventory (STAI)*, (1983).
- [19] TaskForce Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*. 93, 5 (1996), 1043–1065.
- [20] Thayer, J.F. and Lane, R.D. 2009. Claude Bernard and the heart-brain connection: further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 33, 2 (2009), 81–88.
- [21] Wayne, P.M., Manor, B., Novak, V., Costa, M.D., Hausdorff, J.M., Goldberger, A.L., Ahn, A.C., Yeh, G.Y., Peng, C.-K., Lough, M., Davis, R.B., Quilty, M.T. and Lipsitz, L.A. A systems biology approach to studying Tai Chi, physiological complexity and healthy aging: design and rationale of a pragmatic randomized controlled trial. *Contemporary Clinical Trials*. 34, 1 (2013), 21–34.
- [22] Yerkes, R.R. and Dodson, J.D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, (1908).
- [23] Young, H. and Benton, D. We should be using nonlinear indices when relating heart-rate dynamics to cognition and mood. *Scientific Reports*. 5, (2015), 16619.