

## Introduction

L'analyse vibratoire donne des informations sur l'état de santé de systèmes mécaniques complexes tels que les moteurs d'avions. Les spectrogrammes constituent une représentation des mesures vibratoires à différents régimes et fréquences dans des conditions non stationnaires. Ces spectrogrammes correspondent à des données en grande dimension et les signatures inusuelles n'en constituent potentiellement qu'une infime partie. Les données dont nous disposons contiennent principalement des données normales avec un nombre limité de signatures atypiques. La grande variabilité des signatures inusuelles et leur faible nombre nous empêchent de mettre en place des modèles mathématiques représentatifs d'anomalies spécifiques. Nous avons donc décidé de caractériser les informations normales présentes au sein des spectrogrammes dans un premier temps afin de mettre en évidence dans un second temps les signatures inusuelles. Cette méthodologie correspond à des problématiques de détection de nouveautés [90].

Nous donnons dans cette partie une description des données, de leurs divers contenus et des problématiques associées indispensables pour la compréhension de la suite de ce manuscrit. Nous donnons également une description des méthodes de détection de nouveautés.



# Chapitre 1

## L'analyse et les données vibratoires

### 1.1 Introduction

L'analyse des vibrations est fondamentale pour la détection d'anomalies de systèmes complexes tels que les moteurs d'avions. Le système peut se mettre à vibrer à des fréquences non référencées correspondant à l'endommagement ou l'usure de l'une de ses pièces. Nous donnons dans ce chapitre une introduction à l'analyse vibratoire des moteurs d'avions ainsi qu'un état de l'art des différentes méthodes de détection d'anomalies sur les signaux vibratoires temporels, fréquentiels ou en temps-fréquence. Des explications sur l'acquisition des données et sur la construction des spectrogrammes étudiés sont également apportées avec les différentes contraintes associées à ce type de donnée. Les différents prétraitements effectués sur les spectrogrammes comme les subdivisions et l'extraction des informations d'experts sont également détaillés.

### 1.2 Les moteurs d'avions

#### 1.2.1 Les caractéristiques des moteurs

Les moteurs d'avions sont des machines tournantes très complexes composées des éléments suivants :

- un arbre haute pression (HP) composé d'une turbine et d'un compresseur possédant une vitesse de rotation  $N_2$ ,
- des compresseurs qui aspirent et compressent l'air pour l'amener à des vitesses, températures et pressions optimales pour la chambre de combustion,
- des turbines qui récupèrent une partie de l'énergie issue de la combustion des gaz pour le fonctionnement de la tuyère, des compresseurs et des accessoires ; chaque turbine fait fonctionner son propre compresseur,
- un arbre basse pression (BP) composé d'une turbine et d'un compresseur possédant une

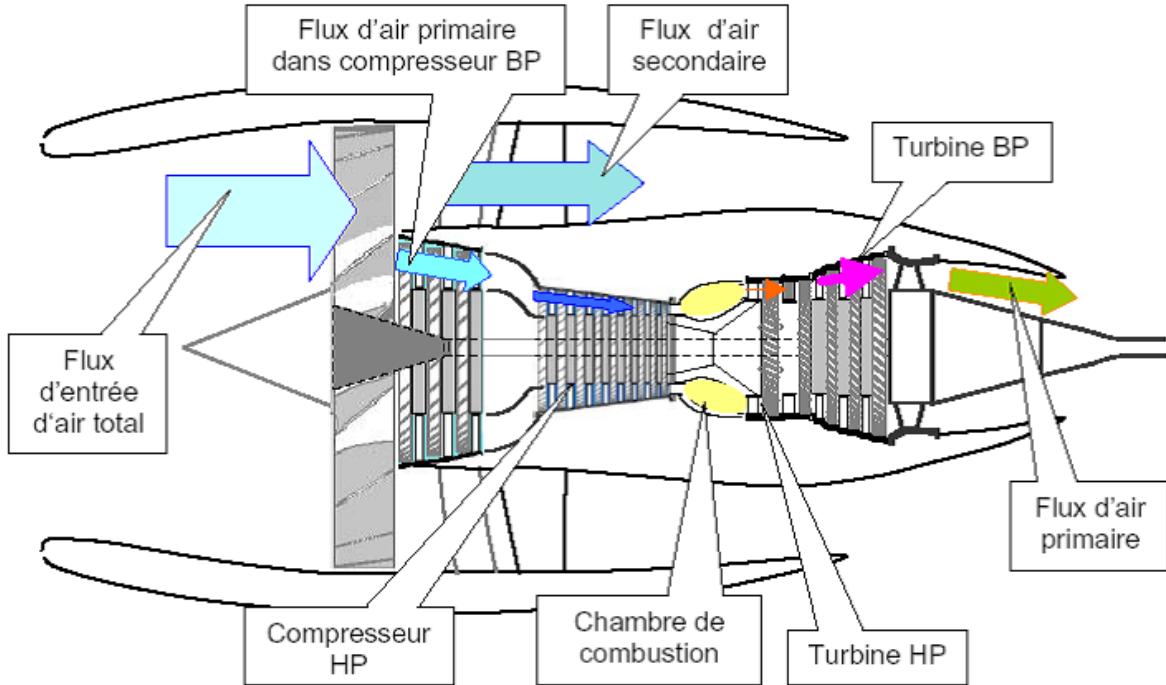


FIGURE 1.1 – Circulation de l'air lors du fonctionnement du moteur [108]. L'air est aspiré par le fan et divisé en 2 flux d'air, le flux d'air primaire est compressé dans les compresseurs BP et HP, puis chauffé dans la chambre de combustion et détendu dans les turbines HP et BP. Le flux d'air secondaire passe entre le moteur et la nacelle et permet un refroidissement du moteur.

vitesse de rotation  $N_1$ ,

- un fan à l'avant du moteur qui permet d'effectuer la première étape de compression et de séparer le flux d'air entrant en un flux secondaire qui va contourner le moteur et un flux primaire qui suivra le cycle de compression-chauffe-détente (Figure 1.1),
- une chambre de combustion qui chauffe l'air à la sortie de la turbine HP afin d'apporter l'énergie nécessaire à mouvoir les turbines ainsi que suffisamment de poussée à la tuyère,
- une tuyère expulsant les gaz chauds sous pression sortant des turbines en leur communiquant le maximum de vitesse afin d'obtenir une poussée optimale,
- des paliers qui supportent et guident les arbres de transmission, il s'agit généralement de roulements (à billes et à rouleaux). Le palier dit "palier #4" est un des roulements les plus importants car il établit la jonction entre l'arbre HP et l'arbre BP, il est donc lié aux 2 vitesses de rotation.

La majorité des éléments présentés ci-dessus font partie du rotor (c'est-à-dire sont en rotation lorsque le moteur est en marche), les autres éléments font partie du stator et constituent les éléments non tournants.

Les moteurs fonctionnent en aspirant l'air capté par la nacelle et accéléré par le fan effectuant une première compression et en divisant le flux d'air en deux (Figure 1.1) :

- Le flux secondaire (ou flux froid) qui s'écoule autour du moteur et est éjecté à l'arrière du moteur. Ce flux permet de refroidir certaines parties du moteur et d'effectuer un coussin d'air afin d'empêcher l'air du flux primaire de s'échapper. Cette architecture permet de

limiter la consommation de carburant et d'augmenter le rendement de la propulsion par augmentation du taux de dilution. En effet, 80% de la poussée est apporté par le flux secondaire.

- Le flux primaire (flux chaud) subit une série de compressions à travers les compresseurs BP et HP. L'air sous pression est brûlé dans la chambre de combustion à l'aide de carburant afin de produire de l'énergie, cette énergie est récupérée par les turbines permettant le fonctionnement du fan et des compresseurs. Les gaz chauds et sous pression arrivent alors à la tuyère où ils sont accélérés avant d'être éjectés (avec le flux secondaire).

La propulsion de l'avion est due à la différence des vitesses entre la sortie d'air qui est nettement supérieure et l'entrée d'air. Cette différence de vitesse entraîne de la poussée  $F$ , force entraînant le mouvement de l'appareil.

$$F = G(V_1 - V_0)$$

$V_0$  et  $V_1$  correspondent respectivement aux vitesses d'entrée et de sortie d'air,  $G$  est le débit massique.

### 1.2.2 Les vibrations du moteur

Les vibrations correspondent aux déplacements des différentes pièces au cours du temps (il s'agit d'oscillations), elles sont des images des forces internes de systèmes mécaniques. Les vibrations peuvent donc être mesurées comme un déplacement, une vitesse ou une accélération. Les vibrations périodiques sont majoritairement excitées par la rotation des deux arbres (HP ou BP), les fréquences vibratoires correspondent alors à des harmoniques entières d'un de ces deux arbres ou du Radial Shaft Speed (RDS) (1.1). Il s'agit de l'arbre auxiliaire transversal qui entraîne la boîte d'engrenage située sous le moteur et dont le rôle est de fournir de l'énergie aux différents accessoires comme les pompes, le générateur de courant, le calculateur,... La chambre de combustion entraîne également des vibrations.

$$\begin{aligned} \{f = \alpha N_2, \alpha \in \mathbb{N}\} \\ \{f = \beta N_1, \beta \in \mathbb{N}\} \\ \{f = \gamma \text{RDS}, \gamma \in \mathbb{N}\} \end{aligned} \tag{1.1}$$

$\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont alors considérés comme respectivement les ordres du  $N_2$ ,  $N_1$  et RDS. Il s'agit de vibrations normales du moteur d'avion, ces signatures sont prévisibles et observables sur les signaux. Des vibrations atypiques peuvent également apparaître sur les signaux, il peut s'agir de vibrations issues des paliers et de leur modulation. Ces signatures sont à détecter impérativement. Des ordres non entiers d'une de ses 3 entités sont souvent considérés comme des signatures inusuelles. Les équations des fréquences vibratoires des paliers peuvent également être obtenues à partir de la connaissance de la géométrie des roulements, par exemple des vibrations à des fréquences multiples du  $(N_2 - N_1)$  sont issues du palier #4 et doivent être impérativement détectées car elles indiquent une potentielle irrégularité sur ce roulement. Une signature inusuelle présente sur le signal vibratoire n'est pas nécessairement synonyme d'un endommagement.

### 1.2.3 L'acquisition des mesures vibratoires et des vitesses de rotation

Les vibrations sont acquises sous condition ambiante au cours du temps par des accéléromètres (capteurs piézoélectriques) situés sur le moteur aussi bien sur banc d'essai qu'en vol (les mesures sur banc d'essai sont à plus haute fréquence que celles récupérées en vol). Les vibrations consistant en un déplacement libèrent des charges électriques au niveau du capteur piézoélectrique qui sont amplifiées et converties en volt. Ce signal analogique est alors converti en signal numérique. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la connaissance des vitesses de rotation des arbres est indispensable afin de pouvoir expliquer certaines vibrations normales ou atypiques. Ainsi, deux tachymètres mesurent les vitesses de rotation des deux arbres.

Sur banc d'essai, les signaux sont acquis en phase d'accélération et de décélération, le moteur va monter en régime pendant environ 2 minutes jusqu'à atteindre les pleins gaz, suit alors une phase de descente de régime pendant environ deux minutes également. Lors de ces essais, nous sommes donc dans des phases non stationnaires. Les signatures atypiques sont plus facilement détectables lors de ces phases. Les capteurs récupèrent tout au long des essais les vibrations et les signaux tachymétriques à une fréquence d'échantillonnage  $F_e = 52100\text{Hz}$ .

Les signaux vibratoires (Figure 1.2a) correspondent à des signaux temporels où sont représentés en abscisse le temps et en ordonnée l'amplitude vibratoire. Les signaux du tachymètre (Figure 1.2b) sont des charges positives et négatives, la conversion en vitesse passe par le nombre de dépassements en front montant d'un seuil (ou en front descendant avec un seuil négatif) du signal tachymétrique (Figure 1.2c). La vitesse (Figure 1.2d) correspond alors au nombre de tours par minute d'un des deux arbres en fonction du temps. En vol, ces signaux sont acquis à une plus faible résolution due aux difficultés de volumétrie des données et d'émission en plein vol.

## 1.3 Conversion des signaux temporels en spectrogrammes

### 1.3.1 Intérêt de cette conversion

Le signal temporel vibratoire contient potentiellement des informations liées à des endommagements du moteur. Cependant sous la forme temporelle du signal, ces informations sont difficilement observables. Dans la figure 1.3, nous présentons les signaux temporels de deux moteurs issus des bancs d'essai, le premier à gauche (Figure 1.3a) en bleu concerne un moteur normal sans endommagement, le second à droite (Figure 1.3b) en rouge possède un endommagement au niveau du palier #4. Comme nous pouvons le voir, il n'y a visuellement aucune information notable permettant de discriminer l'un des moteurs par rapport à l'autre. Cela est dû au fait que les capteurs récupèrent l'information vibratoire de l'ensemble du moteur. Le signal correspond donc à un mélange des différentes sources vibratoires tels que le fan, la chambre de combustion, les arbres, etc. Une information vibratoire inusuelle, si elle existe, est alors noyée dans le signal par l'ensemble des vibrations normales. Des méthodes de séparation de sources [6] des signaux

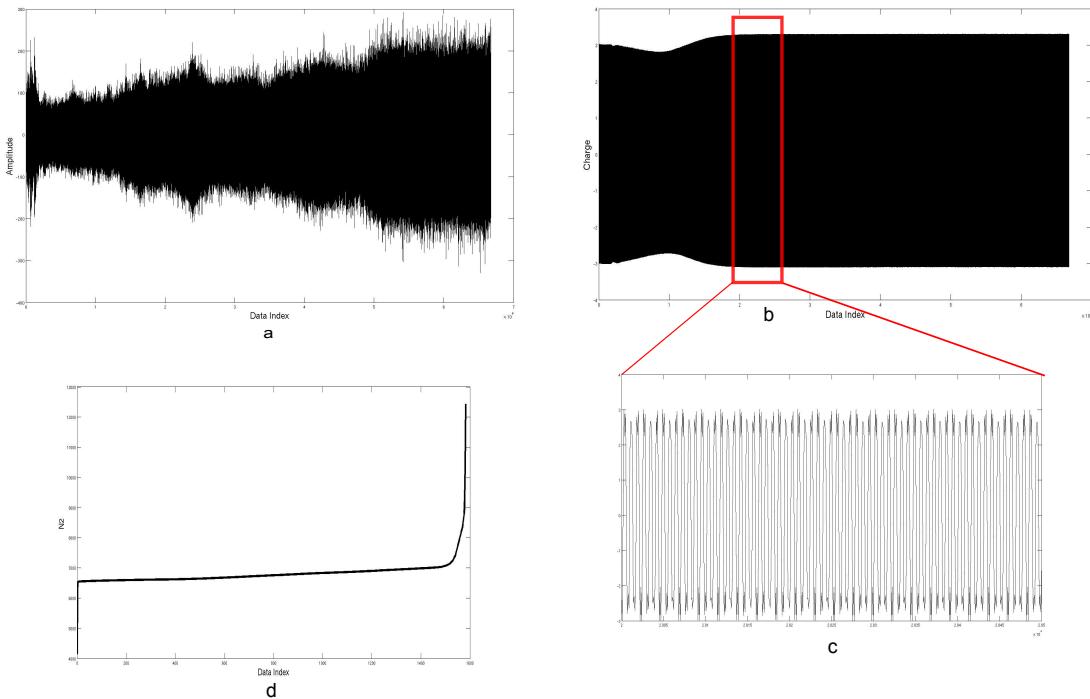


FIGURE 1.2 – Signaux acquis sur banc d’essai. Signal vibratoire issu des accéléromètres (a), le signal tachymétrique (b) correspond aux charges récupérées sur le tachymètre, zoom de ce signal (c) permettant de voir les fronts montants et descendants à partir desquels il est possible de calculer la vitesse de rotation de l’arbre HP (d) en comptabilisant le temps entre 2 fronts montants (ou fronts descendants). Le seuil défini pour la détermination des fronts est non-nul car il existe de petites fluctuations autour de 0 pouvant être interprétées comme un front montant et entraînant une mauvaise estimation de la vitesse de rotation.

vibratoires ont été utilisées dans la littérature afin de retrouver les différentes sources vibratoires afin de discriminer les sources normales des sources anormales pour la détection d’anomalies. Dans le cadre de l’analyse vibratoire, le signal est décomposé selon les sources périodiques, les sources stationnaires aléatoires et les sources non-stationnaires aléatoires.

La représentation des signaux vibratoires du domaine temporel au domaine fréquentiel permet une bonne séparation des sources vibratoires. En effet, les différents éléments (principalement tournants et faisant donc partie du rotor) du moteur possèdent des fréquences de vibrations bien spécifiques dépendant de la vitesse de rotation (vitesse d’un des deux arbres  $N_1$  ou  $N_2$ ) et du nombre de pales ou de dents de la pièce concernée. Un élément tournant ayant  $k$  pales et une vitesse de rotation  $N_2$  aura une fréquence de vibration égale à  $f = kN_2$ , la fréquence de vibrations varie donc avec la vitesse de rotation.

Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel se fait par la transformée de Fourier [80]. Les pics vibratoires du spectre correspondent aux fréquences de vibrations spécifiques d’une pièce. Les pics non usuels permettent de détecter des irrégularités. Une telle interprétation de la transformée de Fourier d’un signal temporel suppose la stationnarité de ce dernier. En effet les fréquences des éléments tournants dépendant de la vitesse, si celle-ci n’est pas constante, de nombreuses fréquences devraient alors être assignées à une même source. Ainsi, la transformée

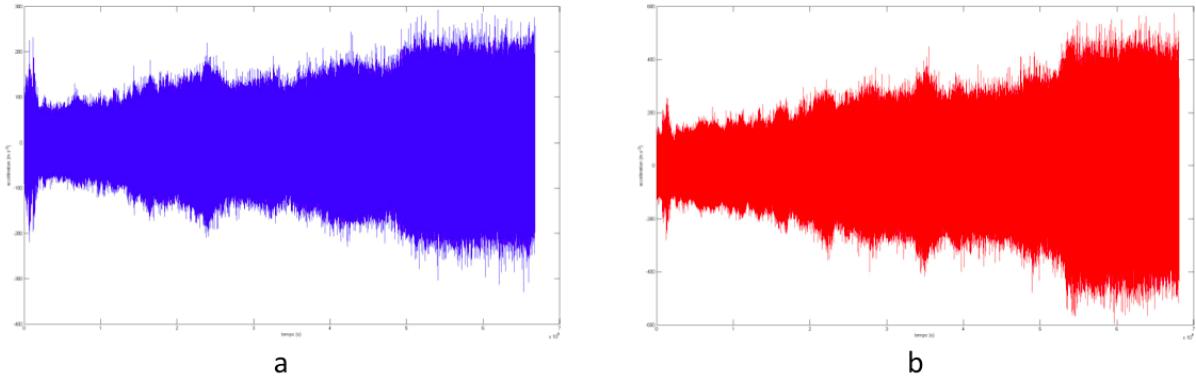


FIGURE 1.3 – Signaux bruts d'un moteur sans endommagement (à gauche) et avec endommagement (à droite)

de Fourier ne peut pas être appliquée aussi simplement à nos signaux acquis dans des phases non-stationnaires telles que l'accélération et la décélération. Les spectrogrammes permettent d'obtenir une représentation fréquentielle et d'analyser les signaux non-stationnaires.

### 1.3.2 La transformation du signal temporel en spectrogramme

Le signal temporel peut être transformé en spectrogramme (Algorithme 1), il s'agit d'une représentation temps-fréquence du signal. Le spectrogramme est construit à partir de la concaténation de différents spectres calculés à partir de la Short-Time Fourier Transform (STFT) sur de petites fenêtres temporelles rectangulaires. Ces fenêtres sont suffisamment petites afin de pouvoir considérer la vitesse comme stationnaire sur ces dernières et ainsi pouvoir appliquer la transformée de Fourier. La taille de fenêtre sélectionnée est de  $T = 0.2$  seconde. Avec une fréquence d'échantillonnage  $F_e$ , chaque fenêtre contient donc  $T \times F_e = 10420$  points.

---

#### Algorithme 1 : Transformation du signal temporel en spectrogramme temps-fréquence

---

**Données :** Le signal temporel  $x[t]$ , la durée (taille) d'une fenêtre  $T$ , le taux de recouvrement des fenêtres  $w$

**Résultat :** Un spectrogramme en temps-fréquence  $S[t, f]$

Initialisation :  $S = \emptyset$  ;

**pour**  $i$  allant de 0 : *nombre de fenêtres*( $w, T$ ) **faire**

$s = \mathcal{F}(x[i(1-w)T : (1+i(1-w))T])$ ; Transformée de Fourier du signal dans la fenêtre  $i$

$S = [S, s]$ ; Concaténation des spectres

**fin**

**retourner**  $S$

---

Cet algorithme permet d'obtenir un spectrogramme temps-fréquence. Sous ce format, les sources vibratoires issues des arbres du moteur ont la forme de raies. Cette représentation ne permet pas de facilement distinguer visuellement les raies vibratoires issues de l'arbre HP de celles issues de l'arbre BP. L'expertise des spectrogrammes se fait visuellement, ainsi pour une meilleure

distinction de l'information vibratoire, il est préférable d'échantillonner les spectrogrammes selon la vitesse de rotation de l'un des deux arbres (donc  $N_1$  ou  $N_2$ ). Il s'agit alors d'un spectrogramme en ordre. Dans notre cas, c'est la vitesse de rotation de l'arbre HP, donc  $N_2$ , qui a été sélectionnée avec un pas d'échantillonnage  $F_N = 10\text{rpm}$  (rotations par minute) (Algorithm 2).

---

**Algorithme 2 :** Transformation du signal temporel en spectrogramme en ordre

---

**Données :** Le signal temporel  $x[t]$ , le pas d'échantillonnage du régime HP  $F_N$ , la durée (taille)  $T$  d'une fenêtre pour le calcul de la STFT

**Résultat :** Un spectrogramme en ordre  $S[N_2, f]$

Initialisation : Définition des régimes  $N_2^{\min}$  et  $N_2^{\max}$  comme le plus petit et le plus grand régime multiples de  $F_N$  sur le signal tachymétrique ;

**pour**  $n$  allant de  $N_2^{\min}$  à  $N_2^{\max}$  par pas de  $F_N$  **faire**

Trouver l'instant minimal  $t_{\min}$  dans le signal  $x[t]$  tel que  $N_2[t_{\min}] = n$

Récupérer  $X_{t_{\min}} = x[t_{\min} - T/2 : t_{\min} + T/2]$  : signal sur la fenêtre temporelle centrée en  $t_{\min}$  et de durée  $T$

$S[n, :] = \text{STFT}(X_{t_{\min}})$  spectre associé au régime  $n$

**fin**

**retourner**  $S$

---

Seul le spectre relatif au premier instant où la vitesse voulue est atteinte est conservé dans cette construction de spectrogramme. Les autres spectres, que ce soit ceux dont la vitesse  $N_2$  n'est pas un multiple de  $F_N$  ou ceux dont la vitesse  $N_2$  est identique à un spectre déjà sélectionné, ne sont pas pris en compte, entraînant une perte d'information.

Sous cette configuration, les vibrations issues de l'arbre HP sont représentées par des droites (voir Eq 1.1). Les vibrations issues de l'arbre BP ont des formes isomorphes à la relation entre le  $N_1$  et le  $N_2$ . La figure 1.5 présente cette relation pour différents moteurs avec en abscisse le régime  $N_2$  et en ordonnée le régime  $N_1$ . Nous pouvons remarquer que la relation, bien que relativement similaire en forme, est assez variable selon les moteurs du fait de différentes conditions extérieures. Cela entraîne le décalage des raies vibratoires liées au  $N_1$  sur les spectrogrammes en ordre échantillonnés en  $N_2$ . Les vibrations n'ayant pas la forme de droite (à coefficients entiers du  $N_2$  ou du RDS) ou des formes liées au  $N_1$  sont considérées comme atypiques (Figure 1.4). Notre base de données correspond à une collection de spectrogrammes en ordre échantillonnés en  $N_2$ .

### 1.3.3 Gains et limites de cette représentation

L'avantage principal du spectrogramme est la possibilité de détecter visuellement les signatures inusuelles qui sont facilement observables en zoomant sur la zone correspondante (Figure 1.4c). De plus, comme le spectrogramme est rééchantillonné en  $N_2$ , tous les spectrogrammes possèdent ainsi une plage de régimes identiques (les fréquences entre les différents spectrogrammes sont déjà identiques). Ainsi il est possible de comparer exactement les mêmes éléments sur les spectrogrammes. De plus les raies vibratoires de même ordre fréquentiel issues de l'arbre HP ont

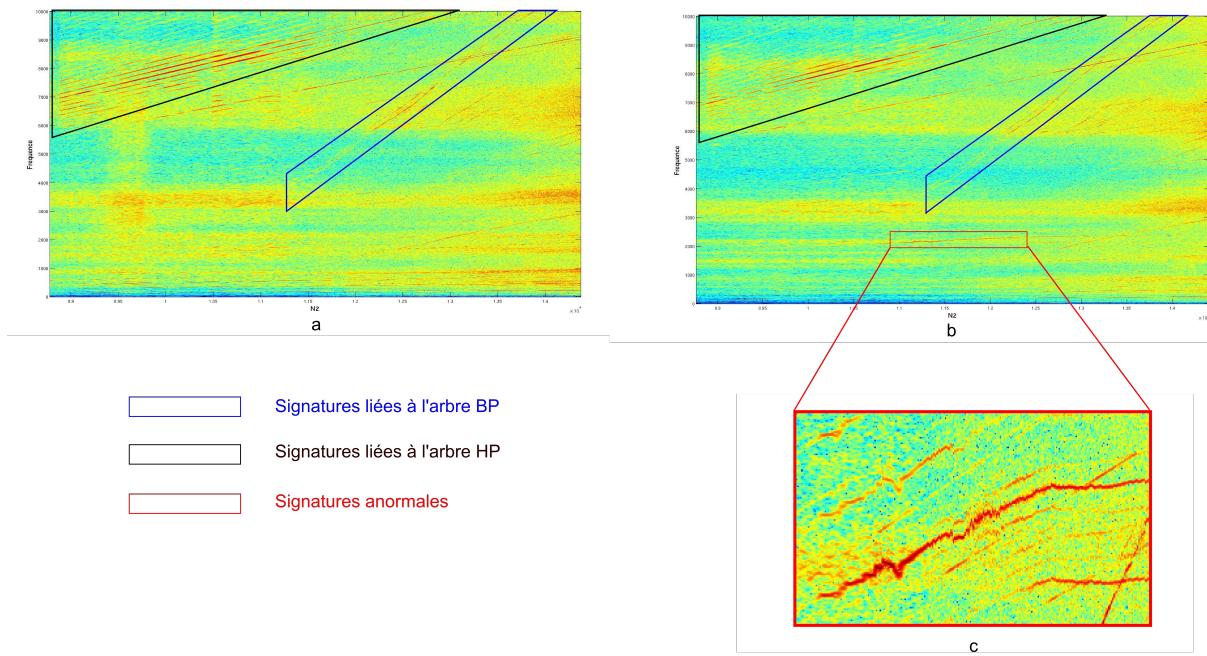


FIGURE 1.4 – Spectrogramme rééchantillonné en  $N_2$ . Spectrogramme d'un moteur déclaré comme sans endommagement (a) et d'un moteur endommagé (b) avec zoom sur les signatures anomalies (c). Les signatures liées à l'endommagement sont visibles uniquement en zoomant sur la zone.

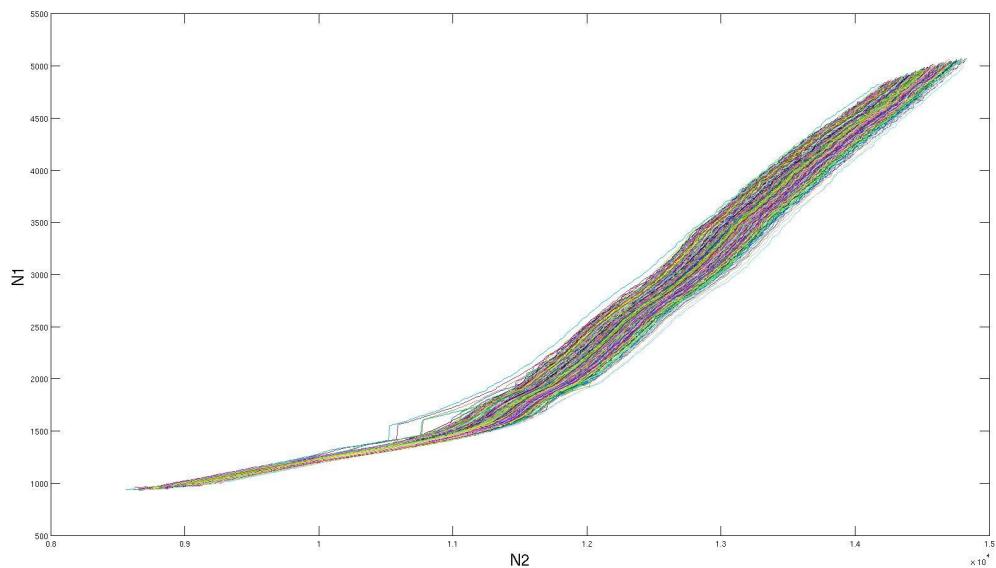


FIGURE 1.5 – Variabilité de la relation entre le  $N_1$  et le  $N_2$ . Chaque couleur de la figure correspond à la relation d'un moteur différent, la relation entre le  $N_1$  et le  $N_2$  est donc variable entraînant le décalage des raies liées au  $N_1$  sur les spectrogrammes en ordre échantillonné en  $N_2$ .