



HAL
open science

Étude et réalisation d'une instrumentation en vue de l'analyse du comportement d'une presse haute pression grand volume

Denis Khalifa

► **To cite this version:**

Denis Khalifa. Étude et réalisation d'une instrumentation en vue de l'analyse du comportement d'une presse haute pression grand volume. Electronique. 2014. dumas-01324825

HAL Id: dumas-01324825

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01324825>

Submitted on 1 Jun 2016

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL RHÔNE-ALPES

CENTRE D'ENSEIGNEMENT DE GRENOBLE

MEMOIRE

présenté par **Denis Khalifa**

en vue d'obtenir

LE DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.

en Electronique - Automatique

option : Electronique

**Etude et réalisation d'une instrumentation en vue de
l'analyse du comportement d'une presse haute pression
grand volume**

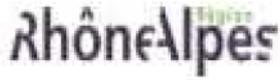
Soutenu le 24 juin 2014

JURY

Président : Catherine ALGANI
Membres : Claude DELPUECH
Thierry FALQUE

Professeur, CNAM, Paris
Docteur Ingénieur, INSERM, Lyon
Directeur Développement Analogique,
STMicronics, Grenoble
Directeur groupe AAM, ESRF, Grenoble
Docteur Ingénieur, ESRF-AAM, Grenoble

Invités : Yves DABIN
Marc DIOT



CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL RHÔNE-ALPES

CENTRE D'ENSEIGNEMENT DE GRENOBLE

MEMOIRE

présenté par **Denis Khalifa**

en vue d'obtenir

LE DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.

en Electronique – Automatique

option : Electronique

**Etude et réalisation d'une instrumentation en vue de
l'analyse du comportement d'une presse haute pression
grand volume**

Soutenu le 24 juin 2014

Les travaux relatifs à ce mémoire ont été effectués à l'ESRF Grenoble
sous la direction du Docteur Ingénieur Marc DIOT

1 Remerciements

J'exprime tous mes remerciements aux membres du jury et notamment à Monsieur Delpuech, responsable du service de Magnétoencéphalographie (MEG) de l'INSERM de Lyon, pour l'intérêt qu'il a immédiatement porté au sujet de ce stage, son suivi et sa compréhension.

Je tiens tout particulièrement à remercier Marc Diot, Docteur ingénieur au sein du groupe d'Analyse et de Modélisation Avancées (AAM) de l'ESRF, sans qui ce stage n'aurait pas eu lieu, pour son soutien sans faille, et le temps consacré à répondre à mes nombreuses questions. Il a su faire de ce travail une expérience réellement enrichissante non seulement sur les plans scientifiques et techniques mais également humain.

Je veux également remercier très sincèrement Yves Dabin, responsable du groupe AAM de m'avoir accordé sa confiance, partagé ses connaissances dans des domaines techniques qui m'étaient totalement inconnus et grâce à qui je me suis senti immédiatement intégré au sein de son service.

En ce qui concerne la partie expérimentale de ce travail, je remercie Wilson Crichton et Jérémie Guignard, Scientifiques travaillant sur la ligne de lumière ID06 pour l'aide qu'ils m'ont apporté afin de pouvoir réaliser les essais nécessaires à cette étude et auprès desquels toutes mes questions ont trouvées des réponses.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Myriam Perrin du service des Ressources Humaines pour son accueil et son support tout au long de ma présence au sein de l'ESRF.

Merci à Véronique Marie-Olive et à Nathalie Naimoz, secrétaires au CNAM de Grenoble, pour leur aide efficace et précieuse.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein de l'ESRF, grâce à la sympathie du personnel que j'ai pu côtoyer durant ma présence.

Je ne saurai commencer ce mémoire sans remercier ma famille et mes amis pour leur patience et leur soutien inconditionnel durant ces longues années.

TABLE DES MATIERES :

<u>1</u>	<u>REMERCIEMENTS</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>INTRODUCTION</u>	<u>8</u>
2.1	OBJECTIF DU STAGE	10
2.2	PLAN DU MEMOIRE	10
<u>3</u>	<u>CAPTEUR - JAUGE DE CONTRAINTE</u>	<u>12</u>
3.1	INTROCUCTION	12
3.2	DEFINITIONS	12
3.3	TECHNOLOGIES	13
3.4	PRINCIPE DES JAUGE DE CONTRAINTE RESISTIVES	16
3.5	FACTEUR DE JAUGE	19
3.6	SENSIBILITE	22
3.7	ÉTENDUE DE MESURE	24
3.8	LINEARITE	24
3.9	HYSTERESIS	25
3.10	SENSIBILITE TRANSVERSALE	26
3.11	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE	29
3.12	FLUAGE ELASTIQUE	31
3.13	BANDE PASSANTE	34
3.14	TEMPS DE REPONSE - RAPIDITE	36
3.15	SUPPORT – COLLE – VERNIS	37
3.16	INFLUENCE DES CONDITIONS AMBIANTES	38
3.17	VALEUR NOMINALE DE LA RESISTANCE D'UNE JAUGE DE CONTRAINTE	40
3.18	PUISSANCE DISSIPEE	41
3.19	ROSETTE DE JAUGE DE CONTRAINTE	41
<u>4</u>	<u>CARACTERISATION DE LA CHAINE D'ACQUISITION</u>	<u>46</u>
4.1	INTRODUCTION	46
4.2	STRUCTURE PHYSIQUE DE LA CHAINE D'ACQUISITION	46
4.3	STRUCTURE ELECTRIQUE DE LA CHAINE D'ACQUISITION	48
4.4	CARACTERISTIQUES FREQUENTIELLES DE LA CHAINE D'ACQUISITION	50
4.5	STRUCTURE INFORMATIQUE DE LA CHAINE D'ACQUISITION	51
<u>5</u>	<u>TRAITEMENT DES SIGNAUX ISSUS DE L'AUTOMATE PILOTANT LA PRESSE</u>	<u>53</u>
5.1	INTRODUCTION	53
5.2	CHOIX DES ESSAIS ETUDIES	54
5.3	OBSERVATION DU SIGNAL MAIN PRESSURE (MP)	55
5.4	DEFINITION DE LA CONSIGNE DE PRESSION	57
5.5	MODELISATION DE LA TENDANCE DU SIGNAL MP	58
5.6	TEMPS DE CORRELATION DU SIGNAL MPs	77
5.7	METHODE DE MODELISATION DE LA TENDANCE DU SIGNAL MP RETENUE	78
5.8	SEGMENTATION DU SIGNAL MPs	78
5.9	AMELIORATION DE LA MODELISATION DE LA TENDANCE DU SIGNAL MP PAR MOYENNE GLISSANTE	79

5.10	STATIONNARITE DU SIGNAL MPs	82
5.11	DETERMINATION DE LA DENSITE DE PROBABILITE DU BRUIT DE MPs	83
5.12	ESTIMATION DES GRANDEURS SPECTRALES DU SIGNAL MPs	86
5.13	CORRELOGRAMME	89
5.14	PERIODOGRAMME MOYENNE	92
5.15	ANALYSE TEMPS – FREQUENCE	99
5.16	OBSERVATION DU SIGNAL « MAIN DISPLACEMENT » (MD)	104
6	<u>TRAITEMENT DES SIGNAUX ISSUS DE L'INSTRUMENTATION DE LA PRESSE</u>	108
6.1	INTRODUCTION	108
6.2	CHOIX DS ESSAIS ETUDIES	108
6.3	CONFIGURATIONS DES MESURES	110
6.4	ETUDE DES SIGNAUX ISSUS DES ROSETTES DISPOSEES SUR L'OUTIL D-DIA	111
6.5	PRESENTATIONS DES TRAITEMENTS REALISES	115
6.6	FILTRAGE DES SIGNAUX DE DEFORMATION	118
6.7	DETERMINATION DES DEFORMATIONS, CONTRAINTES ET DIRECTIONS PRINCIPALES	121
6.8	MODELISATION DE LA TENDANCE DU SIGNAL DE CONTRAINTE σ PAR MOYENNE GLISSANTE	134
6.9	ANALYSE DES EVENEMENTS BREFS	148
6.10	ANALYSE DES PHENOMENES DE FRICTION	155
6.11	ETUDE DES SIGNAUX ISSUS DES JAUGES DISPOSEES SUR LES PILIERS	156
6.12	DETERMINATION DES DEFORMATIONS ET DES CONTRAINTES	161
7	<u>CONCLUSION</u>	167
8	<u>ABREVIATIONS</u>	169
9	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	170

Liste des figures :

Figure 2.1-1 : Presse Mavo LPO 2000-1000/200	8
Figure 2.1-2 : Principe de fonctionnement de la presse LVP	9
Figure 2.1-3 : Renvoi des forces assuré par l'outil D-DIA	9
Figure 3.3-1 : Structure du capteur à semi-conducteur	13
Figure 3.3-2 : Caractéristiques de sortie des capteurs à semi-conducteur	14
Figure 3.3-3 : Jauge de contrainte optique	14
Figure 3.3-4 : Structure du capteur à fibre optique	14
Figure 3.3-5 : Principe de fonctionnement du capteur à fibre optique	15
Figure 3.3-6 : Types de jauge résistive	15
Figure 3.3-7 : Jauge résistive à trame	16
Figure 3.4-1 : Traction sur un brin de section circulaire	17
Figure 3.4-2 : Traction sur un brin de section rectangulaire	18
Figure 3.5-1 : Mise en œuvre d'une jauge de contrainte	19
Figure 3.5-2 : Principe d'une jauge à trame	20
Figure 3.6-1 : Caractéristique d'un capteur	23
Figure 3.8-1 : Linéarité d'un capteur	25
Figure 3.9-1 : Courbe d'hystérésis de la sensibilité d'une jauge de contrainte	25
Figure 3.10-1 : Sensibilité transversale	26
Figure 3.10-2 : Localisation des effets de la déformation transversale	26
Figure 3.11-1 : Réponse en température des jauge installées sur les piliers de la presse LVP	31
Figure 3.12-1 : Courbe de fluage d'un matériau	31
Figure 3.12-2 : Illustration de phénomène de relaxation support et colle	32
Figure 3.12-3 : Courbe de fluage d'une jauge résistive	32
Figure 3.12-4 : Compensation des fluages respectifs du matériau et de la jauge	32
Figure 3.12-5 : Intensité du phénomène de fluage d'une jauge à différentes températures	33
Figure 3.12-6 : Caractéristique de fluage d'une jauge en fonction de ses dimensions	33
Figure 3.13-1 : Onde de déformation de même longueur que la grille	34
Figure 3.13-2 : Erreur relative sur la mesure de déformation en fonction de la longueur d'onde	35
Figure 3.14-1 : Réponse d'un système linéaire à un échelon	36
Figure 3.14-2 : Rapidité d'un système linéaire	37
Figure 3.19-1 : Exemple de rosette T du constructeur HBM	41
Figure 3.19-2 : Exemple de rosette à trois grilles du constructeur HBM	42
Figure 3.19-3 : Base principale des déformations mesurées par une rosette	43
Figure 4.2-1 : Structure physique de la chaîne d'acquisition	46
Figure 4.3-1 : Structure électrique de la chaîne d'acquisition	48
Figure 4.4-1 : Caractéristiques fréquentielles de la chaîne d'acquisition	50
Figure 4.5-1 : Structure informatique de la chaîne d'acquisition	51
Figure 5.1-1 : Cube d'aluminium	53
Figure 5.1-2 : Assemblage d'un groupe de 8 enclumes secondaires	53
Figure 5.3-1 : Signal « Main Pressure MP » - Essai_1 et Essai_2	55
Figure 5.3-2 : Fermeture de l'outil D-DIA – Essai_1 et Essai_2	56
Figure 5.3-3 : Influence des corrections de forces sur le signal MP – Essai_1	57
Figure 5.5-1 : Exemple de régression linéaire	59
Figure 5.5-2 : Modélisation de la tendance du signal MP par régression linéaire – Essai_1	60
Figure 5.5-3 : Mise en évidence de la présence d'échelons dans le signal MP - Essai_1	60
Figure 5.5-4 : Régression linéaire : Signal MPs - Essai_1 et 2	61
Figure 5.5-5 : Régression linéaire : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2	62
Figure 5.5-6 : Régression Linéaire : Autocorrélation du signal MPs – Essai_1	66
Figure 5.5-7 : Régression Linéaire : Autocorrélation du signal MPs – Essai_2	66
Figure 5.5-8 : Variation de l'amplitude des échelons du signal Mp – Essai_1	68
Figure 5.5-9 : Décalage temporel de la rampe en échelons lors d'une correction - Essai_1	69
Figure 5.5-10 : Rampe d'échelons : Signal MPs - Essai_1 et 2	69
Figure 5.5-11 : Rampe d'échelons : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2	70
Figure 5.5-12 : Rampe d'échelons : Autocorrélation du signal MPs - Essai_2	71
Figure 5.5-13 : Modélisation de la tendance du signal MP par moyenne glissante – Essai_1	72
Figure 5.5-14 : Modélisation par moyenne glissante décalée de 6 échantillons - Essai_1	73
Figure 5.5-15 : Moyenne glissante : Signal MPs - Essai_1 et 2	74
Figure 5.5-16 : Moyenne glissante : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2	74
Figure 5.5-17 : Moyenne glissante : Autocorrélation du signal MPs - Essai_1	76

Figure 5.5-18 : Moyenne glissante : Autocorrélation du signal MPs - Essai_2	76
Figure 5.8-1 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 6 éch.	79
Figure 5.8-2 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5 éch	79
Figure 5.9-1 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. par calcul	80
Figure 5.9-2 : Ecart types des blocs Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. par calcul	80
Figure 5.9-3 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Signal MPs - Essai_1 et 2	81
Figure 5.9-4 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2	81
Figure 5.11-1 : Loi Normale centrée réduite	83
Figure 5.11-2 : Fonction de répartition loi Normale centrée réduite	84
Figure 5.11-3 : Principe de la droite d'Henry	84
Figure 5.11-4 : Droite d'Henry - Essai_1	85
Figure 5.11-5 : Droite d'Henry – Essai_2	85
Figure 5.13-1 : Calcul du Corrélogramme	89
Figure 5.13-2 : Biais et variance d'un estimateur	90
Figure 5.13-3 : Corrélogramme du signal MPs– Essai_1 et 2	92
Figure 5.14-1 : Calcul du Périodogramme moyenné	93
Figure 5.14-2 : Segmentation d'un signal	93
Figure 5.14-3 : Compromis biais / variance – Périodogramme moyenné	95
Figure 5.14-4 : Périodogramme moyenné du signal MPs - Essai_1	97
Figure 5.14-5 : Périodogramme moyenné du signal MPs - Essai_2	97
Figure 5.14-6 : Pouvoir de résolution – critère de Rayleigh	98
Figure 5.15-1 : Résolution temps - fréquence	100
Figure 5.15-2 : Fenêtre de Hamming	102
Figure 5.15-3 : Spectrogramme du signal MPs – Essai_1 et 2	103
Figure 5.16-1 : Signal « Main Pressure MD » - Essai_1 et Essai_2	104
Figure 5.16-2 : Signal MD : Phase de compression Essai_1 et 2	105
Figure 5.16-3 : Phénomènes de friction lors du confinement Essai_2	106
Figure 5.16-4 Amplitude des phénomènes de friction lors des Essai_1 et 2	106
Figure 6.3-1 : Disposition des capteurs sur l'outil D_DIA et sur les piliers	111
Figure 6.4-1 : Signaux de déformation rosette DDL_W1 - Essai_1	112
Figure 6.4-2 : Signaux de déformation rosette DDL_S2 - Essai_1	112
Figure 6.4-3 : Signaux de déformation rosette DDL_W1 - Essai_2	112
Figure 6.4-4 : Signaux de déformation rosette DDU_W1 - Essai_2	112
Figure 6.5-1 : Durée d'observation minimale et maximale	116
Figure 6.6-1 : Autocorrélation signal σ sans filtrage – DDL_W1 Essai_1	118
Figure 6.6-2 : Corrélogramme du signal σ sans filtrage -DDL_W1 Essai_1	119
Figure 6.6-3 : Corrélogramme du signal σ_0 Essai_1	120
Figure 6.7-1 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDL_W1 - Essai_1	122
Figure 6.7-2 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDL_S2 - Essai_1	122
Figure 6.7-3 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDL_W1 - Essai_2	123
Figure 6.7-4 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDU_W1 - Essai_2	123
Figure 6.7-5 : Evolution des contraintes durant la compression – Essai_1	127
Figure 6.7-6 : Evolution des contraintes durant la compression – Essai_2	128
Figure 6.7-7 : Valeurs de contraintes en fin de compression – Essai_1	129
Figure 6.7-8 : Valeurs de contrainte obtenues en fin de compression sur outil supérieur – Essai_2	130
Figure 6.7-9 : Tracé des contraintes et déformations DDL_W1 et DDL_S2 (17990 s)	132
Figure 6.7-10 : Caractéristiques contrainte-déformation – Essai_1 et 2	133
Figure 6.7-11 : Caractéristiques contrainte-pression hydraulique Essai_1 et 2	133
Figure 6.8-1 : Signal σ et std obtenu par moyenne glissante – Essai_1	135
Figure 6.8-2 : Signal σ et std obtenu par moyenne glissante – Essai_2	135
Figure 6.8-3 : Signal σ_0 - Essai_1	137
Figure 6.8-4 Signal σ_0 - Essai_2	137
Figure 6.8-5 : Distribution des amplitudes du signal σ_0 - Essai_1	138
Figure 6.8-6 : Distribution des amplitudes du signal σ_0 - Essai_2	138
Figure 6.8-7 : Autocorrélation du signal σ_0 - Essai_1	140
Figure 6.8-8 : Autocorrélation du signal σ_0 - Essai_2	140
Figure 6.8-9 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2	141
Figure 6.8-10 : Ecart types des blocs - Essai_1 et 2	142
Figure 6.8-11 : Droite d'Henry - Essai_1	143
Figure 6.8-12 : Droite d'Henry – Essai_2	143
Figure 6.8-13 : Corrélogramme du signal σ_0 – Essai_1	145

Figure 6.8-14 : Corrélogramme du signal σ_0 - Essai_2	145
Figure 6.8-15 : Périodogramme moyenné du signal σ_0 - Essai_1	147
Figure 6.8-16 : Périodogramme moyenné du signal σ_0 - Essai_2	147
Figure 6.9-1 : Evénements brefs présents sur les signaux ε , σ et ϕ – Essai_1 et 2	148
Figure 6.9-2 : Evénement bref présents sur le signal σ – Essai_1	149
Figure 6.9-3 : Evénement bref présents sur le signal σ_0 – Essai_2	149
Figure 6.9-4 : Evénement bref présents sur le signal σ_0 – Essai_1	150
Figure 6.9-5 : Evénement bref présent sur le signal σ_0 – Essai_2	150
Figure 6.9-6 : Perte de stationnarité d'ordre 1 lors d'un événement bref en début de compression _ Essai_2	151
Figure 6.9-7 : Ecart types des segments du signal σ_0 comportant un événement bref – Essai_1 et 2	151
Figure 6.9-8 : Courbes de Bollinger – Essai_1 et 2	153
Figure 6.9-9 : Spectrogramme du signal σ_0 en présence d'un événement bref – Essai_1	154
Figure 6.9-10 : Spectrogramme du signal σ_0 en présence d'un événement bref – Essai_2	154
Figure 6.10-1 : Phénomènes de friction sur les signaux σ et σ_{td} – Essai_1 et 2	155
Figure 6.10-2 Perte de stationnarité d'ordre 1 lors de phénomène de friction - Essai_1 et 2	156
Figure 6.11-1 : Signaux jauges Pilier W - Essai_3	157
Figure 6.11-2 : Signaux jauges Pilier S - Essai_3	157
Figure 6.11-3 : Signaux jauges Pilier E - Essai_3	157
Figure 6.11-4 : Signaux jauges Pilier N - Essai_3	157
Figure 6.11-5 : Signal de pression hydraulique MP – Essai_3	158
Figure 6.11-6 : Signal de déplacement du piston principal MD – Essai_3	159
Figure 6.11-7 : Evénement bref sur jauge 1 du pilier ouest (W1) – Essai_1	160
Figure 6.12-1 : Caractéristiques contrainte-pression hydraulique Essai_3	163
Figure 6.12-2 : Valeurs de contraintes en fin de compression – Essai_3	164
Figure 6.12-3 : Phénomène de flambage et déformations	165
Figure 6.12-4 : Simulation par éléments finis de la déformation d'un pilier	166

Liste des tableaux

Tableau 5.2-1 : Données principales des essais étudiés	54
Tableau 5.5-1 : Régression Linéaire : Valeurs caractéristiques du signal MPs – Essai_1 et 2	62
Tableau 5.5-2 : Rampe d'échelons : Valeurs caractéristiques du signal Mps -- Essai_1 et 2	70
Tableau 5.5-3 : Moyenne glissante : Valeurs caractéristiques du signal Mps - Essai_1 et 2	75
Tableau 5.9-1 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Valeurs caractéristiques du signal Mps Essai_1 et 2	82
Tableau 5.16-1 : Caractéristiques des phénomènes de friction.....	107
Tableau 6.2-1 : Données principales des essais étudiés	109
Tableau 6.7-1 : Valeurs des signaux ε , σ , et ϕ au cours de la compression - Essai_1	124
Tableau 6.7-2 : Valeurs des signaux ε , σ , et ϕ au cours de la compression - Essai_2	125
Tableau 6.7-3 : Valeurs des déformations et contraintes rosettes DDL_W1 et DDL_W2 (17990 s)	131
Tableau 6.8-1 : Symétrie de la distribution des valeurs d'amplitude du signal σ_0 – Essai_1 et 2	138
Tableau 6.8-2 : Valeurs caractéristiques du signal σ_0 - Essai_1 et 2.....	139
Tableau 6.12-1 : Etats des signaux ε et σ au cours de la compression - Essai_3.....	162

2 Introduction

L'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), Synchrotron de Grenoble, est un organisme européen, mettant à disposition des scientifiques et des industriels une des sources de rayon X les plus intenses. Cette source permet d'observer la matière. Parmi les domaines de recherche qui sont intéressés par l'utilisation d'une telle source de rayons X citons :

- La chimie
- La biologie
- La physique
- Les sciences de la Terre

C'est à l'étude de ce dernier domaine qu'est dévolue la presse « haute pression grand volume » ou *Large Volume Press (LVP)* installée sur la ligne de lumière (*beamline*) ID06. Les lignes de lumière sont des zones d'expériences tangentes à l'anneau où circulent les électrons produisant le rayonnement synchrotron.

Cette presse LVP est dénommée « grand volume » car elle permet de recréer les conditions de pression et de température régnant dans le manteau terrestre à une profondeur de l'ordre de 200 à 400 km, sur des échantillons géologiques de quelques mm³ considérés comme étant relativement volumineux. Ces échantillons peuvent être soumis à des pressions pouvant atteindre, selon leur volume, jusqu'à 80 GPa et ils peuvent être chauffés à une température de l'ordre de 1500 °C.

Ci-dessous figure la presse et les principaux éléments de sa structure.

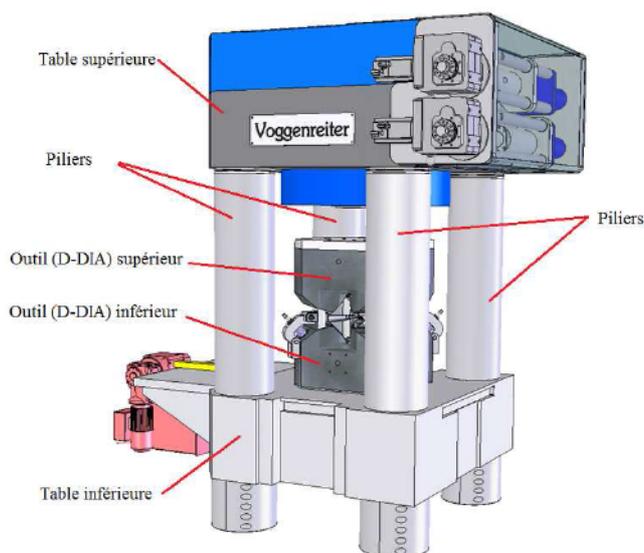


Figure 2.1-1 : Presse Mavo LPO 2000-1000/200

Ses dimensions sont de 3 x 3 x 2 m pour un poids de 38 tonnes.

Afin d'obtenir de telles conditions sur l'échantillon, la presse LVP, dont les caractéristiques figurent en annexe, est capable d'exercer sur l'outil qu'elle renferme et au centre duquel est placé l'échantillon géologique, une force pouvant atteindre 2000 tf (20 MN). Cette force est appliquée par l'intermédiaire d'un piston principal comme cela est illustré ci-après.

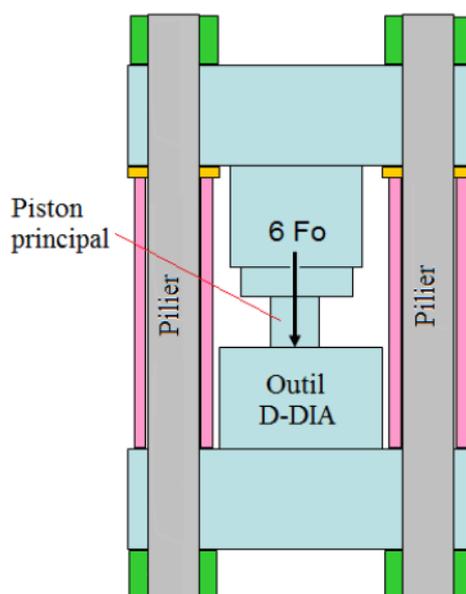


Figure 2.1-2 : Principe de fonctionnement de la presse LVP

Les dimensions de l'outil sont de 805 x 805 x 855 mm pour un poids de 2,5 tonnes. Sa fonction est double :

- Permettre le passage du faisceau de rayons X à travers l'échantillon.
- Assurer, par sa forme géométrique, le renvoi de la force exercée par le piston principal sur les 6 faces d'un cube renfermant l'échantillon.

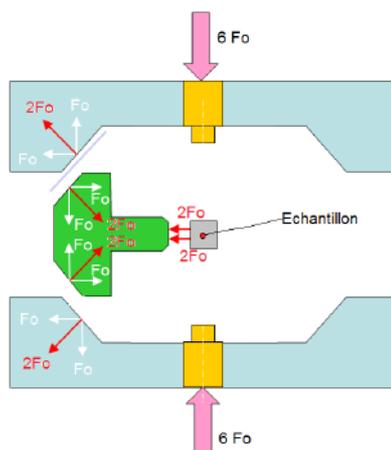


Figure 2.1-3 : Renvoi des forces assuré par l'outil D-DIA

Les caractéristiques techniques de la presse sont disponibles dans l'annexe I.

2.1 Objectif du stage

L'objectif de ce stage est de réaliser, au moyen d'une chaîne d'acquisition basée sur des capteurs jauges de contrainte, la surveillance des déformations subies par l'outil afin de s'assurer que celui-ci reste dans sa zone de déformation élastique. Ceci garantissant que ces déformations disparaissent dès la suppression des contraintes exercées par le piston principal.

Cette instrumentation doit également permettre de surveiller l'état structurel de la presse et notamment des piliers.

Elle peut aussi nous renseigner sur l'évolution au cours du temps des caractéristiques d'utilisation de la presse LVP et offrir ultérieurement le moyen de réaliser des études de fatigue.

Ce projet a été attribué au groupe Advanced Analysis & Modeling (AAM), sous la responsabilité de MM Yves Dabin et Marc DIOT avec qui j'ai collaboré durant cette étude.

2.2 Plan du mémoire

Dans le troisième chapitre nous étudierons le capteur jauge de contrainte, premiers maillons de notre chaîne d'acquisition. Le chapitre numéro quatre décrira la chaîne d'acquisition en détaillant les configurations de mesures adoptées lors de nos essais, la nature et les niveaux des signaux électriques, l'environnement informatique et ses contraintes, et nous permettra d'identifier les deux sources de signaux que sont l'automate pilotant la presse et le système d'acquisition. Les cinquième et sixième chapitres décriront les traitements réalisés sur les signaux provenant de ces deux sources. En conclusion, nous synthétiserons les résultats obtenus et donnerons des perspectives de traitements qui nous sembleraient intéressantes à explorer.

Les annexes A et B abordent, d'une part la Rhéologie et d'autre part, la notion de tenseur, venant en complément du troisième chapitre traitant des jauges de contrainte et permettant d'interpréter les résultats que nous avons obtenus. Dans l'annexe C nous décrivons une étude pratique réalisée sur une lame instrumentée afin de nous familiariser avec les mesures de déformation et de mettre à profit le retard pris par la société HBM dans l'installation des jauges sur la presse. Durant cette même période, des mesures de vibration ont été réalisées sur la presse et nous avons conduit une étude sur la chaîne d'acquisition utilisée comprenant des géophones et accéléromètres faisant l'objet de l'annexe D. Le pont de Wheathstone, conditionneur des signaux issus des jauges et le convertisseur analogique-numérique de type sigma delta font l'objet d'une étude respectivement

dans les annexes E et F en complément de la caractérisation de la chaîne d'acquisition réalisée au quatrième chapitre. L'annexe G comporte une étude sur le filtrage numérique et nous y développons un filtre coupe bande permettant d'éliminer des signaux de déformation, les signaux parasites provenant du réseau d'alimentation 50 Hz et un filtre moyenneur utilisé lors de la modélisation de la tendance des signaux recueillis. Les codes développés sous Matlab ® nous ayant permis de réaliser les traitements et filtrages décrits dans cette étude figurent en annexe H. Enfin, l'annexe I regroupe les diverses fiches constructeurs ainsi que le rapport d'intervention de la société HBM.

3 Capteur - Jauge de contrainte

3.1 Introduction

Nous nous intéressons dans ce chapitre à l'étude du capteur, premier élément d'une chaîne d'acquisition. Nous présentons, dans un premier temps, un panorama des divers capteurs de déformation disponibles aujourd'hui.

Lors de l'instrumentation de la presse LVP, objet de cette étude, ce sont des jauges de contrainte qui ont été installées. Afin de détailler leur fonctionnement et leurs caractéristiques, ce chapitre utilise des notions qui ont fait l'objet de développements dans les annexes de ce mémoire et auxquels le lecteur pourra se reporter.

Ainsi, le vocabulaire spécifique au domaine de la mesure de contraintes, les notions élémentaires de déformation élastique, plastique ainsi que les principes essentiels de Rhéologie (Lois de Hooke, de Poisson...) sont définis et exposés dans l'annexe A.

De même, il est fait référence aux notions de base vectorielle propre, de déformation et contrainte principales, de produit entre les vecteurs et les tenseurs d'ordre 2,... également exposées dans l'annexe A.

3.2 Définitions

Capteur :

« Le capteur est un dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) » [1]

Dans cette étude nous nous intéresserons à un capteur en particulier : La jauge de contrainte, capteur dont la résistance électrique varie en fonction de la variation relative de l'élongation subie (déformation).

Cela se traduit par la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2-1)$$

Le paramètre k, dénommé le facteur de jauge, représente la sensibilité de ce capteur.

Très utilisé notamment dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de la surveillance d'édifices (ponts, bâtiments...).

3.3 Technologies

Plusieurs technologies de jauge de contrainte existent :

3.3.1 Semi-conducteur :

Cette technologie est basée sur l'effet piezorésistif des semi-conducteurs.

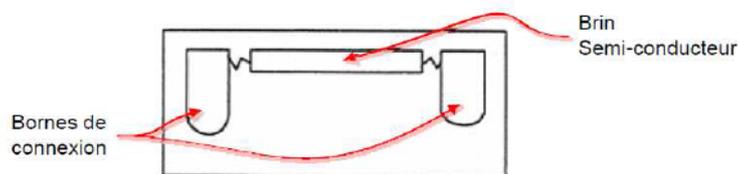


Figure 3.3-1 : Structure du capteur à semi-conducteur

La structure cubique et symétrique du silicium entraîne une conduction σ identique selon les trois directions spatiales. Dans une direction donnée celle-ci est donnée par :

$$\sigma = en(\mu_{\perp} + 2\mu_{//}) \quad (3.3-1)$$

Avec :

- e : Charge de l'électron : $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C.
- n : Densité volumique d'électron.
- μ_{\perp} : Mobilité des électrons selon les directions perpendiculaires.
- $\mu_{//}$: Mobilité des électrons selon la direction considérée.

L'application d'une contrainte selon une des trois directions va modifier les dimensions du réseau cristallin selon cette direction, entraînant un transfert d'électrons vers les deux autres directions. Les conductions seront alors modifiées en proportion.

La caractéristique de sortie de ce type de capteur présentée ci-dessous est fonction du dopage, P ou N.

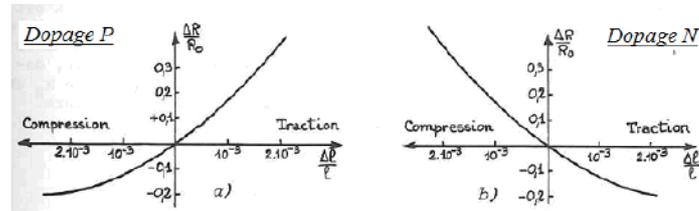


Figure 3.3-2 : Caractéristiques de sortie des capteurs à semi-conducteur

3.3.2 Fibre optique :

La figure ci-dessous détail le principe de fonctionnement de ce type de capteur.



Figure 3.3-3 : Jauge de contrainte optique

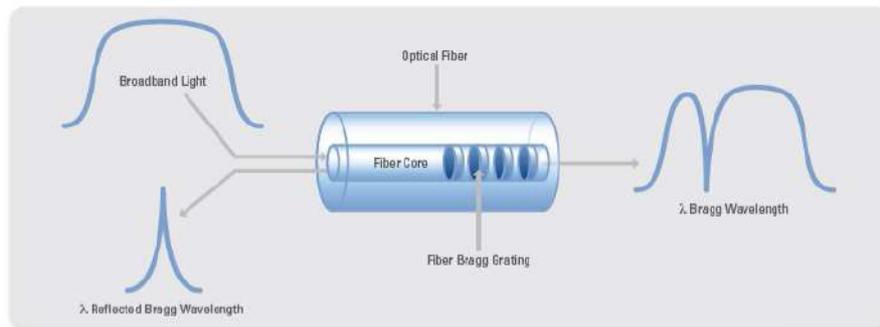


Figure 3.3-4 : Structure du capteur à fibre optique

La fibre optique (« Optical Fiber ») intègre en son sein (« Fiber Core ») un réseau de Bragg (« Fiber Bragg Grating ») dont la propriété est de ne réfléchir qu'une seule longueur d'onde (« λ Reflected Bragg Wavelength »), λ_B , de la lumière émise par la source polychromatique (« Broadband Light ») placé en entrée de cette fibre. La Figure 3.3-4, présente également l'allure du spectre lumineux en sortie de la fibre (« λ Bragg Wavelength ») duquel la longueur d'onde λ_B est fortement atténuée.

λ_B est donnée par :

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (3.3-2)$$

Avec :

- n : Indice de réfraction du cœur de la fibre.
- Λ : Pas du réseau de Bragg.

Sous l'effet d'une déformation, le pas Λ se trouvera modifié, décalant ainsi la longueur d'onde réfléchie λ_B .

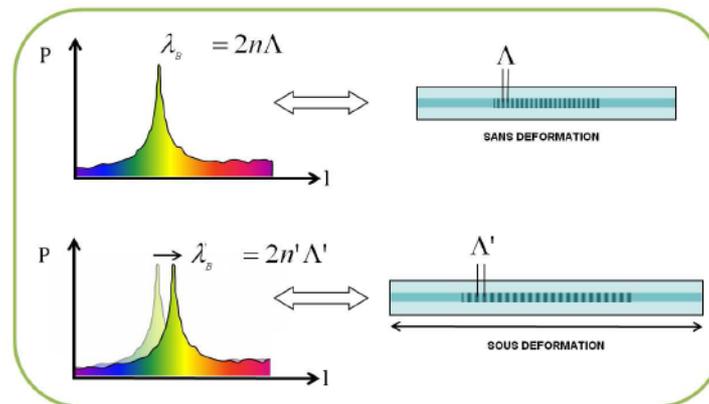


Figure 3.3-5 : Principe de fonctionnement du capteur à fibre optique

Son principal avantage est une insensibilité aux perturbations électriques rayonnées.

Le couplage capteur - structure à surveiller, doit permettre de transmettre le plus fidèlement possible au capteur les déformations subies par la structure. Par rapport à celui des jauges résistives, ce couplage est de bien moindre qualité dans le cas des capteurs à fibre optique avec pour conséquence des performances inférieures.

3.3.3 Les jauges résistives :

Leur fonctionnement est basé sur l'effet piezorésistif des métaux. Effet découvert par W.Thomson (1856) remarquant que la résistance de fils conducteurs varie lorsqu'ils sont étirés. Les premières jauge de contrainte sont à fil. Réalisées par Simmons et Ruge du MIT en 1930, elles sont constituées d'un fil fixé sur un support. Les jauges à trame pelliculaire font leur apparition en 1952 (Sanders et Moe) et sont toujours utilisées. Elles sont réalisées par photogravure, technique empruntée à la fabrication des circuits imprimés. La longueur des brins de la grille peut aller de 1,5 mm à 150 mm permettant ainsi d'instrumenter tous types de structure. Leur durée de vie est de l'ordre de 10^6 à 10^7 cycles pourvu que les déformations auxquelles est soumise la grille de mesure restent bien inférieures à la déformation maximale tolérée. Enfin le coût de type de capteur est très faible (quelques euros).

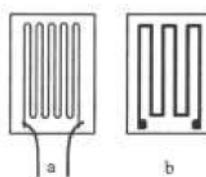


Fig. 2 Jauges résistives: a) à grille, b) à trame.

Figure 3.3-6 : Types de jauge résistive

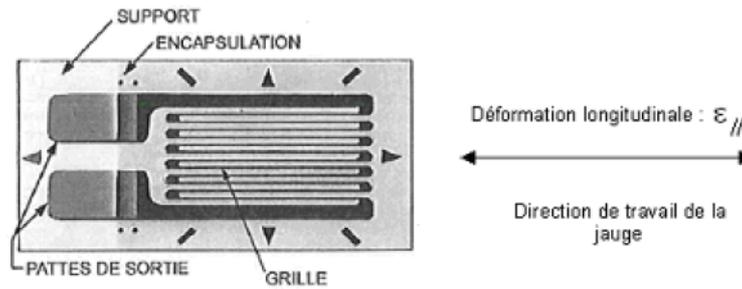


Figure 3.3-7 : Jauge résistive à trame

L'instrumentation de la pesse LVP ayant été réalisé avec ce dernier type de capteur, nous allons consacrer la suite de ce chapitre à son étude, en en étudiant tout d'abord la physique.

3.4 Principe des jauge de contrainte résistives

Sous une contrainte mécanique, un matériau piézorésistif, voit sa géométrie, et par conséquent, son volume modifiés. Cette variation ΔV du volume V du matériau entraîne à son tour une variation $\Delta \rho$ de sa résistivité ρ selon la loi de Bridgman :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} \quad (3.4-1)$$

Avec :

- C : Constante de Bridgman ($C \approx 1$ pour les métaux, $C \approx 100$ pour les semi-conducteurs).

Dans ce qui suit nous ne nous intéresserons uniquement aux jauges de contrainte dont la grille est à base d'alliages métalliques. La direction des déformations mesurées est celle de la longueur de la grille. La résistance électrique de la grille en fonction de sa longueur L et de sa section S , est donnée par :

$$R = \rho n \frac{L}{S} \quad (3.4-2)$$

Avec :

- n : Nombre de brins longitudinaux formant la grille du capteur.

La variation relative de la résistivité entraîne une variation relative de résistance qui, pour un brin, est donnée par la dérivée logarithmique de sa résistance $R = f(\rho, L, S)$. La dérivée logarithmique d'un produit étant égale la somme des dérivées logarithmiques des facteurs, nous avons :

$$(\ln R)' = \frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.4-3)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.4-4)$$

Un métal soumis à une contrainte longitudinale verra sa longueur augmenter de $\varepsilon_{//} = \Delta L / L$ et sa section diminuer de $\varepsilon_{\perp} = \Delta S / S$ sous l'effet d'une contrainte transversale associée. Remarquons que ε_{\perp} représente les deux directions spatiales ε_t perpendiculaires à $\varepsilon_{//}$. Ces déformations suivent la loi de Poisson, soit :

$$\varepsilon_t = -\nu \varepsilon_{//} \quad (3.4-5)$$

D'où :

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} = -2\nu \varepsilon_{//} \quad (3.4-6)$$

Avec :

- ν : Coefficient de Poisson ($\nu \approx 0,3$ pour les métaux).

Dans le domaine élastique, où les déformations subies sont réversibles, la mécanique décrit qu'une traction longitudinale est associée une compression transversale.

Nous pouvons conduire ce calcul pour deux géométries différentes du brin :

- Section circulaire : correspondant à la technologie des jauges à fil. La grille est alors constituée d'un fil métallique d'un diamètre de l'ordre de 20 μm .
- Section rectangulaire : correspondant à la technologie des jauges à trame pelliculaire dont la grille est fabriquée à partir d'un ruban métallique, de type circuit imprimé, d'une épaisseur de l'ordre de 2 à 35 μm .

Section circulaire :

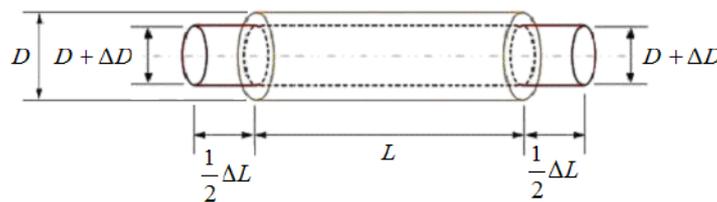


Figure 3.4-1 : Traction sur un brin de section circulaire

La section est donnée par :

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.4-7)$$

Et le volume par :

$$V = LS = L \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.4-8)$$

Nous en déduisons la variation de section :

$$\Delta S = \frac{\pi}{4} \Delta(D^2) = \frac{\pi}{2} D(\Delta D) \quad (3.4-9)$$

Ainsi que la variation de volume :

$$\Delta V = \Delta(SL) = S \cdot \Delta L + L \cdot \Delta S \quad (3.4-10)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} \quad (3.4-11)$$

La loi de Poisson nous permet d'écrire :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\frac{\pi}{2} D(\Delta D)}{\frac{\pi}{4} D^2} = 2 \frac{\Delta D}{D} = \varepsilon_{\perp} = 2\varepsilon_t = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-12)$$

Le matériau étant de nature piézorésistive, cela entraîne, selon la loi de Bridgman :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} = C(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-13)$$

Par identification à l'équation (3.4-4), nous obtenons :

$$\frac{\Delta R}{R} = [1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)] \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-14)$$

Section rectangulaire :

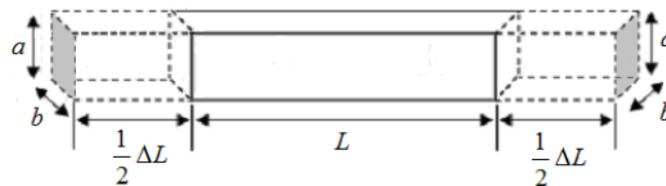


Figure 3.4-2 : Traction sur un brin de section rectangulaire

Ici, la section et le volume sont donnés par :

$$S = ab \quad (3.4-15)$$

$$V = LS = Lab \quad (3.4-16)$$

Calculons la dérivée logarithmique de V :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \quad (3.4-17)$$

La loi de Poisson supposant une déformation ε_{\perp} identique dans toutes les directions perpendiculaires à celle de la contrainte, nous pouvons écrire :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = -\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-18)$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} = -2\nu \varepsilon_{\parallel} \quad (3.4-19)$$

Dans le cadre de la section rectangulaire, la loi de Bridgman s'exprime alors par :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} = C(1-2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-20)$$

Nous retrouvons la relation (3.4-14) obtenue pour une section circulaire:

$$\frac{\Delta R}{R} = [1 + 2\nu + C(1-2\nu)] \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-21)$$

Ainsi la variation relative de résistance de la grille d'une jauge de contrainte soumise à une déformation longitudinale, est indépendante de la forme de la section du conducteur la constituant. Elle est proportionnelle à la valeur de cette déformation.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4-22)$$

Nous pouvons définir un coefficient k caractéristique de la piezoresistivité de la jauge.

3.5 Facteur de jauge

L'équation (3.4-14), liant la variation relative de résistance de la jauge de contrainte à la déformation subie, nous permet de définir le facteur de jauge k et d'en calculer sa valeur pour une jauge de contrainte dont la grille serait réalisée en Constantan ($\nu = 0,33$) :

$$k = [1 + 2\nu + C(1-2\nu)] = [1 + 2 \times 0,33 + 1 \times (1 - 2 \times 0,33)] = 2,0 \quad (3.5-1)$$

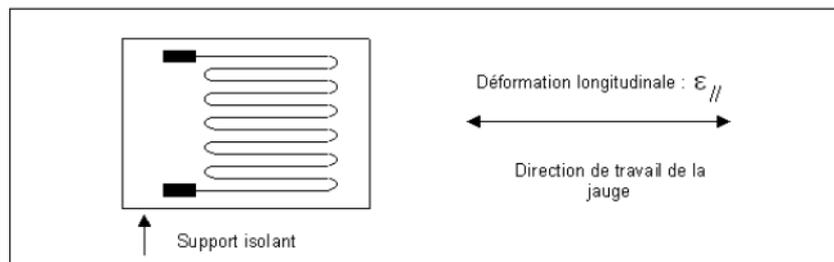


Figure 3.5-1 : Mise en œuvre d'une jauge de contrainte

Une jauge de contrainte devant être utilisée dans sa zone de déformation élastique, la déformation longitudinale $\varepsilon_{//}$ qu'elle subit est directement liée, par la loi de Hooke, à la contrainte $\sigma_{//}$ à laquelle elle est soumise :

$$\sigma_{//} = E \varepsilon_{//} \quad (3.5-2)$$

Avec :

- E : Module de Young du métal dont est constituée la grille du capteur ($E=162$ GPa pour le Constantan).

Par substitution dans l'équation (3.4-14), nous obtenons :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} = k \varepsilon_{//} = \frac{k}{E} \sigma_{//} \quad (3.5-3)$$

Nous sommes donc en présence d'un capteur capable de transformer une grandeur mécanique (déformation ou contrainte) en une grandeur électrique (variation de résistance).

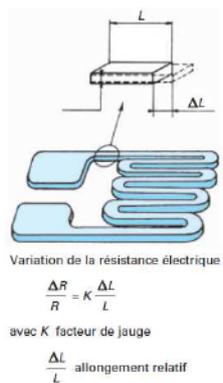


Figure 3.5-2 : Principe d'une jauge à trame

Ce facteur de jauge peut également être défini à partir de constantes de la physique atomique en nous basant sur le modèle de Drude (1900). Paul Drude a adapté la théorie cinétique des gaz pour décrire la conduction électrique dans un métal. Il a, pour cela, assimilé les mouvements des électrons à celui des molécules d'un gaz. L'agitation thermique des électrons et leurs collisions incessantes sur les ions du réseau cristallin et entre eux sont un frein à l'établissement d'un mouvement d'ensemble des électrons sous l'action d'un champ électrique. On peut ainsi définir la résistivité donnée par :

$$\rho = \frac{m_e}{n_e e^2 \tau} \quad (3.5-4)$$

Calculons la valeur typique de ρ pour un métal :

- n_e : Nombre d'électrons libre par unité de volume ($\approx 10^{28} / \text{m}^3$).
- τ : Temps de relaxation ou durée entre deux collisions consécutives d'un électron ($\approx 10^{-14}$ s).
- m_e : Masse de l'électron ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).
- e : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Nous obtenons :

$$\rho = \frac{9,1 \cdot 10^{-31}}{10^{28} \times (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \times 10^{-14}} \approx 35,5 \mu\Omega\text{cm} \quad (3.5-5)$$

Soit une résistivité typique de l'ordre de $36 \mu\Omega\text{cm}$ à température ambiante. Le temps de relaxation diminuant avec la température, la résistivité des métaux est donc dépendante de ce paramètre.

Le Constantan (55%Cu, 45% Ni), dont sont constituées les grilles des jauge de contrainte qui sont installée sur la presse LVP, présente une résistivité de $52 \mu\Omega\text{cm}$.

Posons :

$$n_e = \frac{N_o}{SL} \quad (3.5-6)$$

Et :

$$\tau = \frac{\lambda}{v} \quad (3.5-7)$$

Avec :

- N_o : Nombre d'électrons par unité de volume (différent de n_e).
- v : Vitesse moyenne des électrons (fonction de la température).
- λ : Libre parcourt moyen des électrons (fonction de la température).

En reportant dans l'équation (3.5-4) :

$$\rho = \frac{m_e S L v}{e^2 N_o \lambda} \quad (3.5-8)$$

D'où la variation relative de résistivité :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{dN_o}{N_o} + \frac{dL}{L} + \frac{dS}{S} \quad (3.5-9)$$

En reportant l'équation (3.5-2) dans l'équation (3.4-4) :

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} + \frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{dN_o}{N_o} + \frac{dL}{L} + \frac{dS}{S} \quad (3.5-10)$$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dL}{L} + \frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{dN_o}{N_o} \quad (3.5-11)$$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dL}{L} + \frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{dN_o}{N_o} \quad (3.5-12)$$

Par identification à l'équation (3.5-10), et avec $\varepsilon_{//} = dL / L$, nous pouvons établir le rapport de la grandeur de sortie (une variation de résistance $\Delta R/R$) à la grandeur d'entrée (une déformation longitudinale $\varepsilon_{//}$) de la jauge de contrainte, correspondant à la définition de sa sensibilité :

$$S = \frac{\Delta \text{Sortie}}{\Delta \text{Entrée}} = \frac{dR/R}{\varepsilon_{//}} = 2 + \frac{\left(\frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} - \frac{dN_o}{N_o} \right)}{\varepsilon_{//}} \quad (3.5-13)$$

Nous pouvons remarquer que celle-ci sera dépendante de la température car cette dernière influence, comme nous l'avons vu, le libre parcourt moyen mais également la vitesse, et le nombre d'électrons libre dans un métal.

3.6 Sensibilité

Nous avons introduit, ci-avant, la caractéristique de sensibilité de la jauge de contrainte. Plus généralement, la sensibilité d'un capteur est définie comme étant le quotient entre et la variation des grandeurs de sortie s et d'entrée m également appelé mesurande.

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} \quad (3.6-1)$$

La sensibilité est toujours donnée pour un point ou une zone de fonctionnement. Dans la majorité des cas, la réponse d'un capteur n'est pas parfaitement linéaire. Dans ce cas, la sensibilité pourra être déterminée sur une zone pouvant être considéré comme linéaire (à une erreur de linéarité près), de la caractéristique. Elle sera alors considéré comme constante et déterminée par le calcul de la pente, S , tout en précisant les domaines du mesurande $[m_1, m_i]$ et de la grandeur de sortie $[s_1, s_i]$. La caractéristique peut être une spécification du constructeur ou un certificat étalonnage par exemple.

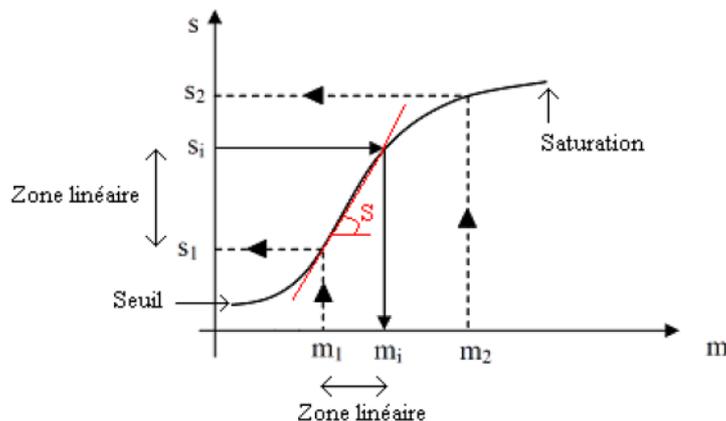


Figure 3.6-1 : Caractéristique d'un capteur

Dans les zones non linéaires proche du seuil, ou de la saturation, la sensibilité n'est alors plus constante Elle est alors définie par :

$$s = \frac{dm}{ds} \quad (3.6-2)$$

Dans le cas des jauges de contrainte, la sensibilité est appelée facteur de jauge. Elle est donnée comme constante et associée à une déformation maximale mesurable. Elle est égale à :

$$S = \frac{dR/R}{\varepsilon_{II}} = k \quad (3.6-3)$$

Le facteur de jauge k n'a pas de dimension car c'est le rapport entre deux variations relatives : celle d'une résistance sur celle d'une déformation, rapport relatif de longueur.

La valeur de k dépend de la nature du matériau dont est constituée la grille de la jauge.

Nous avons réalisé son calcul pour une jauge dont la grille serait constituée de Constantan équation (3.5-1).

Les autres alliages principalement employés et les valeurs de facteur de jauges correspondants sont présentés ci-dessous :

- Constantan (45% Ni, 55% Cu) $2,0 \leq k \leq 2,2$
- Karma (74%Ni, 20% Cr, 3% Cu, 3% Fe) $2,1 \leq k \leq 2,2$
- Platine – Tungstène (92% Pt, 8% W) $4,0 \leq k \leq 4,6$

Dans le cadre de cette étude nous utiliserons des capteurs à base de Constantan. Cet alliage présentant plusieurs propriétés intéressantes :

- Très bon comportement thermique (faible variation de la résistance en fonction de la température).
- Résistivité élevée permettant la construction de jauge de dimensions réduites.
- Sensibilité relativement constante (à une erreur de linéarité près) en fonction de la contrainte appliquée.

Afin de fixer les ordres de grandeurs, prenons en exemple la déformation maximale enregistrée sur un pilier de la presse LVP lors de l'un de nos essais. **Les jauges HBM installées sur les piliers sont de type 1-LY61-6/350A :**

- Résistance nominale 350 Ω
- Facteur de jauge : 2,05
- Déformation : 250 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- Module de Young : 210GPa

Nous pouvons alors calculer :

- La contrainte longitudinale ayant provoqué cette déformation :

$$\sigma_{//} = E \varepsilon_{//} = 210.10^9 \times 250.10^{-6} = 52,5.10^6 \text{ N/m}^2 \quad (3.6-4)$$

Soient 52,5 MN / m², ou 52,5 N / mm², ou encore 52,5 MPa.

- La variation relative de résistance de la grille de la jauge :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon_{//} = 2,05 \times 250.10^{-6} \approx 0,051\% \quad (3.6-5)$$

Soit une variation absolue de :

$$\Delta R = 350 \times 0,051\% \approx 179 \text{ m}\Omega \quad (3.6-6)$$

3.7 *Etendue de mesure*

L'étendue de mesure d'une jauge de contrainte est définie comme étant la déformation maximale pour laquelle les spécifications du constructeur sont garanties. En général cette zone de fonctionnement est située dans la partie linéaire de la caractéristique. Remarquons que la déformation maximale (ou étendue de mesure) spécifiée peut être positive (tension mécanique) ou négative (compression). Concernant les jauges et rosettes HBM équipant la presse LVP, elle est de 50 000 $\mu\text{m/m}$, soit 5 % ce qui est énorme.

En dehors de cette zone de fonctionnement, les caractéristiques du capteur ne sont plus garanties et peuvent même être dégradées de façon définitive malgré un retour dans la zone de fonctionnement spécifiée. Par exemple, suite à la déformation plastique d'une jauge de contrainte.

3.8 *Linéarité*

Comme cela a été abordé lors de l'étude de la sensibilité d'une jauge de contrainte (§ 3.6), le facteur de jauge est spécifié par le constructeur pour une zone de fonctionnement sur laquelle la caractéristique du capteur peut être approchée par une droite. Cependant cette linéarité n'est pas exacte et l'écart à la droite nominale idéale est quantifié par l'écart de linéarité. Cela est illustré ci-après.

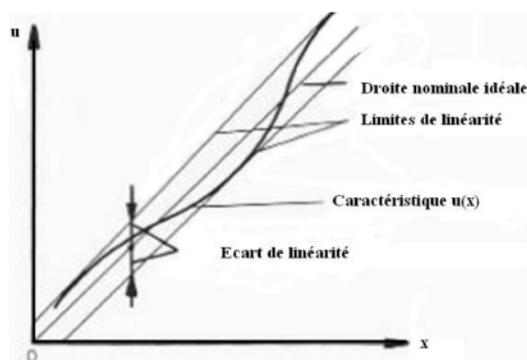


Figure 3.8-1 : Linéarité d'un capteur

La linéarité est spécifiée comme un pourcentage de l'étendue de mesure et pour une charge croissante. Nous verrons ci-après la raison de cette dernière précision. Les écarts de linéarité sont de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent de l'étendue de mesure.

3.9 Hystérésis

L'hystérésis caractérise le fait selon lequel la valeur de la grandeur du signal de sortie d'un capteur sera différente pour une même valeur de mesurande donnée, selon que l'on s'approche de cette valeur de manière croissante ou décroissante. Ceci explique que l'erreur de linéarité précédemment définie soit donnée pour des valeurs croissantes du mesurande. La valeur de cette hystérésis peut être différente selon la valeur du mesurande. Nous pouvons ainsi définir une hystérésis locale ou bien globale si nous réalisons un cycle complet.

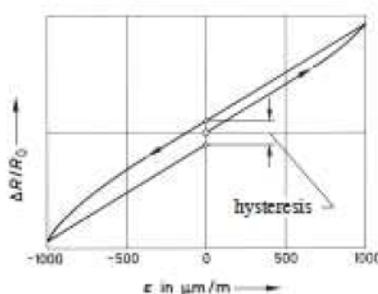


Figure 3.9-1 : Courbe d'hystérésis de la sensibilité d'une jauge de contrainte

L'hystérésis d'une jauge de contrainte trouve son origine dans le comportement mécanique de la grille. Etant métallique et fonctionnant dans son domaine d'élasticité, elle se comporte comme tout métal qui, soumis à une contrainte, conserve une déformation résiduelle après disparition de cette contrainte (non retour à zéro) et ce même lors de déformation élastique. Sa valeur est déterminée pour une déformation donnée comme étant l'écart obtenu selon un sens de variation croissant et décroissant de la déformation. L'hystérésis tendant à diminuer après un certain nombre de cycles, le

constructeur peut alors spécifier sa valeur pour un et trois cycles. Elle est de l'ordre de $1 \mu\text{m} / \text{m}$ pour un cycle et de $0,5 \mu\text{m} / \text{m}$ après le troisième cycle pour les jauges et rosettes équipant la presse LVP.

3.10 Sensibilité transversale

La loi de Poisson a pour conséquence d'imposer à tout corps d'épreuve métallique travaillant dans sa zone d'élasticité et soumis à une contrainte longitudinale non seulement une déformation longitudinale $\varepsilon_x = \varepsilon_{//}$, mais également une déformation transversale dans le plan de la grille., $\varepsilon_y = \varepsilon_t$. Cela est illustré ci-dessous :

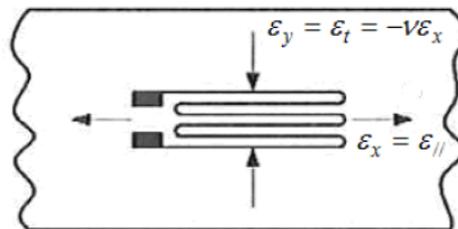


Figure 3.10-1 : Sensibilité transversale

La jauge de contrainte et donc soumise à ces deux déformations.

La déformation transversale ε_y va, selon le principe de fonctionnement de la jauge, imposer une variation de résistance au niveau des segments de liaison entre les brins de la grille.

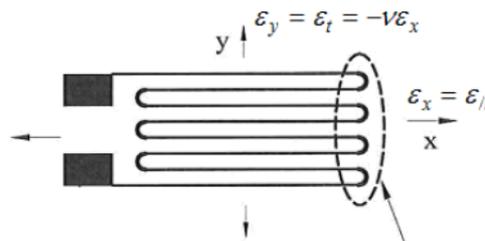


Figure 3.10-2 : Localisation des effets de la déformation transversale

Une solution pour minimiser cette influence, est d'élargir le dessin des pistes transversales afin de minimiser la variation relative de leur résistivité sous l'action d'une déformation transversale.

Le signal de sortie de la jauge est donc la somme de l'influence de ces deux déformations :

$$\frac{\Delta R}{R} = S_{xx} \varepsilon_x + S_{xy} \varepsilon_y \quad (3.10-1)$$

Avec :

- S_{xx} : Sensibilité de la jauge à une déformation selon l'axe longitudinal x .
- S_{xy} : Sensibilité de la jauge à une déformation selon l'axe transversal y .

Le double indice traduit le fait que ces deux influences sont vues comme une seule et même déformation selon l'axe longitudinal x .

La sensibilité transversale est définie par rapport à la sensibilité longitudinale:

$$S_t = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3.10-2)$$

Elle est en général exprimée par les constructeurs, en pourcentage. L'ordre de grandeur de cette sensibilité est typiquement de :

- 1% à 5% pour les jauges à fil.
- 0,3% (jauges et rosettes équipant la presse LVP) à 3% pour les jauges à trame pelliculaire.

La variation relative de la résistance de la grille est alors de :

$$\frac{\Delta R}{R} = S_{xx} (\varepsilon_x + S_t \varepsilon_y) \quad (3.10-3)$$

La valeur de l'erreur relative sur la déformation due à la sensibilité transversale est :

$$erreur_relative = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{S_t}{1 - \nu_o S_t} \left(\nu_o + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \quad (3.10-4)$$

Cette valeur est déterminée selon des procédures d'essais normalisées (Organisation internationale de la Métrologie, recommandation n° R062-785) lors desquels la jauge est fixée sur un matériau présentant un coefficient de poisson $\nu_o = 0,285 \pm 1\%$ (acier laminé à froid).

Le facteur de jauge k spécifié par le constructeur **intègre donc la sensibilité transverse de la jauge pour un matériau possédant un coefficient de Poisson de 0,285** :

$$k = S_{xx} (1 - S_t \nu_o) \quad (3.10-5)$$

Si le capteur dans son utilisation est associé à un matériau présentant un coefficient de Poisson différent de 0,285, il faudra en tenir compte car la variation relative de résistance mesurée correspondra alors à une déformation apparente ou mesurée, ε'_x , qui n'est pas la déformation réelle, ε_x , subie par la structure sur laquelle est fixée la jauge.

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{mesurée} = k \varepsilon'_x \quad (3.10-6)$$

Avec :

$$\varepsilon'_x = \frac{\Delta R}{R} \times \frac{1}{k} = \frac{S_{xx} (\varepsilon_x + S_t \varepsilon_y)}{S_{xx} (1 - S_t \nu_o)} = \frac{(\varepsilon_x + S_t \varepsilon_y)}{(1 - S_t \nu_o)}$$

Nous devons donc calculer l'erreur commise afin de pouvoir corriger le résultat de la mesure :

$$erreur_relative = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon'_x}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_x - \frac{(\varepsilon_x + S_t \varepsilon_y)}{(1 - S_t \nu_o)}}{\varepsilon_x} = \frac{-S_t}{1 - S_t \nu_o} \left(\nu_o + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \quad (3.10-8)$$

$$erreur_absolue = \varepsilon_x - \varepsilon'_x = \frac{-S_t}{1 - S_t \nu_o} (\varepsilon_y - \nu_o \varepsilon_x) \quad (3.10-9)$$

L'importance de l'influence de la sensibilité transversale peut être quantifiée en réalisant le calcul d'erreur relative dans les deux situations suivantes :

- L'utilisation d'une jauge de contrainte présentant une sensibilité transversale de 3%, fixée sur une structure constituée d'un acier possédant un coefficient de Poisson $\nu = \varepsilon_y / \varepsilon_x = 0,3$, et soumis à une contrainte longitudinale.

$$erreur_relative = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon'_x}{\varepsilon_x} = \frac{-S_t}{1 - S_t \nu_o} \left(\nu_o + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) = \frac{-0,03}{1 - 0,03 \times 0,285} (0,285 - 0,3) = 0,00045 \quad (3.10-10)$$

Soit une déformation mesurée majorée de 0,045% par rapport à la déformation réelle. Ce qui reste peu élevé. Pour un polymère dont le coefficient de Poisson est 0,4, cette erreur atteint 0,35%.

- Imaginons maintenant que cette même jauge soit soumise à une contrainte uniquement transversale, ce qui revient à dire que $\nu = \varepsilon_y / \varepsilon_x = -1 / 0,3$:

$$erreur_relative = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon'_x}{\varepsilon_x} = \frac{-S_t}{1 - S_t \nu_o} \left(\nu_o + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) = \frac{-0,03}{1 - 0,03 \times 0,285} \left(0,285 - \frac{1}{0,3} \right) = 0,092 \quad (3.10-11)$$

Dans cette situation, la jauge mesure une déformation longitudinale inexistante de l'ordre de 9,2% de la déformation transversale.

Pour résumer, cette influence est importante si le matériau sur lequel est fixée la jauge possède un coefficient de Poisson très différent de ν_o , ou bien si la jauge est soumise à des contraintes non longitudinales, si elle est mal orientée par rapport à la direction de la contrainte principale, ou encore si cette direction peut varier. Dans ce dernier cas la solution consiste à utiliser une rosette de jauge de contrainte que nous étudierons au paragraphe 3.19.

3.11 Influence de la température

L'influence de la température sur une jauge de contrainte trouve son origine dans plusieurs effets :

3.11.1 Variation de la résistance de la grille

Comme toute résistance, la grille, constituée d'un fil ou d'une trame pelliculaire, verra sa valeur varier en fonction de la température selon une loi qui peut être considérée en première approximation comme linéaire :

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_R \Delta T = \alpha_R (T - T_0) \quad (3.11-1)$$

Avec :

- α_R : Coefficient de température de la jauge de l'ordre de quelques ppm.
- T_0 : Température de référence (généralement 23 °C) pour laquelle est donnée la valeur du facteur de jauge k_0 .

Cette variation est assimilable à une déformation ε' qui sera considérée comme une grandeur d'influence externe dès lors que cette déformation ne trouve pas son origine dans le phénomène étudié.

$$\varepsilon' = \frac{\alpha_R \Delta T}{k_0} \quad (3.11-2)$$

Cette variation de résistance en fonction de la température est due à deux phénomènes distincts :

- La variation de résistivité du matériau constituant la grille.
- La dilatation de ce même matériau.

3.11.2 Dilatation de la grille et du support

Une variation de la température va entraîner une dilatation du support sur lequel est fixée la jauge. Les matériaux constituant la grille et le support étant, de manière générale, de nature différente, les coefficients de dilatation sont donc différents.

Cela entraîne une déformation ε'' sur la jauge :

$$\varepsilon'' = (\alpha_s - \alpha_G) \Delta T \quad (3.11-3)$$

Avec :

- α_s : Coefficient de dilatation de la structure.
- α_G : Coefficient de dilatation de la grille.

Afin de minimiser cet effet thermique, les constructeurs de jauge de contrainte peuvent fournir des jauges dont le coefficient de dilatation sera très proche de celui du matériau sur lequel elles seront fixées et ainsi réduire l'erreur systématique occasionnée.

En l'absence de déformation mécanique, nous mesurons une déformation apparente ε due à l'influence de la température :

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = \left[\frac{\alpha_R \Delta T}{k} + (\alpha_s - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (3.11-4)$$

Les jauges de contrainte ont un domaine d'utilisation qui va généralement de -200°C à 200°C , avec des valeurs de coefficients de température de l'ordre de :

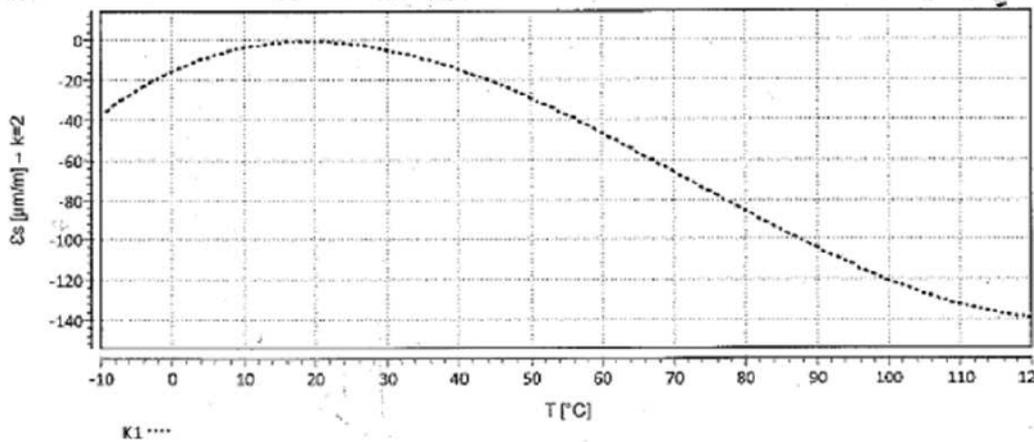
- $\alpha_R \approx 20.10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- $\alpha_s \approx 11.10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- $\alpha_G \approx 17.10^{-6} / ^\circ\text{C}$

3.11.3 Jauge de contrainte compensée en température

Il est possible, par modification de l'alliage constituant la grille de la jauge, et en tenant compte du matériau constituant la structure sur laquelle elle sera installée, de faire en sorte que :

$$\alpha_R = (\alpha_G - \alpha_s) k \quad (3.11-5)$$

Ceci devrait assurer que la déformation apparente décrite par l'équation (3.11-4) soit annulée. Cependant, cette équation ne tenant pas compte de termes non linéaires, il subsiste une déformation apparente résiduelle. Le polynôme et la courbe de cette déformation peuvent être donnés par le constructeur. Ci-après est donnée la courbe de réponse en température et le polynôme d'approximation permettant de calculer la déformation apparente en fonction de la température T, des jauge de contrainte HBM installées sur les piliers de la presse LVP (Annexe I « Installation Report Level I »).



$$\epsilon_s(T) = -15.42 + 1.66 \cdot T - 5.04E-02 \cdot T^2 + 2.33E-04 \cdot T^3 \pm 0.30 \text{ } [\mu\text{m/m/K}]$$

Figure 3.11-1 : Réponse en température des jauge installées sur les piliers de la presse LVP

3.12 Fluage élastique

A une contrainte soudaine, $\sigma(t_0)$, dans le domaine de déformation élastique d'un matériau, celui-ci réagit instantanément par une déformation, $\epsilon(t_0)$, selon la loi de Hooke :

$$\sigma = E \epsilon \quad (3.12-1)$$

Libellée ainsi cette loi est indépendante du temps. Or, si cette contrainte est maintenue, le matériau continuera à se déformer lentement dans le sens de la contrainte. De même, lors de la suppression de la contrainte, la déformation ne disparaîtra pas entièrement de façon instantanée, une déformation résiduelle subsistera qui disparaîtra petit à petit. C'est le phénomène de fluage. Il est illustré sur la figure ci-dessous, où nous pouvons observer la réponse, sous la forme d'une déformation (courbe « b » trait plein), à un échelon de contrainte (courbe « a » trait discontinu). Nous constatons qu'à contrainte constante, la déformation va lentement évoluer de façon asymptotique dans le sens de la contrainte.

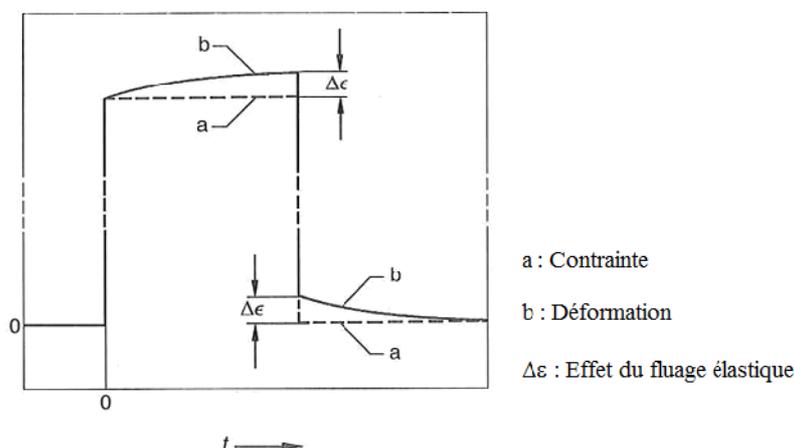


Figure 3.12-1 : Courbe de fluage d'un matériau

Dans une jauge de contrainte, ce même phénomène aura des conséquences opposées. Nous pouvons assimiler la grille à un ressort tendu sous la contrainte principale. Ce ressort va, à son tour, imposer une contrainte de cisaillement c'est-à-dire parallèle aux faces du support de la grille. Cette contrainte de cisaillement va être localisée au niveau des boucles de liaison entre les brins de la grille.

Le support et la colle servant à fixer la jauge de contrainte vont alors être le siège d'un phénomène de relaxation (sous une déformation constante la contrainte de cisaillement va décroître progressivement).

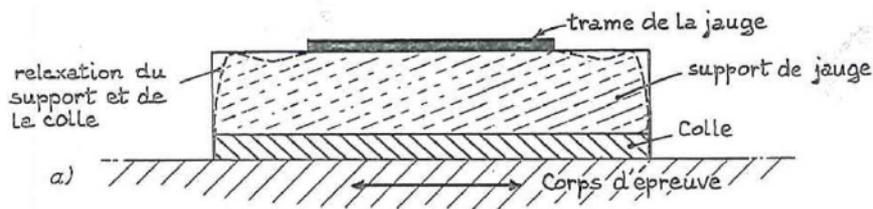


Figure 3.12-2 : Illustration de phénomène de relaxation support et colle

Ceci est illustré sur le graphe ci-dessous où nous constatons que la réponse de la jauge est opposée à celle d'un matériau.

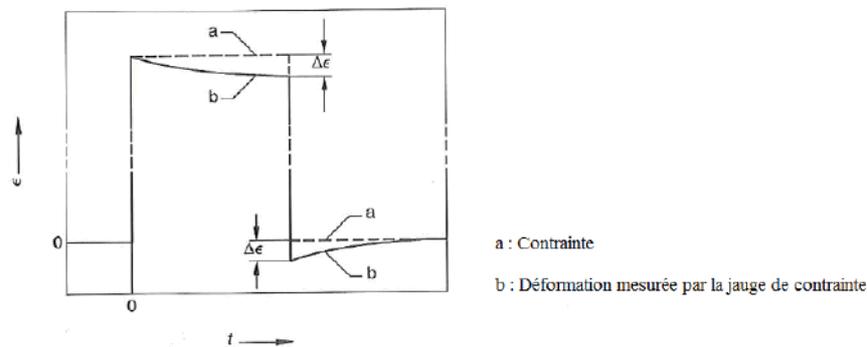


Figure 3.12-3 : Courbe de fluage d'une jauge résistive

Nous pouvons alors tirer profit de ces comportements et ainsi faire que le fluage de la jauge de contrainte compense celui du corps d'épreuve. Cela est réalisé en augmentant plus au moins la surface des boucles de liaison des brins de la grille.

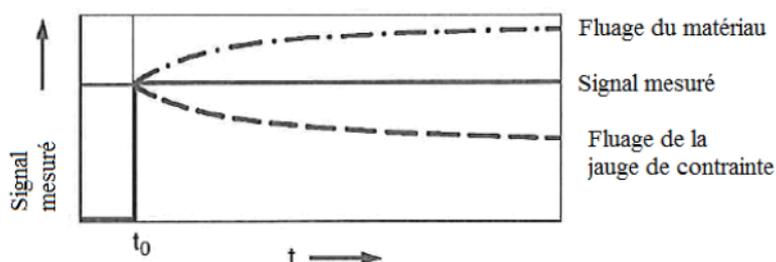


Figure 3.12-4 : Compensation des fluages respectifs du matériau et de la jauge

Le phénomène de fluage est très dépendant de la température comme l'illustre les courbes figurant ci-dessous :

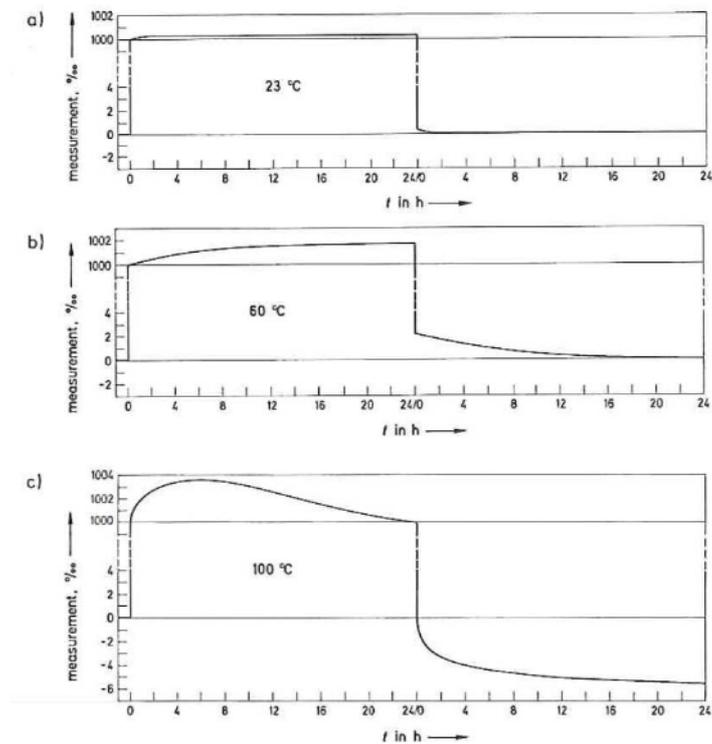


Figure 3.12-5 : Intensité du phénomène de fluage d'une jauge à différentes températures

Le fluage est également plus ou moins prononcé en fonction des dimensions de la grille équipant la jauge de contrainte. La figure ci-dessous, permet de quantifier l'amplitude et la durée du phénomène pour deux grilles de tailles différentes. Ces deux paramètres sont d'autant plus importants que la grille est de faibles dimensions, les contraintes de cisaillement étant alors proportionnellement plus importantes.

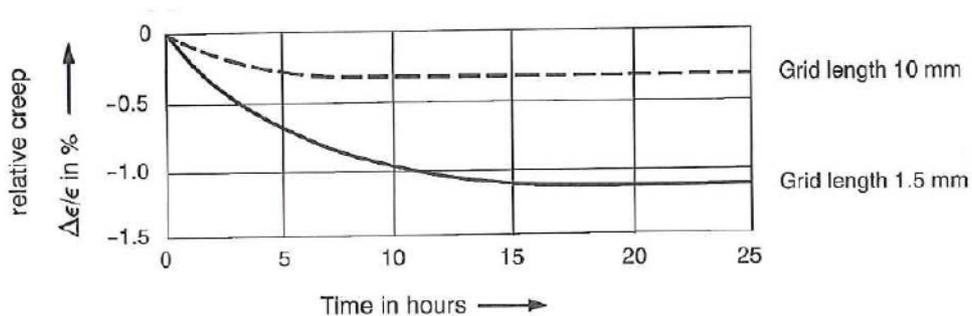


Figure 3.12-6 : Caractéristique de fluage d'une jauge en fonction de ses dimensions

3.13 Bande passante

Nous avons défini au paragraphe 3.6, la sensibilité en régime statique. En régime dynamique établi, si le mesurande m_d varie périodiquement dans le temps, nous obtenons alors en sortie du capteur une variation périodique du signal de sortie s_d . Nous pouvons déterminer une sensibilité dynamique S_d telle que :

$$S_d = \frac{s_d}{m_d} = \frac{s(t)}{m(t)} \quad (3.13-1)$$

Cette sensibilité dynamique n'est pas constante et va être dépendante de la fréquence à laquelle varie le mesurande. Nous pouvons donc définir la fonction de transfert de la jauge et déterminer une fréquence de coupure et une bande passante.

Dans le cas d'une jauge de contrainte, ce n'est pas l'inertie mécanique, très faible, de la grille qui empêche le suivi des évolutions de plus en plus rapide des déformations limitant ainsi la bande passante. Ce sont les dimensions de la jauge et le comportement de son support ainsi que de la colle, qui vont influencer sur le comportement dynamique. Si la longueur d'onde de la déformation est du même ordre de grandeur que la dimension de la jauge, alors cette déformation ne sera pas homogène sur toute la surface de la jauge comme l'illustre la figure ci-dessous.

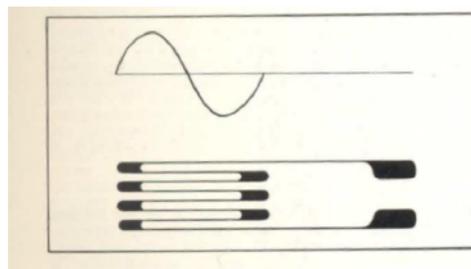


Figure 3.13-1 : Onde de déformation de même longueur que la grille

Dans ce cas précis où la longueur d'onde λ est égale à la longueur de la jauge, L , la variation relative de la résistance de la grille sera nulle car égale à la valeur moyenne de la déformation sur la longueur L .

Les contraintes dynamiques se propageant à la vitesse du son au sein d'un métal, la célérité est donnée par :

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (3.13-2)$$

Avec, pour des valeurs typiques de l'acier :

- E : Module de Young (210 GPa)
- d : Densité: (7850 kg / m³)
- c : Célérité (5233 m / s)

Généralement, pour $L \leq 0,1 \lambda$, l'influence de l'onde mécanique sur la déformation mesurée par la grille est considérée comme négligeable. Cela nous permet de définir une fréquence maximale f_M :

$$f_M = \frac{c}{\lambda} = \sqrt{\frac{E}{d}} \times \frac{1}{10L} \quad (3.13-3)$$

Pour $L = 6 \text{ mm}$, nous obtenons :

$$f_M = \sqrt{\frac{215.10^9}{7850}} \times \frac{1}{10 \times 6.10^{-3}} \approx 87 \text{ kHz} \quad (3.13-4)$$

La figure ci-après présente, sur le graphe de gauche, l'évolution de l'erreur relative commise en fonction du rapport L / λ (noté l_{SG} / λ). Cette erreur relative, définie comme le rapport de la déformation mesurée ($\epsilon_{\text{apparent}}$) et de la déformation réelle (ϵ_{actual}), est exprimée en pourcentage.

Une erreur relative de 70% (-3 dB), classiquement pris comme référence en électronique, correspond à un rapport $L / \lambda = 0,45$ ce qui conduit, pour une longueur de grille de 6mm, à une fréquence de coupure de l'ordre de 393 kHz ce qui est physiquement énorme.

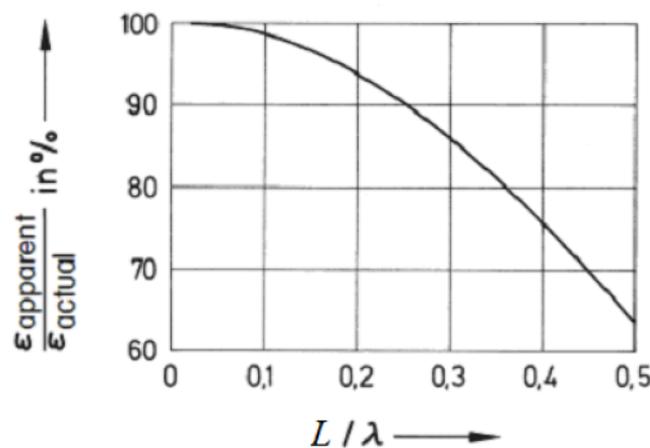


Figure 3.13-2 : Erreur relative sur la mesure de déformation en fonction de la longueur d'onde

3.14 Temps de réponse - Rapidité

Nous recherchons à caractériser ici le comportement du capteur non pas en fonctionnement en régime périodique permanent comme nous l'avons vu au paragraphe 3.13, mais plutôt sa réponse à un changement brusque de la valeur du mesurande, par exemple une impulsion, un choc mécanique. Cela correspond à un régime transitoire. Nous savons qu'un régime permanent est précédé d'un régime transitoire. Cette caractérisation consiste à observer la réponse du signal de sortie du capteur à un échelon du mesurande.

Les paramètres permettant de quantifier ces performances sont représentés et définis ci-dessous :

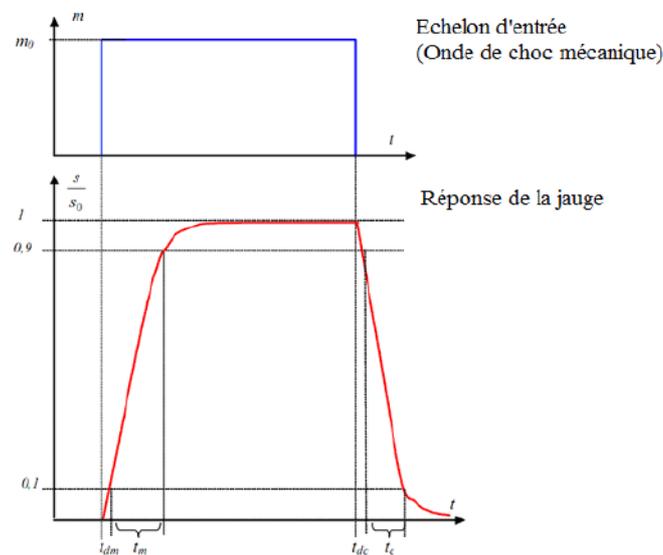


Figure 3.14-1 : Réponse d'un système linéaire à un échelon

3.14.1 Le temps de retard à la montée

C'est l'écart de temps séparant l'instant où se produit le choc de celui où le signal de sortie atteint 10% de sa valeur finale t_{dm} . (Figure 3.14-1). Nous lui associons aussi le temps de retard à la chute t_{dc} (Figure 3.14-1).

3.14.2 Le temps de montée

C'est l'écart de temps séparant les instants où le signal de sortie du capteur atteint respectivement 10% et 90% de la valeur finale t_m . (Figure 3.14-1). Par symétrie nous lui associons le temps de chute t_c (Figure 3.14-1).

3.14.3 Le temps de réponse

C'est l'écart de temps séparant l'instant où se produit l'échelon de celui où le signal de sortie atteint sa valeur finale à $\pm n\%$, en général $\pm 5\%$. Le signal de sortie restera alors compris dans cet intervalle de valeurs. Il caractérise la **rapidité** avec laquelle le capteur répond à une variation brusque du mesurande $t_{n\%}$. (Figure 3.14-2)

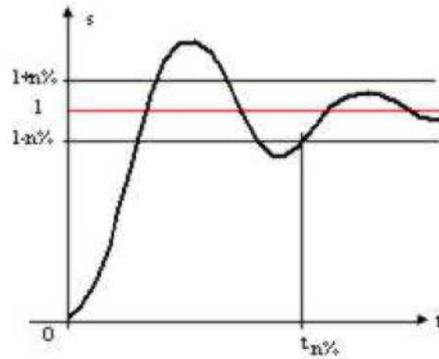


Figure 3.14-2 : Rapidité d'un système linéaire

N'ayant pu trouver de caractéristiques sur le comportement dynamique des jauges de contrainte nous pourrions la considérer comme un système du premier ordre ayant une réponse à un échelon de déformation d'amplitude E de la forme :

$$s(t) = E(1 - e^{-t/\tau})u(t) \quad (3.14-1)$$

Et utiliser la relation liant le temps de montée d'un système du premier ordre à sa bande passante à -3 dB telle que définie au chapitre 3.13 :

$$t_m BP = 0,35 \quad (3.14-2)$$

Soit pour une bande passante définie précédemment à 87 kHz, un temps de montée de l'ordre de 4 μ s. Nous ne pourrions donc pas détecter de chocs de durée inférieure à ce temps de montée.

3.15 Support – Colle – Vernis

Le support assure la rigidification de la grille de mesure de la jauge. Il est bien sûr isolant électriquement (résistance d'isolement $>1G\Omega$). Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour réaliser un support selon la température d'utilisation.

La fixation de la jauge sur la structure est réalisée au moyen de différents types de colle selon les propriétés du matériau sur lequel est fixée la jauge et la gamme de température d'utilisation.

Le vernis a pour fonction de protéger la jauge des agressions extérieures (corrosion, agents chimiques...).

Ces trois éléments doivent également permettre à la grille de suivre les déformations du corps d'épreuve sans les filtrer. Ils doivent donc être au maximum en adéquation avec la structure étudiée soumise à contrainte.

Il est à remarquer que les spécifications des constructeurs de jauge de contrainte intègrent bien sûr les effets des supports qui sont partie intégrante de la jauge de contrainte, mais également les influences des colles et vernis préconisés.

Malgré cela les jauge de contrainte restent sensibles à plusieurs facteurs d'influence qui sont examinés dans le paragraphe suivant.

3.16 Influence des conditions ambiantes

Hormis la sensibilité des jauges de contrainte à la température, étudiée au paragraphe 3.11, nous allons examiner ci-après les grandeurs d'influence suivantes :

- Hygrométrie
- Radiations
- Champ magnétique

3.16.1 Hygrométrie

L'influence de l'hygrométrie va se traduire par une diminution de la valeur de la résistance d'isolement entre la grille de la jauge de contrainte et la structure métallique. Cet isolement est assuré par l'ensemble support de grille - colle. La valeur de la résistance d'isolement est de l'ordre du Gigaohm. La variation de cette résistance d'isolement parallèle à la résistance nominale de la jauge est donc de l'ordre 0,12 ppm pour une jauge de 120 Ω (120 Ω / 1 G Ω) et de 5 ppm pour une jauge de 5 k Ω (5 k Ω / 1 G Ω).

3.16.2 Radiations

Les jauge de contrainte sont sensibles aux rayonnements de forte énergie que sont les rayons α , β , X et γ . Dans le cadre de l'utilisation de la presse LVP, les jauges de contrainte seront au voisinage d'un faisceau de rayons X. Les caractéristiques de ce rayonnement est fonction du type d'expériences réalisées par les scientifiques :

- Longueur d'onde : 0,308 Å ou 0,23 Å
- Energie : 32 keV ou 54 keV

L'exposition directe à ces rayonnements pourrait entraîner la modification de la composition chimique du support des jauges et de la colle utilisée pour leur fixation et ainsi dégrader leurs caractéristiques. Comme nous l'avons exposé au chapitre 3.15, cette dégradation ne permettrait plus de garantir que les jauges soient conformes aux spécifications données par le constructeur.

Dans notre utilisation, la concentration de faisceau X (section du faisceau : 1 mm²) et sa plus proche distance aux capteurs (rosettes disposées sur le D-DIA) de l'ordre de 30 cm, permet de négliger ce facteur d'influence.

3.16.3 Champ magnétique

Le fonctionnement des jauges de contrainte peut être influencé par la présence d'un champ magnétique en raison des effets de magnétostriction et magnétorésistance du matériau (alliage Constantan : 55%Cu 45%Ni) composant la grille. La magnétostriction est une déformation d'un matériau ferromagnétique (fer, cobalt, nickel...) sous l'action d'un champ magnétique alors que la magnétorésistance est une modification de la résistance d'un matériau soumis à un champ magnétique.

La déformation de la grille et la modification de sa valeur de résistance électrique est alors assimilable à une déformation « parasite » dont l'origine est due à la grandeur d'influence externe qu'est le champ magnétique.

Lors d'expériences nécessitant de chauffer l'échantillon, le courant circulant dans les câbles d'alimentation du four générera un champ magnétique. S'agissant d'un courant continu, ce champ sera constant. Le champ magnétique (d'induction) rayonné est donnée par :

$$\vec{B} = \mu_o \times \mu_r \times \vec{H} \quad (3.16-1)$$

Avec :

- μ_o : Perméabilité du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).
- μ_r : Perméabilité de l'air (≈ 1 H/m).

Si nous considérons, par approximation, un conducteur rectiligne de longueur infinie parcouru par un courant d'intensité I , l'intensité du champ rayonné B à une distance r est alors donné par :

$$B = \mu_o \times \mu_r \times \frac{I}{2\pi \times r} = 4\pi \cdot 10^{-7} \times 1 \times \frac{100}{2\pi \times 1} \approx 0,02 \text{ mT} \quad (3.16-2)$$

Soit 0,2 gauss.

Avec :

- I : Intensité du courant alimentant le four (100 A au maximum)
- r : Distance entre le câble d'alimentation du four et les jauges de contrainte (1m minimum)

Par comparaison l'intensité du champ magnétique terrestre est de 0,047 mT Il s'agit donc d'une intensité relativement faible.

Deux études ont été publiées traitant de l'influence du champ magnétique sur les jauges de contrainte [2] dont les résultats sont les suivants :

- L'influence maximale d'un champ magnétique de 1,5 T sur des mesures réalisées au moyen de jauges de contrainte est de 7 $\mu\text{m} / \text{m}$ [2].
- Aucune influence n'a été décelée sur des jauge de contrainte dont les grilles, constituées de Constantan, sont soumises à un champ magnétique de 2T [2].

De plus, ces études mettant en œuvre des champs magnétiques d'intensité près de 10 000 fois supérieure à celle créé par les conducteurs du générateur de courant utilisé, nous considérerons donc cette influence comme négligeable.

3.17 Valeur nominale de la résistance d'une jauge de contrainte

Les valeurs les plus communes sont :

- 120 Ω
- 350 Ω
- 700 Ω
- 1000 Ω
- 5000 Ω

Les valeurs les plus faibles sont moins sensibles à un environnement humide du fait que la variation relative de la résistance d'isolement ramenée à la valeur nominale de la résistance de la jauge sera moins importante. Elles sont également moins sensibles aux perturbations radioélectriques

rayonnées. Cependant, elles présentent le signal de sortie le plus faible. Quant aux valeurs les plus élevées, leur avantage réside dans une moindre sensibilité à la résistance du câblage, mais sont plus sensibles à l'auto échauffement.

L'instrumentation de la presse LVP est réalisée avec des jauges de contrainte d'une résistance nominale de 350Ω et des rosettes dont les grilles présentent une résistance nominale de 120Ω .

3.18 Puissance dissipée

Il est préconisé de ne pas dissiper une puissance supérieure à $0,30 \text{ W} / \text{cm}^2$ dans des jauges de contrainte fixées sur de l'acier [3]. La limitation de cette puissance a pour objet de diminuer l'effet d'auto échauffement de la grille ce qui entraînerait à son tour une dérive de la résistance due à la sensibilité de cette dernière à la température. Cependant, le constructeur définit la tension maximale d'alimentation de la jauge (ou plus précisément du pont de Wheatstone auquel elle est raccordée) permettant de garantir les spécifications annoncées rendant ce paramètre négligeable pourvu que l'utilisateur se conforme à ces prescriptions.

3.19 Rosette de jauge de contrainte

Il s'agit d'un assemblage compact de deux ou trois jauge de contrainte disposées en étoiles. Bien que de nombreuses configurations existent, les principaux types de rosettes sont les suivants :

- Lorsque la rosette n'est constituée que de deux jauges, on parle de rosette « T » lorsque les grilles sont disposées à 90° . Leur utilisation est la détermination **en un point** de déformations bi-axiales dont on connaît les directions principales. Afin de répondre au critère de mesure ponctuelle, les grilles doivent être le plus proche possible et peuvent même être empilées pour plus de précision

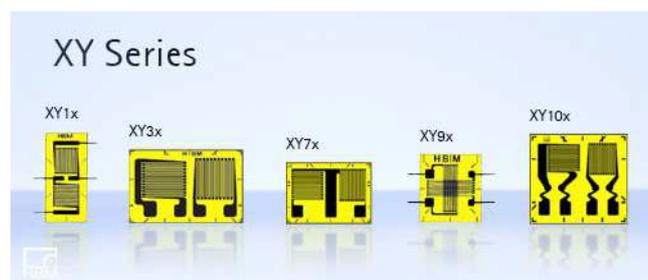


Figure 3.19-1 : Exemple de rosette T du constructeur HBM

- Lorsque la rosette comporte trois jauges, le plus souvent leurs grilles forment entre elles des angles de 60° ou de 45° . Les premières sont dénommées « Delta » ou $(0^\circ/60^\circ/120^\circ)$, les secondes « Rectangulaires » ou $(0^\circ/45^\circ/90^\circ)$. L'intérêt de ces rosettes est de pouvoir mesurer en un point, des déformations dont nous ne connaissons pas précisément les directions principales ou dont on suppose que celle-ci peuvent évoluer au cours du temps.

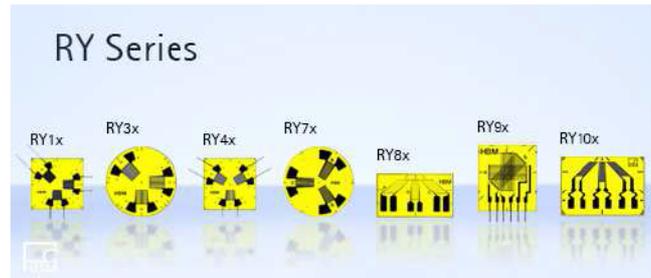


Figure 3.19-2 : Exemple de rosette à trois grilles du constructeur HBM

Nous allons nous intéresser aux rosettes rectangulaires car c'est ce type de rosettes qui équipe l'outil de la presse LVP.

A partir des déformations mesurées par les 3 grilles de la rosette, nous souhaitons pouvoir évaluer l'état de déformation de la structure au point M, point de convergence des 3 axes longitudinaux des grilles. L'état de déformation en un point d'un corps est donné par le tenseur des déformations (cf annexe B) :

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ Sym & & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.19-1)$$

Etant donné que la rosette est fixée dans le plan (X,Y) de la surface de la structure, nous n'avons accès qu'à l'état de déformation plane. Soit :

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.19-2)$$

La figure, ci-après, représente une rosette rectangulaire dans le plan de la surface sur laquelle elle est fixée, ainsi que la base vectorielle orthonormée propre, ou principale (\bar{e}_1, \bar{e}_2) . Cette base permet de représenter les déformations principales ε_1 et ε_2 . Soit ϕ l'angle entre le vecteur \bar{e}_1 et l'axe longitudinal de la grille 'a'.

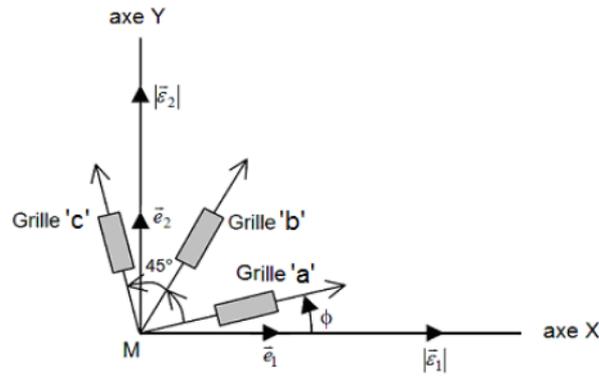


Figure 3.19-3 : Base principale des déformations mesurées par une rosette

Dans cette base principale le tenseur de contrainte peut s'écrire sous la forme d'une matrice diagonale :

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (3.19-3)$$

Un vecteur directeur de l'axe de la grille 'a' a pour coordonnées :

$$\bar{a} = \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{Bmatrix} \quad (3.19-4)$$

Dans l'hypothèse des petites déformations, la déformation subie par la grille 'a', ε_a , est donnée dans la base principale par :

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \bar{a}^T \cdot \bar{\bar{\varepsilon}} \cdot \bar{a} = \begin{Bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \varepsilon_1 \\ \sin \phi & \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \cos^2(\phi) \varepsilon_1 + \sin^2(\phi) \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (3.19-5)$$

Grâce aux relations trigonométriques suivantes :

$$\begin{cases} \cos^2(\phi) = \frac{1 + \cos(2\phi)}{2} \\ \sin^2(\phi) = \frac{1 - \cos(2\phi)}{2} \end{cases} \quad (3.19-6)$$

Nous obtenons par substitution dans (3.19-5) :

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos(2\phi) \quad (3.19-7)$$

De même, nous pouvons exprimer les déformations respectives des grilles 'b' et 'c', ε_b et ε_c :

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos\left(2\phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.19-8)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos(2\phi + \pi) \quad (3.19-9)$$

Nous posons :

$$d = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (3.19-10)$$

Et

$$r = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \quad (3.19-11)$$

Nous obtenons alors un système à trois équations :

$$\begin{cases} \varepsilon_a = d + r \cos(2\phi) & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_b = d + r \cos(2\phi + \frac{\pi}{2}) = d - r \sin(2\phi) & (2) \end{cases} \quad (3.19-12)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_c = d + r \cos(2\phi + \pi) = d - r \cos(2\phi) & (3) \end{cases}$$

Ce système nous permet de calculer les trois inconnues ε_1 , ε_2 et ϕ :

L'addition des équations (1) et (3) donne directement :

$$d = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \quad (3.19-13)$$

Nous obtenons aussi directement :

$$\tan(2\phi) = \frac{\sin(2\phi)}{\cos(2\phi)} = \frac{d - \varepsilon_b}{\varepsilon_a - d} \quad (3.19-14)$$

Enfin :

$$\cos^2(2\phi) + \sin^2(2\phi) = 1 = \frac{(\varepsilon_a - d)^2}{r^2} + \frac{(d - \varepsilon_b)^2}{r^2} \quad (3.19-15)$$

$$r^2 = \left(\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \varepsilon_b \right)^2 \quad (3.19-16)$$

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b)^2} \quad (3.19-17)$$

Finalement, des équations (3.19-10), (3.19-11) et (3.19-14) , nous tirons :

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{d - \varepsilon_b}{\varepsilon_a - d} \right) \quad (3.19-18)$$

$$\varepsilon_1 = d + r = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b)^2} \quad (3.19-19)$$

$$\varepsilon_2 = d - r = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b)^2} \quad (3.19-20)$$

Bien que nous n'ayons pas accès aux déformations selon un troisième axe Z perpendiculaire au plan (X,Y) nous ne pouvons pas considérer que la déformation principale associée, ε_3 , soit nulle pour réaliser le calcul des contraintes principales par l'application de loi de Hooke généralisée. Celle-ci

peut être exprimée en fonction des coefficients de Lamé (μ et λ) ou en fonction du module de Young et du coefficient de Poisson (E et ν) :

$$\bar{\sigma} = \bar{C} \cdot \bar{\varepsilon} = 2\mu \bar{\varepsilon} + \lambda \text{tr}(\bar{\varepsilon}) \bar{I} = \frac{E}{1+\nu} \left(\bar{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\bar{\varepsilon}) \bar{I} \right) \quad (3.19-21)$$

Soit, selon les paramètres E et ν :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} + \frac{\nu}{1+\nu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \quad (3.19-22)$$

Nous pouvons en déduire ε_3 :

$$0 = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_3 + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (3.19-23)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{-\nu}{1-\nu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (3.19-24)$$

Par substitution, nous pouvons déterminer σ_1 et σ_2 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1) \end{aligned} \quad (3.19-25)$$

Les calculs réalisés dans ce chapitre, permettront l'exploitation des mesures réalisées au moyen des rosettes grâce à un traitement informatique dont le code se trouve en annexe H (fonction SGR).

Remarquons que, dans la pratique, nous recherchons la direction principale, φ c'est-à-dire la valeur de l'angle entre le vecteur directeur \bar{a} et le vecteur \bar{e}_1 soit $-\phi$. φ nous est donné directement par l'équation (3.19-16) :

$$\varphi = -\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\varepsilon_b - d}{\varepsilon_a - d} \right) \quad (3.19-26)$$

Ainsi, à partir des paramètres E et ν de l'acier constituant la presse LVP, et des mesures de déformation de chacune des trois grilles d'une rosette, nous pourrions déterminer au point M, point d'intersection des axes longitudinaux des grilles :

- La direction principale par rapport à la grille 'a' : φ
- Les déformations principales dans le plan de surface de la jauge : ε_1 et ε_2
- Les contraintes principales dans le plan de surface de la jauge : σ_1 et σ_2

4 Caractérisation de la chaîne d'acquisition

4.1 Introduction

Nous présentons ici les structures physique, électrique et informatique de la chaîne d'acquisition de signaux de déformation et nous en définissons les principales caractéristiques électriques et fréquentielles.

L'étude des principaux maillons de cette chaîne a été réalisée. Ainsi le chapitre 3 traite des capteurs, les annexes E et F traitant respectivement des amplificateurs conditionneurs et des convertisseurs analogique- numérique delta sigma équipant le système HBM MGC+.

4.2 Structure physique de la chaîne d'acquisition

Le schéma ci-dessous représente la structure physique de la chaîne d'acquisition des signaux de déformation.

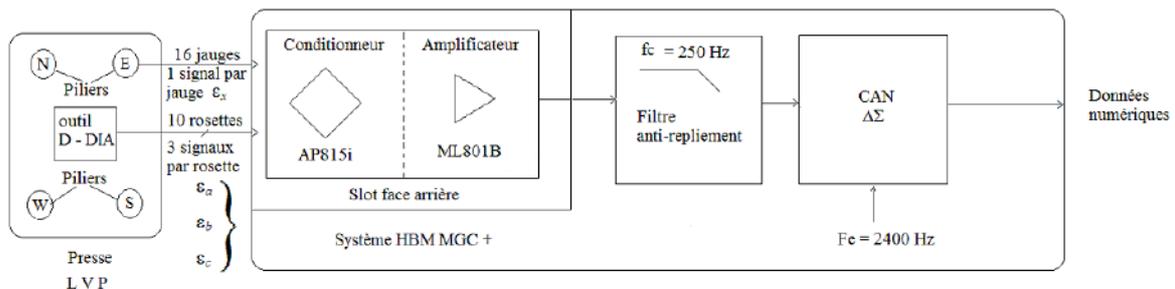


Figure 4.2-1 : Structure physique de la chaîne d'acquisition

Les piliers de la presse sont équipés chacun de 4 jauges de contrainte selon l'implantation suivante :

- Piliers Nord (N) et Sud (S) : 2 jauges au sommet de chaque pilier.
2 jauges à la base de chaque pilier.
- Piliers ouest (W) et Est (E) : 4 jauges au sommet de chaque pilier.

L'outil de la presse (D-DIA) est muni de 8 jauges sur sa partie inférieure et 2 sur sa partie supérieure.

L'implantation de ces capteurs est détaillée dans le rapport d'intervention de la société HBM en annexe I.

Ils sont raccordés au système HBM MGC+ qui intègre les cartes d'amplificateur conditionneur, les convertisseurs analogique-numérique et l'interface permettant de récupérer les données numériques.

Les 4 cartes amplificateur conditionneur dont nous disposons comportent chacune 8 voies d'entrée réparties sur 2 connecteurs 25 points (4 voies d'entrées par connecteur). Nous disposons ainsi de 2 voies de mesures. Ce pendant les rosettes implantées sur l'outil comportant chacune 3 grilles monopolisent chacune un connecteur. Nous ne pouvons donc pas réaliser l'acquisition simultanée des signaux provenant de tous les capteurs. Nous avons alors adopté les trois configurations suivantes :

- Acquisition simultanée des signaux provenant des 16 jauges disposées sur les 4 piliers (16 voies).
- Acquisition simultanée des signaux provenant des 8 rosettes disposées sur la partie inférieure de l'outil. (24 voies)
- Acquisition simultanée des signaux provenant de 6 rosettes disposées sur la partie inférieure de l'outil et des 2 rosettes en vis à vis sur la partie supérieure. (24 voies)

4.3 Structure électrique de la chaîne d'acquisition

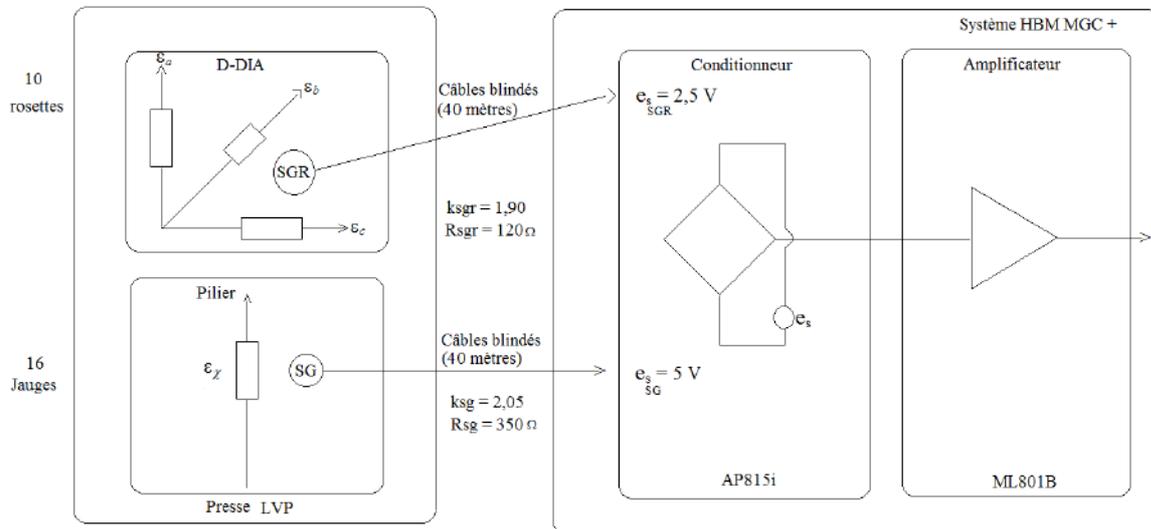


Figure 4.3-1 : Structure électrique de la chaîne d'acquisition

Le schéma ci-dessus nous indique que les capteurs sont reliés par des câbles de 40 mètres. Il s'agit en fait de câbles de 10 mètres et de rallonges de 30 mètres. Cette connectique est blindée.

Ce schéma mentionne également les valeurs typiques des facteurs de jauge (k_{sgr} , k_{sg}) et de résistance nominale de grille (R_{sgr} , R_{sg}) des deux types de capteur que nous utilisons ainsi que les tensions d'alimentation des ponts de Wheatstone ($e_{s_{SG}}$, $e_{s_{SGR}}$).

Lors de nos essais, la valeur de déformation maximale observée sur les grilles des rosettes disposées sur l'outil est de $550 \mu\text{m} / \text{m}$ et de $250 \mu\text{m} / \text{m}$ sur les jauges des piliers. Cela nous permet de calculer les variations relatives et absolues de résistance des grilles de mesure de chacun de ces types de capteur :

$$\begin{aligned}
 \text{Rosette} & \left\{ \begin{aligned} \frac{\Delta R_{sgr}}{R_{sgr}} &= k_{sgr} \varepsilon = 1,9 \times 550 \cdot 10^{-6} = 1,05 \cdot 10^{-3} \\ \Delta R_{sgr} &= 1,05 \cdot 10^{-3} \times R_{sgr} = 1,05 \cdot 10^{-3} \times 120 = 125 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right. \\
 \text{Jauge} & \left\{ \begin{aligned} \frac{R_{sg}}{R_{sg}} &= k_{sg} \varepsilon = 2,05 \times 250 \cdot 10^{-6} = 5,13 \cdot 10^{-4} \\ R_{sg} &= 5,13 \cdot 10^{-4} \times R_{sg} = 1,05 \cdot 10^{-3} \times 350 = 180 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \quad (4.3-1)$$

A partir de ces valeurs, calculons les tensions maximales présentes en entrée des amplificateurs conditionneurs (sous réserve d'aucune perte en ligne) :

$$\begin{aligned} \text{Rosette} \left\{ v_m = \frac{e_{s_{sgr}}}{4} \frac{\Delta R_{sgr}}{R_{sgr}} = \frac{2,5}{4} \times 1,05 \cdot 10^{-3} = 656 \mu V \right. \\ \text{Jauge} \left\{ v_m = \frac{e_{s_{sg}}}{4} \frac{\Delta R_{sg}}{R_{sg}} = \frac{5}{4} \times 5,13 \cdot 10^{-4} = 641 \mu V \right. \end{aligned} \quad (4.3-2)$$

Ces faibles niveaux expliquent la sensibilité des signaux de déformation aux perturbations produites par le réseau d'alimentation 50 Hz.

4.4 Caractéristiques fréquentielles de la chaîne d'acquisition

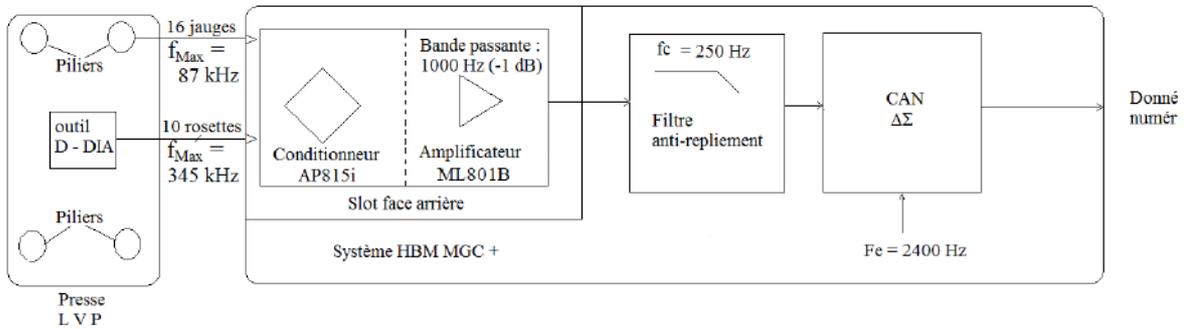


Figure 4.4-1 : Caractéristiques fréquentielles de la chaîne d'acquisition

Les bandes passantes des capteurs sont calculées à partir des données suivantes :

- Module de Young de l'acier de la presse : 210 GPa
- Densité volumique de l'acier : 7850 kg / m³
- Longueur des grilles de mesure des jauges : 6mm
- Longueur des grilles de mesure des rosettes : 1,5 mm

$$\begin{aligned}
 \text{Rosette} \left\{ \begin{aligned} f_m &= \sqrt{\frac{E}{d}} \frac{1}{10L} = \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{7850}} \times \frac{1}{10 \times 1,5 \cdot 10^{-3}} = 345 \text{ kHz} \\ \text{Jauge} \left\{ \begin{aligned} f_m &= \sqrt{\frac{E}{d}} \frac{1}{10L} = \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{7850}} \times \frac{1}{10 \times 6 \cdot 10^{-3}} = 87 \text{ kHz} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (4.4-1)
 \end{aligned}$$

Les amplificateurs conditionneurs possèdent une bande passante de 1000 Hz (-1 dB). Nous avons retenue la fréquence d'échantillonnage \$F_e\$ maximale de 2400 Hz afin d'être en mesure de réaliser l'acquisition de signaux brefs. A celle-ci est associé par défaut, un filtre anti-repliement dont la fréquence de coupure \$f_c\$ est de 250Hz. Ce rapport \$F_e / f_c\$ de l'ordre de 1à permet la reconstruction de signaux non sinusoïdaux.

C'est la fréquence de coupure du filtre anti-repliement que détermine la bande passante de la chaîne d'acquisition.

4.5 Structure informatique de la chaîne d'acquisition

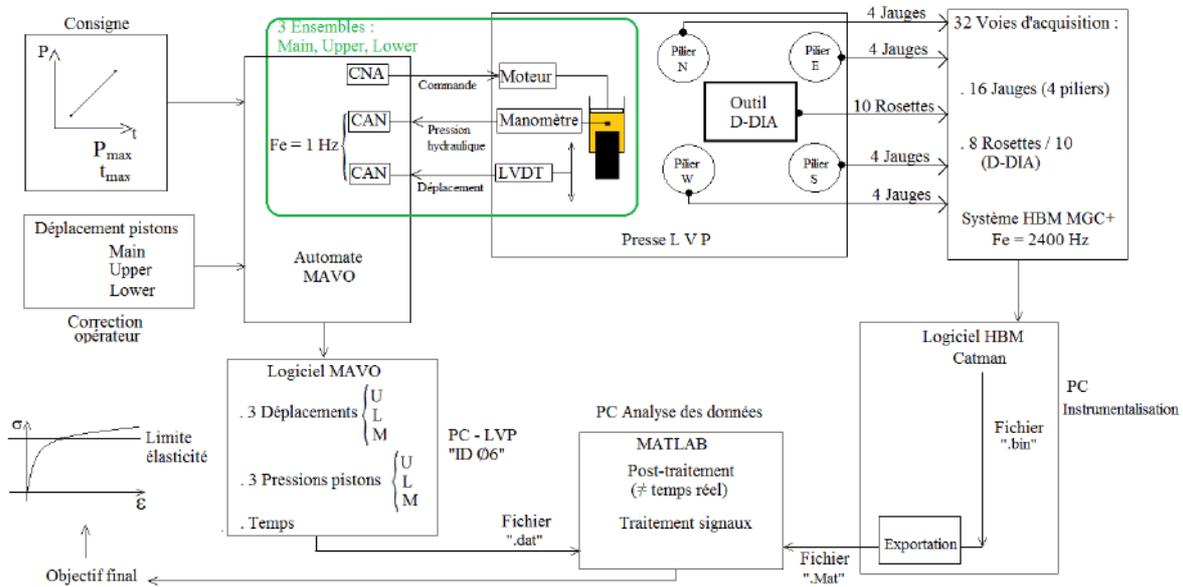


Figure 4.5-1 : Structure informatique de la chaîne d'acquisition

Ce schéma fait apparaître 2 sources de signaux :

- A gauche, l'automate Mavo pilotant la presse.
Ces signaux sont au nombre de 6 : 3 signaux de mesures de déplacement dont celui de l'outil principal (Main) et « signaux de mesure de pression hydraulique de chacun des trois vérins dont celui actionnant le piston principal(Main). Chacune de ces mesures est datée. La fréquence d'échantillonnage est de 1 Hz. L'automate permet le pilotage de la presse par définition de la consigne de pression ainsi que des corrections de la part de l'opérateur. Les données peuvent être traitées directement sous le logiciel Matlab ®.
- A droite, les signaux de déformation provenant de la chaîne d'acquisition.
La fréquence d'échantillonnage est de 2400 Hz. Cette instrumentation est gérée par son propre logiciel Catman ®. Le post traitements des signaux nous demande de réaliser une exportation des données au format Matlab ®.

Lors de cette étude nous avons été confrontés à deux problèmes :

- Les deux sources de signaux ne sont pas synchronisées.

- Les données fournies par le système HBM sont très volumineuses ; le constructeur spécifie un volume de données de 350 Mo pour :
 - 10 voies de mesure
 - Une fréquence d'échantillonnage de 2400 Hz
 - Une durée d'acquisition de 30 minutes

Dans le cadre de nos essais sur l'outil (24 voies sur 12 heures) cela nous a conduit à des fichiers de 20,1 Go et de 13,5 Go lors d'essai sur les piliers (16 voies 12 heures). D'où la nécessité de traiter ces signaux sur de courtes durées d'observation (100 s maximum) et capteur par capteur.

5 Traitement des signaux issus de l'automate pilotant la presse

5.1 Introduction

Parmi l'ensemble des signaux issus de l'automate pilotant la presse, nous avons étudié plus particulièrement la mesure de la pression d'huile du vérin actionnant le piston principal (*Main Pressure*). C'est en effet, des 6 signaux disponibles, autres que ceux issus des jauges de contrainte, celui donnant une mesure directe de la force s'exerçant l'outil D-DIA. Ce dernier distribuant cette force de façon égale sur chacune des faces d'un cube de 70 mm de côté placé au centre de l'outil. Ce cube peut être constitué soit d'un cube d'aluminium soit d'un ensemble cubique de huit enclumes secondaires enserrant un octaèdre, à l'intérieur duquel est inséré l'échantillon géologique soumis à essai. Cette deuxième configuration étant une configuration grandeur nature d'une expérience scientifique. Le code écrit sous Matlab[®] réalisant les traitements décrits dans ce chapitre se trouve en annexe H.



Figure 5.1-1 : Cube d'aluminium

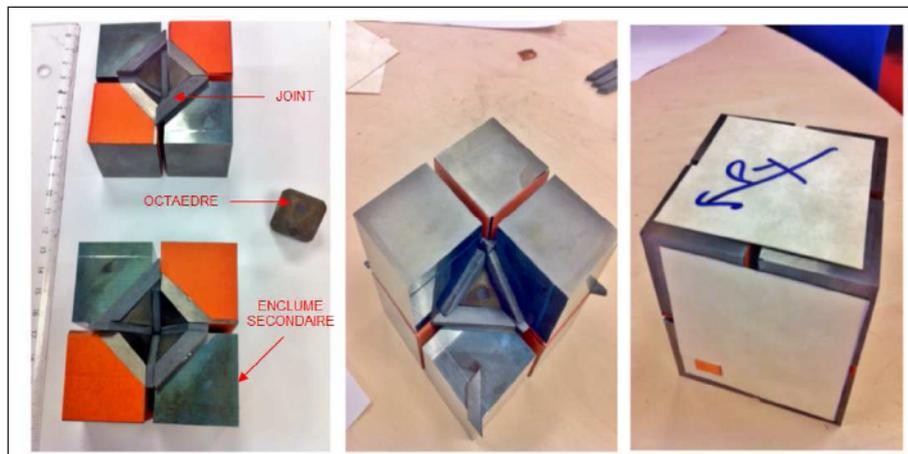


Figure 5.1-2 : Assemblage d'un groupe de 8 enclumes secondaires

Les signaux de mesure de pression (*Upper* et *Lower Pressure*) ne reflètent que des différences de pressions pouvant être appliquées directement sur le cube.

Le volume de données issues des jauges de contrainte étant très volumineux (cf chapitre 4), l'étude se limitera à la phase de compression, la phase de palier présentant peu de variation et la phase de décompression présentant, par définition, moins de risques.

Nous présenterons également l'évolution de la position verticale du piston principal (*Main Displacement*), au cours de ces deux essais.

5.2 Choix des Essais étudiés

Il s'agit d'un signal numérique échantillonné dans le temps à une fréquence de 1 Hz et numérisé. Il provient d'un manomètre. L'étude du signal « *Main Pressure* » (MP) sera illustrée par deux essais. Nous donnons les principales données de ces essais dans le tableau ci-dessous :

	Essai_1	Essai_2
Date de l'essai :	03/06/2013	07/08/2013
Pression du palier :	300 bar	
Force équivalente :	864,6 tf / 8,48 MN	
Taux de compression :	1 bar / min	
Structure soumise à compression :	Cube d'Aluminium	Echantillon géologique
Portion du signal étudié :	500 s à 18 000 s	
Pression hydraulique initiale P_0 :	13,4 bar	15,5 bar
Pression hydraulique maximale P_{max} :	299,8 bar	299,3 bar
Fréquence d'échantillonnage :	1 Hz	
Nombre d'échantillons :	17 501	

Tableau 5.2-1 : Données principales des essais étudiés

La force (en tf) développée par le piston principal est obtenue en multipliant la pression hydraulique du vérin actionnant le piston par le facteur 2,882. Nous en donnons également la conversion en MN. Le choix de ces deux essais est motivé par la présence sur la phase de compression de l'Essai_1 de corrections locales de forces réalisées par l'opérateur pilotant la presse. Ceci pour assurer une force globale égale sur chacune des 6 faces du cube (pression hydrostatique). Cette correction est réalisée

au moyen des pistons Upper et Lower induisant en retour des variations sur la pression du piston principal. L'essai_2 est une expérience réalisée par un scientifique. La presse est donc dans un usage scientifique.

5.3 Observation du signal Main Pressure (MP)

L'allure du signal MP au cours de ces deux essais est présentée ci-dessous :

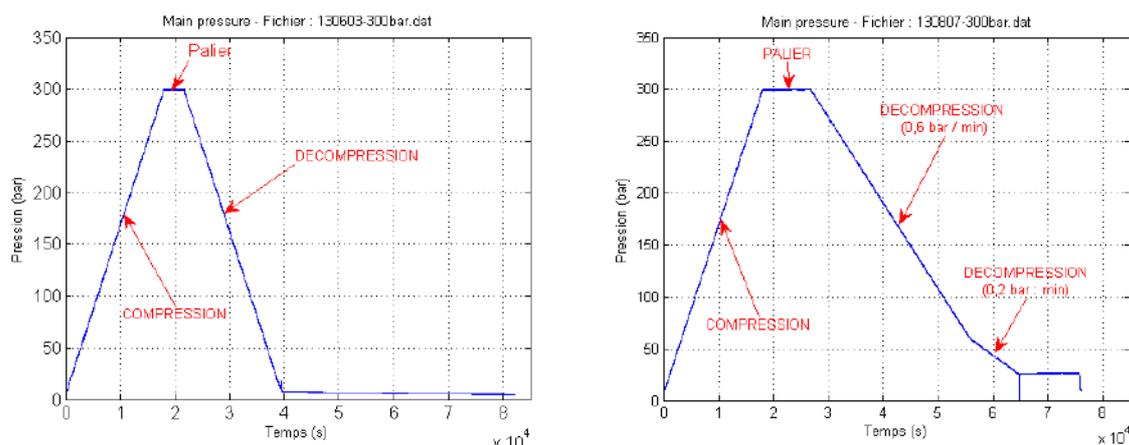


Figure 5.3-1 : Signal « Main Pressure MP » - Essai_1 et Essai_2

Nous pouvons aisément repérer les trois phases principales d'un essai :

- Compression :
La durée de cette phase est identique pour chacun des essais car le taux de compression est fixé à 1 bar / min soit une durée 18 000 s (5h) pour atteindre les 300 bar du palier.
- Palier :
Pression maintenue constante pendant la phase d'expérimentation.
- Décompression :
Elle s'effectue au même taux que la compression lorsque le cube est constitué d'un bloc d'aluminium. Par contre, lorsqu'il s'agit d'expérimentations scientifiques sur un échantillon géologique (Essai_2), ce taux de décompression est choisi inférieur à celui de la compression afin de relâcher le moins brutalement possible les contraintes sur les enclumes secondaires et d'éviter ainsi qu'elles cassent. (Essai_2 : 0,6 bar / min puis 0,2 bar / min en fin de compression)

Notre étude portant sur les phases de compression, examinons celles-ci de plus près sur les essais que nous avons choisi d'étudier.

5.3.1 Fermeture de l'outil D-DIA

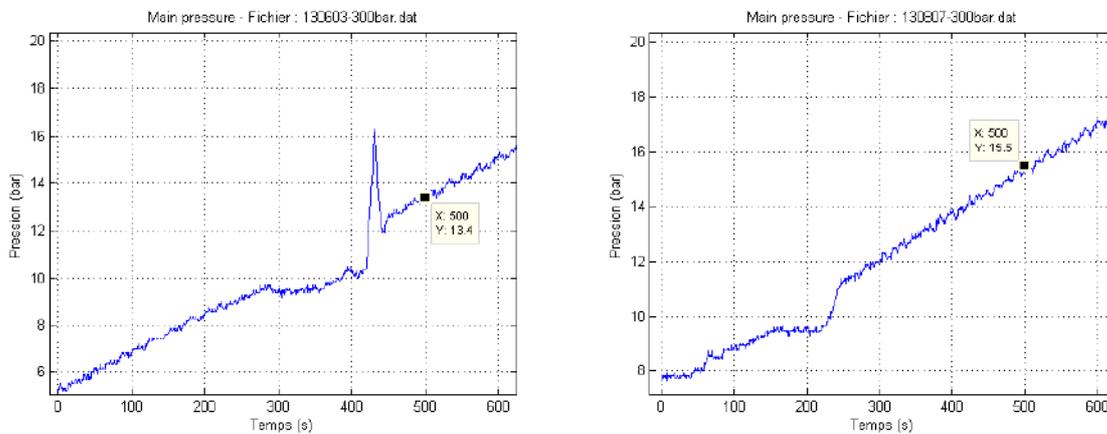


Figure 5.3-2 : Fermeture de l'outil D-DIA – Essai_1 et Essai_2

La compression débute avec une séquence « d'alignement et de fermeture de l'outil (D-DIA) ». Cette séquence systématique consiste à aligner et mettre en contact les parties supérieure et inférieure de l'outil. Elle est très différente d'un essai à l'autre car dépendante de la position relative initiale des deux parties du D-DIA.

Lors de cette séquence, la pression du piston principal ne sert qu'à faire descendre la partie supérieure de l'outil vers la partie inférieure, et nous verrons, lors de l'étude des signaux issus des jauges de contrainte, que l'outil ne subit aucune déformation avant la fin de cette séquence.

Enfin, cette séquence est entièrement pilotée par l'automate sans aucune intervention de l'opérateur. Pour toutes ces raisons nous excluons cette phase d'alignement et de fermeture de notre étude.

La compression peut, par conséquent, débiter à des instants très différents mais pour une pression de l'ordre de 10 bar. Cela justifie le choix de l'instant de départ des phases de compressions repérés sur la Figure 5.3-2 et choisi à $t = 500$ s (Tableau 5.2-1). Ce choix explique que, dans l'analyse qui va suivre, les signaux temporels démarrent à 500 s.

5.3.2 Correction des forces par l'opérateur

Examinons maintenant, sur les figures ci-dessous, l'influence sur le signal MP que peuvent avoir les corrections des forces effectuées par l'opérateur. Ces corrections sont réalisées en imposant des déplacements aux pistons secondaires (*Upper* et *Lower*) modifiant ainsi la pression appliquée par le piston principal. Par la suite, lorsque nous parlerons de correction sans plus de précision, nous

ferrons référence à cette action de l'opérateur résultant en une modification de la consigne en pression du piston principal.

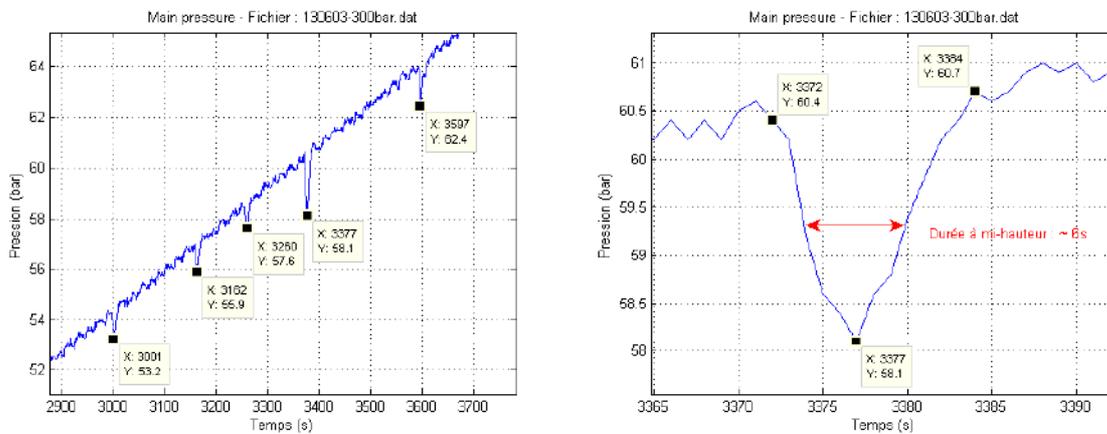


Figure 5.3-3 : Influence des corrections de forces sur le signal MP – Essai_1

Nous remarquons que l'amplitude de ces corrections effectuées lors de l'Essai_1 peut atteindre environ 2 bar comme l'illustrent la figure ci-dessus. Nous devons en tenir compte dans la suite de notre analyse.

5.4 Définition de la consigne de pression

Il s'agit du signal de commande $u(t)$ envoyé au vérin actionnant le piston principal afin que celui-ci applique à l'outil la force voulue par l'opérateur. L'opérateur définit 2 paramètres :

- La pression maximale P_{max} à atteindre et maintenue pendant le palier (ici $P_{max} = 300$ bar).
- La durée de la phase de compression, D_c , ici de 18000 s, fixant ainsi le taux de compression (1 bar / min).

Cependant, nous ignorons totalement par quel algorithme le concepteur de la presse a traduit cette consigne pour que l'automate actionne le moteur poussant la seringue mettant ainsi sous pression l'huile contenue dans le vérin. Ce dernier assurant la descente du piston principal.

Hypothèse :

Nous partons de l'hypothèse que la consigne utilisateur peut être modélisée par une ligne droite passant par les deux points qui sont les paramètres d'entrée de l'automate fournis par l'utilisateur :

- Instant de départ t_0 et pression initiale P_0
- Instant de fin de compression $t_0 + D_c$ et pression à atteindre P_{max}

Le signal de la mesure de pression MP est échantillonné à la cadence $T_e = 1$ s. La cadence d'échantillonnage du signal MP étant fixe, on repère les échantillons par l'indice chronologique n . Ce signal peut être défini comme la somme de deux signaux :

- **La consigne utilisateur traduite par l'automate, $u(n)$, sera considérée comme étant la tendance du signal MP.**
- **L'effet de cette consigne sur la presse, $s(n)$, signal mesuré aux mêmes instants nT_e . Cet effet est le « signal utile », porteur d'information qui peut nous renseigner sur le comportement de la presse en réponse à la consigne.**

$$\begin{aligned} MP(n) &= u(n) + s(n) \\ u(n) &= a.(n) + b \end{aligned} \quad (5.4-1)$$

Pour cette raison, nous avons tenté de modéliser la consigne $u(n)$ afin de pouvoir la soustraire au signal MP porteur de l'information recherchée. Soit MP_s ce signal utile, MP_s = MP - u, objet de notre étude.

Ultérieurement, lorsque nous parlerons de consigne, ce sera sauf précision contraire, la consigne mise en œuvre par l'automate. Nous parlerons aussi de tendance du signal MP. Les deux vocables étant synonymes au niveau de la représentation physique des choses.

5.5 Modélisation de la tendance du signal MP

Les diverses tentatives de modélisation de la tendance de MP sont décrites ci-après. Pour chacune d'elles, nous avons examiné l'allure de cette modélisation par rapport au signal original MP, l'allure du signal MP_s tel que défini ci-avant, le tracé de l'histogramme de ses amplitudes afin d'identifier leur distribution, et enfin indiqué les valeurs caractéristiques de ses amplitudes :

- Moyenne
- Ecart type
- Valeur maximale
- Valeur minimale

Nous comparerons trois méthodes de modélisation de la tendance de la consigne mise en œuvre par l'automate.

- 1) Régression linéaire modélisée (§ 5.5.1)
- 2) Modélisation par rampe d'échelon (§ 5.5.2)
- 3) Modélisation par moyenne glissante (§ 5.5.3)

Nous examinerons les avantages et les défauts de chacune d'elles. Ainsi pourrons-nous choisir celle qui nous paraîtra la mieux adaptée à l'objet de notre recherche.

5.5.1 Modélisation de la tendance du signal MP par régression linéaire

5.5.1.1 Méthode

Partant de l'hypothèse que nous avons posée au paragraphe 5.4 sur la consigne $u(n)$, nous choisissons de modéliser la tendance du signal MP par une droite d'équation $y = ax + b$, obtenue par régression linéaire.

Cette méthode permet de définir la droite passant au plus près, au sens des moindres carrés, de tous les points du signal MP.

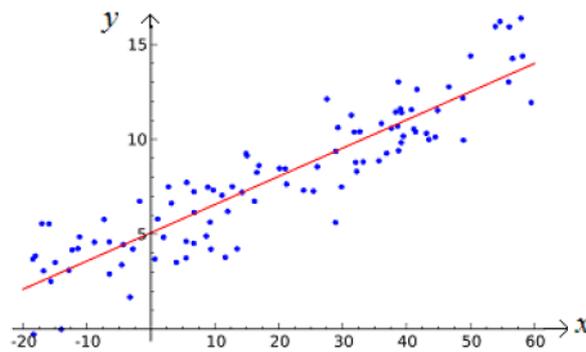


Figure 5.5-1 : Exemple de régression linéaire

Pour un nuage de points (x,y) , le coefficient directeur a et l'écart à l'origine b sont définis par :

$$\begin{cases} a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \\ b = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (5.5-1)$$

Dans notre cas, la variable x est la variable discrète temporelle $n.T_e$, et la variable y représente les valeurs d'amplitude du signal MP aux instants $n.T_e$.

5.5.1.2 Allure de la tendance modélisée par régression linéaire du signal MP

Nous avons constaté que cette modélisation est peu adaptée à la prise en compte des corrections éventuelles réalisées par l'opérateur comme cela est mis en évidence sur la ci-dessous :

En effet, ces corrections étant une modification de consigne (entrée de commande), il nous faut trouver un moyen de nous en affranchir.

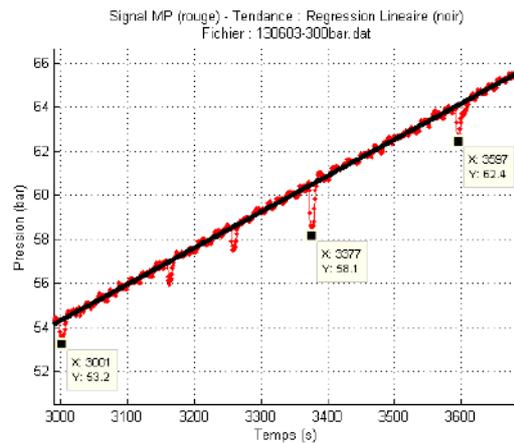


Figure 5.5-2 : Modélisation de la tendance du signal MP par régression linéaire – Essai_1

En observant le signal MP des Essais_1 et 2 sur une portion durant laquelle aucune correction n'a été réalisée, nous constatons que ce signal est proche d'une rampe d'échelons dont l'amplitude est d'environ 0,5 bar. La durée des paliers est variable d'un essai à l'autre. Elle est par exemple de l'ordre 18 s (18 échantillons en moyenne par palier) lors de l'Essai_1 présenté ci-dessous et 15 s lors de l'Essai_2.

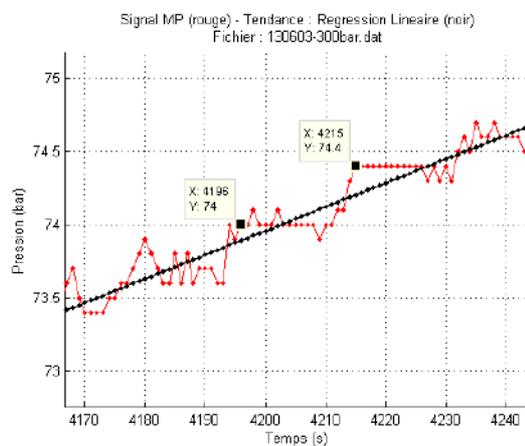


Figure 5.5-3 : Mise en évidence de la présence d'échelons dans le signal MP - Essai_1

5.5.1.3 Signal MPs

Le signal MPs est obtenu en soustrayant au signal MP la tendance que nous venons d'estimer par régression linéaire selon l'équation (5.4-1).

Pour chacun des essais, les représentations temporelles de MPs, la distribution des valeurs d'amplitude prise par ce signal, et ses valeurs caractéristiques figurent ci-dessous :

- Représentation temporelle

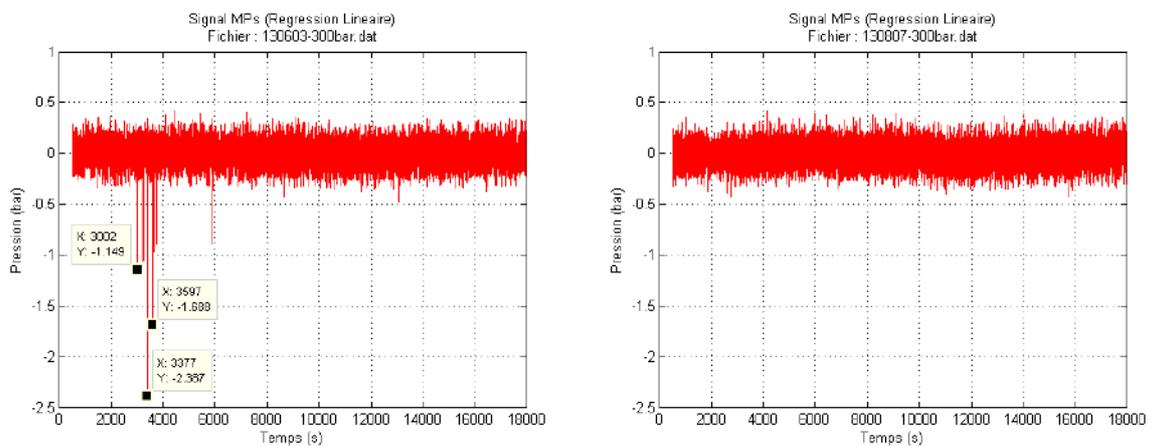


Figure 5.5-4 : Régression linéaire : Signal MPs - Essai_1 et 2

La présence de corrections (Figure 5.5-4, Essai_1 tracé gauche), est identifiable par l'apparition de pics dans la représentation temporelle de MPs. Ces pics sont dus aux interventions de l'opérateur sur l'entrée non prises en compte dans la régression.

En l'absence de correction (Figure 5.5-4, Essai_2 tracé droit), le signal MPs est centré.

Ces représentations temporelles permettent de constater que MPs est centré, montrant ainsi que sa moyenne est constante (ici nulle). Nous avons ainsi pu rendre le signal MP stationnaire à l'ordre 1.

- Distribution

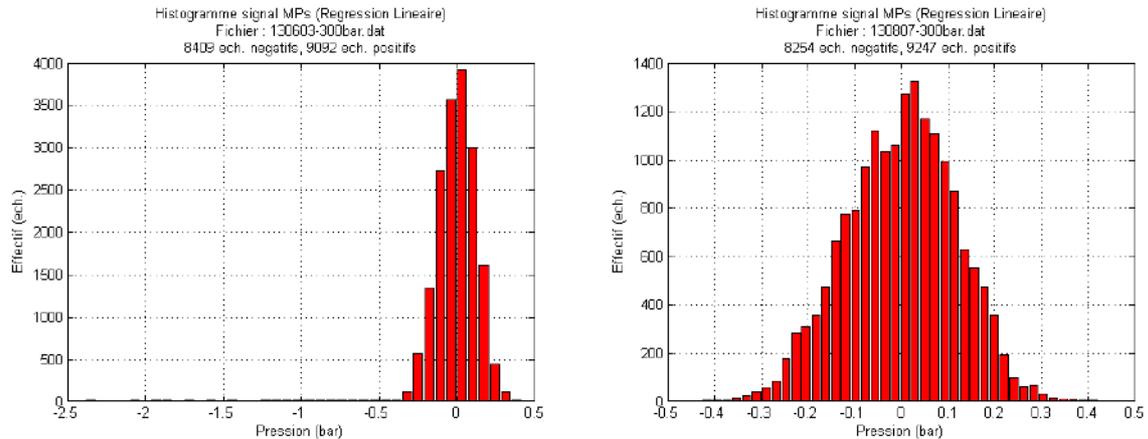


Figure 5.5-5 : Régression linéaire : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2

Sur chaque histogramme sont mentionnés les effectifs des classes négatives et positives. Ces valeurs, ramenées au nombre total d'échantillons $N = 17501$, nous permettent de calculer les ratios de valeurs négatives / positives suivants :

- Essai_1 : 48 % / 52 %
- Essai_2 : 47 % / 53 %

La présence de corrections (Figure 5.5-5, Essai_1 tracé gauche), provoque une dissymétrie dans la répartition de ses valeurs s'étendant de -2,5 à 0,5 bar traduisant ainsi le fait que notre régression n'est pas optimum. Ceci pourrait être une source d'information de correction sur la consigne utilisateur.

En l'absence de correction (Figure 5.5-5, Essai_2 tracé droit), la distribution des valeurs de MPs est centrée autour de $\pm 0,4$ bar.

Ces distributions semblent à première vue gaussiennes.

- Valeurs caractéristiques

	Essai_1	Essai_2
Moyenne (bar)	$1,6053 \cdot 10^{-14}$	$1,0981 \cdot 10^{-13}$
Ecart Type (bar)	0,1312	0,1177
Minimum (bar)	-2,3866	-0,4272
Maximum (bar)	0,4215	0,4219

Tableau 5.5-1 : Régression Linéaire : Valeurs caractéristiques du signal MPs – Essai_1 et 2

Les moyennes des signaux sont pratiquement nulles confirmant l'aspect centré des représentations temporelles. Cependant les valeurs minimales et maximales non symétriques dans le cas de l'Essai_1 trahissent la présence de corrections.

Afin de compléter l'étude temporelle de signal MPs il nous faut calculer la fonction d'autocorrélation de ce signal. Nous allons utiliser cette fonction pour déterminer le rayon de corrélation afin ultérieurement de pouvoir tronçonner un signal à bon escient. Elle nous permettra également de segmenter un signal de telle sorte que l'information perdue du fait de la troncature du signal soit minimale. Pour cela, présentons brièvement le calcul des fonctions de corrélation et leurs propriétés.

5.5.1.4 Fonction de Corrélation :

La fonction de corrélation permet de comparer deux signaux différents décalés d'une durée τ . On parle d'intercorrélation. Cette fonction peut être vue comme l'évolution du produit scalaire de deux signaux en fonction de leur décalage temporel l'un par rapport à l'autre. Ainsi elle est assimilable à une mesure de ressemblance.

Homogène à une énergie, c'est également une mesure de l'échange d'énergie entre les signaux.

- Fonction d'intercorrélation

Pour des signaux de puissance finie (signaux périodiques par exemple), la corrélation est donnée par :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (5.5-2)$$

Dans le cas de signaux échantillonnés périodiques, cette estimation calculée selon l'équation (5.5-6) est biaisée. Ce biais est dû au fait que pour les valeurs de décalage k extrêmes (en début et fin du signal), le nombre de valeurs du signal disponibles pour réaliser le calcul croît ou décroît linéairement pour atteindre N . Nous sommes dans les zones « transitoires » de la réponse de la fonction de corrélation. Cela revient à multiplier la corrélation par une fenêtre triangulaire où le biais sera nul au centre du triangle.

L'estimateur non biaisé pour ces signaux est :

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=0}^{N-k-1} x(n)y(n-k) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.5-3)$$

Elle est définie pour des signaux continus $x(t)$ et $y(t)$, à énergie finie (signaux transitoires par exemple) par :

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t-\tau)dt = \left(x(t) * y^\#(t)\right)_{(\tau)} \quad (5.5-4)$$

Les signaux étant réels :

$$y^*(t) = y(t) \quad (5.5-5)$$

La fonction de corrélation de signaux échantillonnés $x(n)$ $y(n)$, à énergie finie et de durées limitées respectives de N et M échantillons, est donnée par :

$$C_{xy}(k) = \sum_{n=0}^{M+N-1-k} x(n)y(n-k) \quad 0 \leq k \leq M+N-1 \quad (5.5-6)$$

Et pour des signaux discrets à puissance moyenne finie par :

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N+M-1-k} x(n)y(n-k) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.5-7)$$

Le support de la fonction de corrélation numérique est ainsi de $(M+N-1)$ échantillons. Nous pouvons observer que ce calcul de corrélation est réalisé non pas sur une infinité de valeurs mais sur un nombre fini d'amplitude des signaux x et y . C'est donc une estimation de la fonction de corrélation. Etant amenés à traiter des signaux aléatoires rendu stationnaires et donc à puissance moyenne finie, nous réaliserons les calculs de fonction de corrélation selon l'équation (5.5-7).

Le logiciel utilisé (Matlab ®) réalise ce calcul en rendant, si nécessaire, M égal à N . Il procède en ajoutant des zéros au signal de durée la plus courte (*Zeroppadding*). Le support de la corrélation est alors de $(2N-1)$ échantillons avec la correspondance suivante :

- $-\tau_M$ retard minimum \rightarrow échantillon n° 1
- $\tau=0$ \rightarrow échantillon n° N
- τ_M retard maximum \rightarrow échantillon n° $2N-1$

- Fonction d'autocorrélation

Dans le cas où $x = y$, on parle d'autocorrélation du signal x notée $C_{xx}(\tau)$ ou $C_{xx}(k)$.

Le calcul de l'autocorrélation d'un signal échantillonné est :

$$C_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1-k} x(n)x(n-k) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.5-8)$$

Cette fonction permet de déterminer :

- Si le signal décalé d'une durée τ ressemble au signal original et permet aussi de détecter la présence d'une composante périodique dans ce signal.
- La durée au-delà de laquelle le signal ne dépend plus ou très peu de son passé (mémoire) : il s'agit du temps de corrélation τ_c tel que :

$$|C_{xx}(\tau)| \approx 0 \quad \tau_c \leq |\tau| \quad (5.5-9)$$

L'information supplémentaire contenue au-delà de τ_c est minimum. Aussi en tronquant ce signal en tranches de durée τ_c nous perdons une quantité d'information minime quantifiable.

- La valeur de la puissance moyenne du signal temporel obtenue pour un décalage nul ($\tau=0$ en temps continu, $k = N$ en temps discret) est estimée à partir de :

$$C_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2 \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.5-10)$$

Les principales propriétés de l'autocorrélation sont données ici pour des signaux échantillonnés. Ces mêmes propriétés sont vérifiées aussi pour de signaux continus (l'indice k devenant la variable temporelle τ).

De plus, l'inégalité de Schwartz nous permet d'écrire :

$$|C_{xx}(k)| \leq C_{xx}(0) \quad (5.5-11)$$

De même, comme nous calculons une fonction d'autocorrélation celle-ci est une fonction paire :

$$|C_{xx}(-k)| \leq C_{xx}(k) \quad (5.5-12)$$

Lorsque le signal x est aléatoire centré :

$$\lim_{k \rightarrow 0} C_{xx}(k) = \lim_{k \rightarrow 2N-1} C_{xx}(k) = 0 \quad (5.5-13)$$

- Autocorrélation

L'autocorrélation de MPs pour chacun des deux essais est donnée ci-dessous :

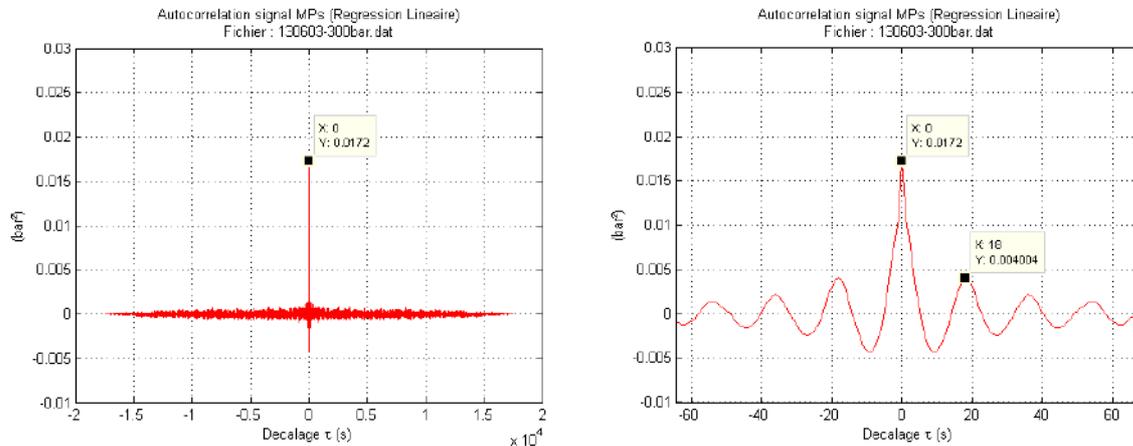


Figure 5.5-6 : Régression Linéaire : Autocorrélation du signal MPs – Essai_1

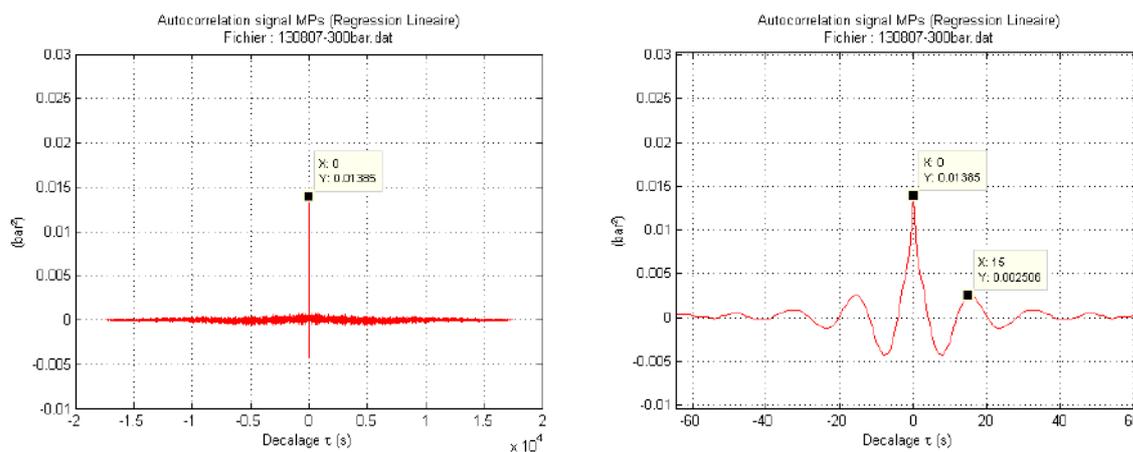


Figure 5.5-7 : Régression Linéaire : Autocorrélation du signal MPs – Essai_2

Nous pouvons définir un ratio de décorrélation, R , comme étant le rapport de l'amplitude du pic central ($\tau = 0$) et du premier pic le plus important. D'après ces courbes, la valeur de R est pour l'essai_1 de 4,30 et de 5,53 pour l'Essai_2.

Ces courbes nous indiquent également la présence d'un signal périodique noyé dans le bruit. Sa périodicité est respectivement de 18 s et 15 s pour les Essai_1 et 2 et correspond à la périodicité en relation avec les échelons observés sur les signaux temporels MP (Figure 5.5-3).

Son origine peut être attribuée au fait que cette mesure est réalisée par un manomètre dont la résolution de 0,5 bar se retrouve dans l'amplitude des échelons. La périodicité est elle fonction du taux de compression choisi (1 bar / min). Enfin pour $\tau = 0$ est indiquée la puissance moyenne de MP pour chacun des essais.

5.5.2 Modélisation de la tendance du signal MP par une rampe en échelon

5.5.2.1 Méthode

Les observations faites au chapitre précédent nous ont incités à synthétiser un signal en échelons.

Cette rampe d'échelons est calculée afin que le milieu de chaque échelon soit aligné sur la droite de régression linéaire définie au paragraphe 5.5.1.1.

La durée de chaque échelon stp est déterminée à partir des résultats du calcul d'autocorrélation précédents obtenus à partir du signal MPs, déduit par soustraction de la droite modélisée par régression linéaire au signal MP. Les résultats d'autocorrélation ayant fait apparaître une périodicité de 15 à 18 secondes.

Le nombre d'échelons $Nbstp$ est donné par :

$$Nbstp = \text{Arrondi.Inférieur} \left(\frac{D_c}{stp} \right) \quad (5.5-14)$$

L'amplitude des échelons dp par :

$$dp = \frac{P_{Max} - P_0}{Nbstp} \quad (5.5-15)$$

Avec :

- D_c : Durée de la phase de compression (hormis la séquence de fermeture de l'outil)
- P_0 : Pression de départ atteinte après la séquence de fermeture de l'outil.
- P_{Max} : Pression maximale atteinte en fin de compression.

5.5.2.2 Allure de la tendance du signal MP modélisée par une rampe d'échelons

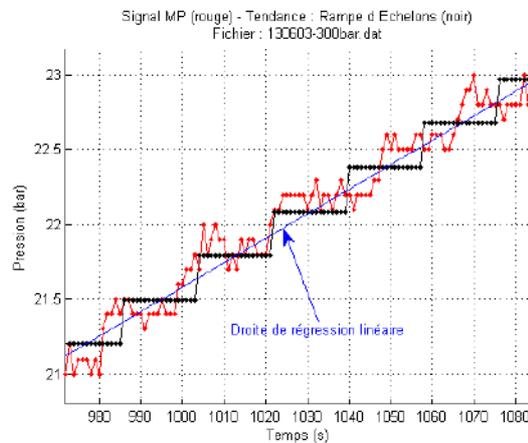


Figure 5.5-8 : Variation de l'amplitude des échelons du signal Mp – Essai_1

Cette modélisation apparaît également limitée pour les deux raisons suivantes :

- L'amplitude des échelons présents dans le signal MP n'est pas fixe et comme l'indique la ci-après, les échelons synthétisés ne coïncident pas toujours avec le signal MP.

Il serait possible de mettre en place une méthodologie d'ajustement basée, par exemple, sur une valeur moyenne de l'amplitude des échelons calculée a posteriori ou de manière glissante. Mais même en mettant en œuvre une telle technique, cela ne nous permettra pas de prendre en compte les interventions au niveau de la consigne utilisateur par l'opérateur.

De plus le décalage temporel entre ces deux signaux n'est pas constant.

- La réalisation d'une correction par l'opérateur décale temporellement le signal synthétisé. L'intervention de l'opérateur étant fonction des desideratas de celui-ci, nous avons une évolution de la consigne utilisateur qui est au bon vouloir de l'opérateur et donc qui pourra être vue comme d'origine aléatoire. Il est donc difficile de la modéliser. Par contre mais par contre elle est facilement identifiable.

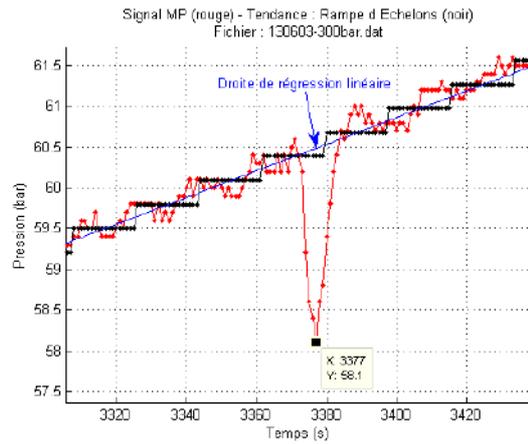


Figure 5.5-9 : Décalage temporel de la rampe en échelons lors d'une correction - Essai_1

Rappelons que les interventions de l'opérateur seront qualifiées de correction, sous entendu, sur la consigne utilisateur. Nous avons donc une consigne globale qui sera la somme de la consigne automate corrigée par les corrections de consigne utilisateur.

5.5.2.3 Signal MPs

Le signal MPs obtenu par soustraction au signal MP de la modélisation de la consigne par une rampe d'échelons est étudié ci-après.

- Représentation temporelle

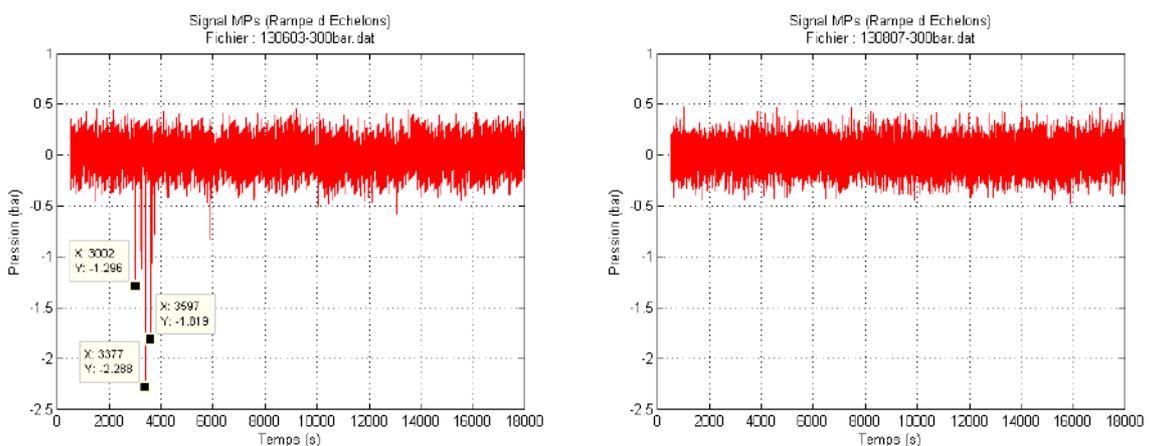


Figure 5.5-10 : Rampe d'échelons : Signal MPs - Essai_1 et 2

La présence de corrections (Figure 5.5-10, Essai_1 tracé gauche) est identifiable dans la représentation temporelle de MPs par la présence de pics.

En l'absence de correction (Figure 5.5-10, Essai_2 tracé droit) le signal de bruit est centré comme ce fut le cas par l'estimation de la tendance par régression linéaire.

- Distribution

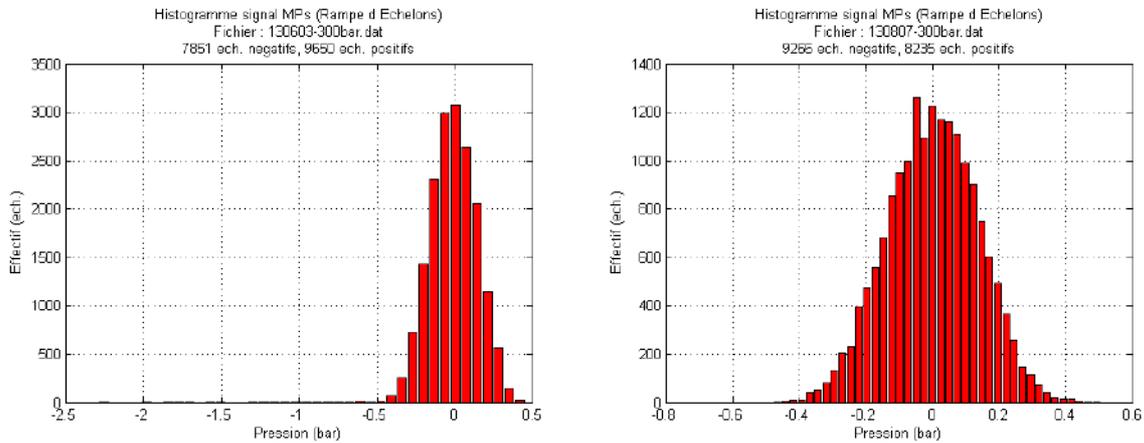


Figure 5.5-11 : Rampe d'échelons : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2

Ici le calcul des ratios de valeurs négatives / positives donne les résultats suivants :

- Essai_1 : 45 % / 55 %
- Essai_2 : 53 % / 47 %

La dissymétrie dans la répartition des valeurs des amplitudes du signal MPs entraînée par la présence de corrections (Figure 5.5-11, Essai_1 tracé gauche) s'étend de -2,25 bar à 0,5 bar pouvant, ici également, renseigner sur la présence de correction sur la consigne utilisateur.

En l'absence de correction (Figure 5.5-11, Essai_2 tracé droit), la distribution est centrée autour de $\pm 0,5$ bar.

Ces distributions, comme dans le cas de la modélisation de la tendance de MP par régression linéaire, semblent gaussienne.

- Valeurs caractéristiques

	Essai_1	Essai_2
Moyenne (bar)	-0,0082	$-2,0407 \cdot 10^{-5}$
Ecart Type (bar)	0,1565	0,1366
Minimum (bar)	-2,2884	-0,4791
Maximum (bar)	0,4529	0,5030

Tableau 5.5-2 : Rampe d'échelons : Valeurs caractéristiques du signal Mps -- Essai_1 et 2

Comme dans le cas précédent de la modélisation par régression linéaire, les valeurs minimale et maximale obtenues sur MPs, dans le cas d'une modélisation en échelon étant non symétriques dans le cas de l'Essai_1, nous indiquent la présence de corrections opérateur. Ce que nous voyons apparaître sous forme pics sur le signal MPs. La présence de corrections (Essai_1) rend ce signal légèrement décentré en moyenne.

- Autocorrélation

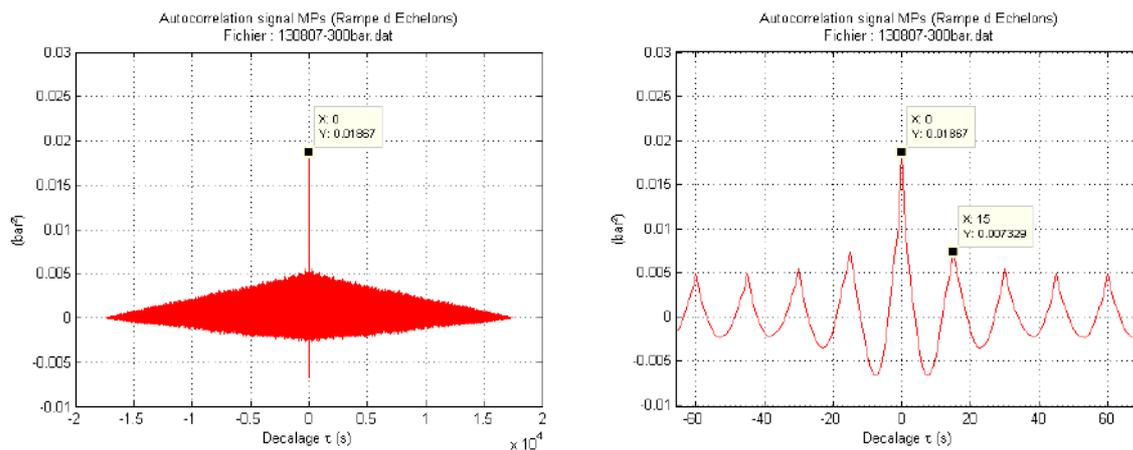


Figure 5.5-12 : Rampe d'échelons : Autocorrélation du signal MPs - Essai_2

Le rapport de décorrélation R vaut ici 2,55.

L'autocorrélation du signal MPs obtenu à partir d'une modélisation en escalier de la tendance est inexploitable **même en l'absence de corrections** (Essai_2) comme nous pouvons le constater sur les résultats de la figure ci-dessus où persiste la périodicité de 15 secondes.

5.5.3 Modélisation de la tendance du signal MP par moyenne glissante

5.5.3.1 Méthode

Afin de tenir compte, dans la modélisation de la tendance de MP, des corrections sur la consigne utilisateur effectuées par l'opérateur, nous avons mis en œuvre un filtrage à moyenne glissante. Il s'agit d'un filtre RIF dont l'étude et les développements théoriques figurent en annexe G.

Le signal de sortie est la moyenne des N_0 échantillons précédents :

$$y(n) = \frac{1}{N_0} \sum_{p=0}^{N_0-1} x(n-p) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-1) + \dots + x(n-N_0-1)}{N_0} \quad (5.5-16)$$

Nous devons nous affranchir de la zone d'amorçage de longueur N_0 échantillons. Nous procéderons en remplaçant les N_0 premiers échantillons de sortie du filtre par les N_0 premiers échantillons du signal d'entrée MP.

La réponse impulsionnelle d'un filtre à moyenne glissante est une fonction Porte de largeur N_0 et d'amplitude $1 / N_0$.

$$h(n) = \frac{1}{N_0} \Pi_{N_0}(n) \quad (5.5-17)$$

Le signal filtré est obtenu par la convolution du signal d'entrée avec la réponse impulsionnelle du filtre :

$$y(n) = \left(x(k) * \frac{1}{N_0} \Pi_{N_0}(k) \right)_{(n)} = \sum_{k=0}^n x(k) h(n-k) \quad (5.5-18)$$

Ce filtrage est de type passe bas, de bande passante proportionnelle à $1 / N_0$, risquant donc d'atténuer les événements brefs que sont les corrections de consigne. Il faut veiller à ne pas « gommer » ces événements. Le choix de la valeur de N_0 s'est fait en fonction de la **durée des événements correctifs** qui est **de l'ordre de 10 échantillons**.

5.5.3.2 Allure de la tendance du signal MP modélisée par moyenne glissante

Les résultats obtenus pour $N_0 = 10$ sont présentés ci-après :

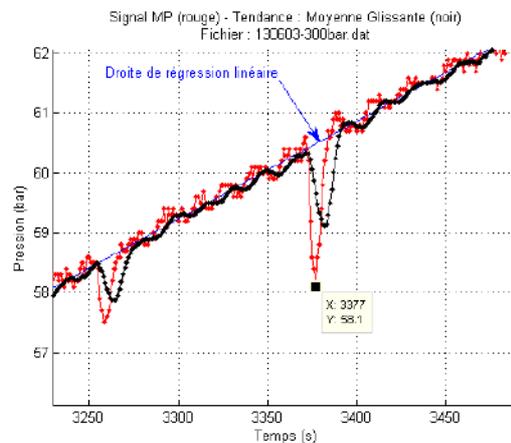


Figure 5.5-13 : Modélisation de la tendance du signal MP par moyenne glissante – Essai_1

Nous observons un décalage temporel fixe entre le signal MP et la modélisation de sa tendance par moyenne glissante. Ce décalage correspond au retard apporté par le filtre (cf annexe G). Ce retard est fonction de la longueur de la réponse impulsionnelle $L = N_o + 1 = 11$ échantillons et de N_s valeur de l'échantillon pour laquelle elle présente un axe de symétrie :

$$\begin{cases} N_s = \frac{L-1}{2} = \frac{N_o}{2} \\ \tau = \frac{d\phi}{d\omega} = -N_s T_e = -\frac{10}{2} T_e = 5s \end{cases} \quad (5.5-19)$$

Par essais successifs, nous avons noté qu'en **décalant le signal** de tendance de **6 échantillons**, les signaux MP et sa tendance apparaissent quasi synchrones :

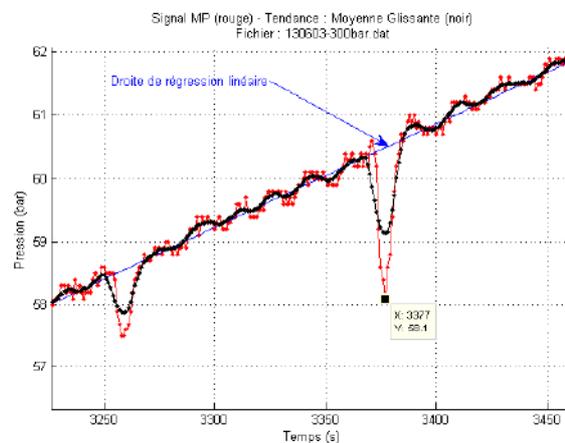


Figure 5.5-14 : Modélisation par moyenne glissante décalée de 6 échantillons - Essai_1

Ce décalage étant en rapport avec la zone d'amorçage du filtre qui va introduire un effet de « traine » ou de retard que nous devons compenser par un avance de 6 secondes. Lors de la réalisation de ce décalage nous supprimerons les 6 derniers échantillons du signal MPs.

5.5.3.3 Signal MPs

Examinons, ci-dessous, le signal MPs obtenu pour les deux essais :

- Représentation temporelle

-

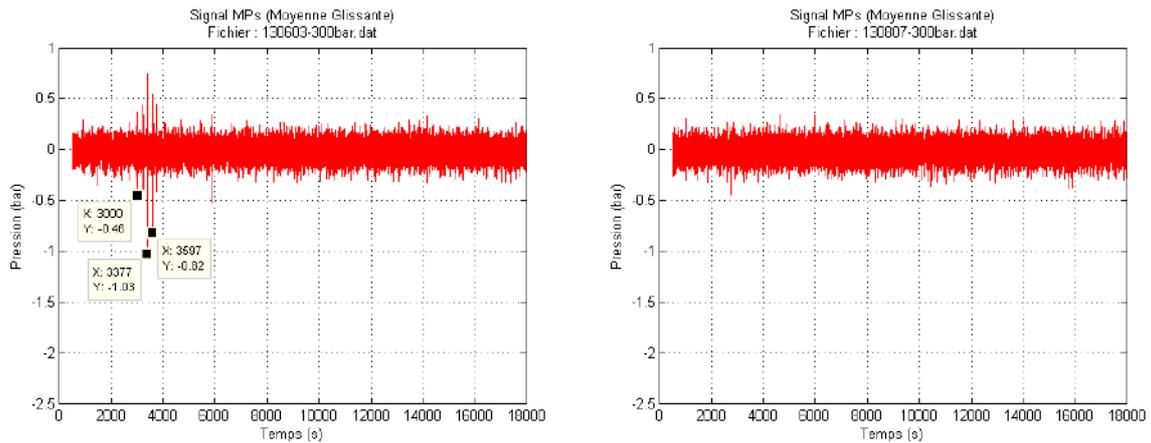


Figure 5.5-15 : Moyenne glissante : Signal MPs - Essai_1 et 2

La présence de corrections (Figure 5.5-15, Essai_1 tracé gauche) se traduit ici également par l'apparition de pics pouvant être positifs ou négatifs.

- Distribution

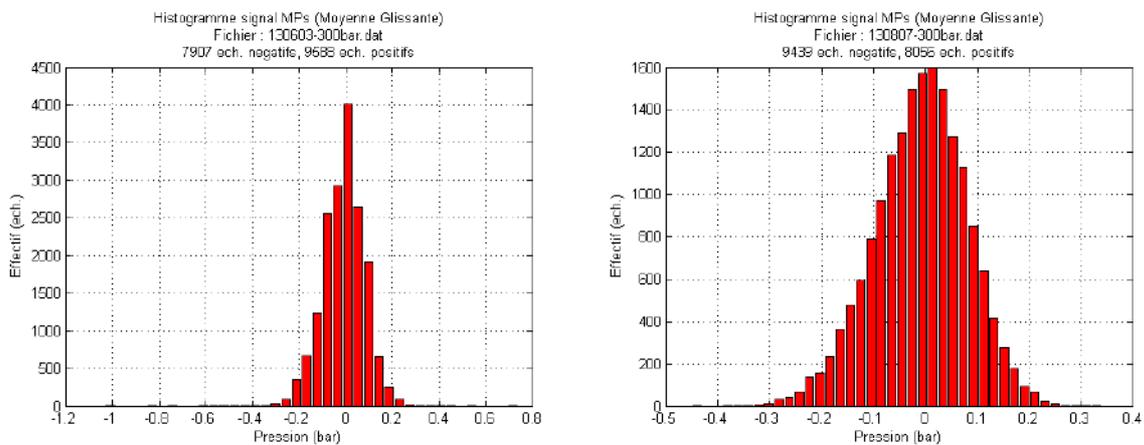


Figure 5.5-16 : Moyenne glissante : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2

Le décalage de la tendance de 6 échantillons a entraîné la suppression des 6 derniers échantillons de chaque essai. Le calcul des ratios de valeurs négatives / positives, est donc réalisé avec un nombre total d'échantillons $N = 17495$, donnant les résultats suivants :

- Essai_1 : 45 % / 55 %
- Essai_2 : 54 % / 46 %

La dissymétrie dans la répartition des valeurs des amplitudes du signal MPs entraînée par la présence de corrections (Figure 5.5-11, Essai_1 tracé gauche) s'étend de -2,25 bar à 0,5 bar pouvant, ici également, renseigner sur la présence de correction sur la consigne utilisateur.

En l'absence de correction (Figure 5.5-11, Essai_2 tracé droit), la distribution est centrée autour de $\pm 0,5$ bar.

Ces distributions, comme dans le cas de la modélisation de la tendance de MP par régression linéaire, semblent gaussienne.

En présence ou non de corrections, la distribution des valeurs de l'amplitude de MPs demeure semblent gaussienne dans les deux cas.

- Valeurs caractéristiques

	Essai_1	Essai_2
Moyenne	-0,0082	-0,0081
Ecart Type	0,0909	0,0907
Minimum	-1,0300	-0,4500
Maximum	0,7400	0,3400

Tableau 5.5-3 : Moyenne glissante : Valeurs caractéristiques du signal Mps - Essai_1 et 2

Les valeurs moyennes sont pratiquement nulles confirmant que le signal MPs est centré, et la valeur des écarts types sont identiques que l'opérateur ait réalisé des corrections de consigne ou non.

- Autocorrélation

L'autocorrélation du signal MPs pour chacun des essais considérés, figure ci-dessous :

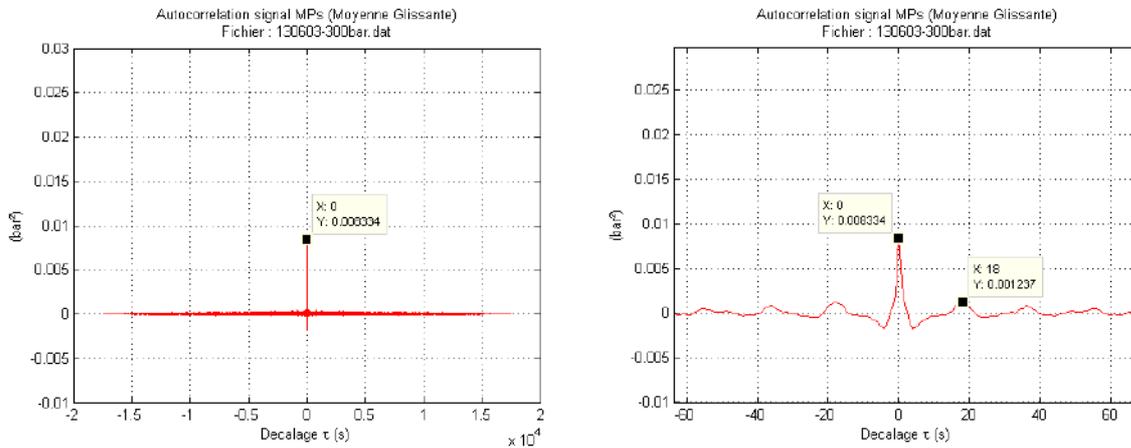


Figure 5.5-17 : Moyenne glissante : Autocorrélation du signal MPs - Essai_1

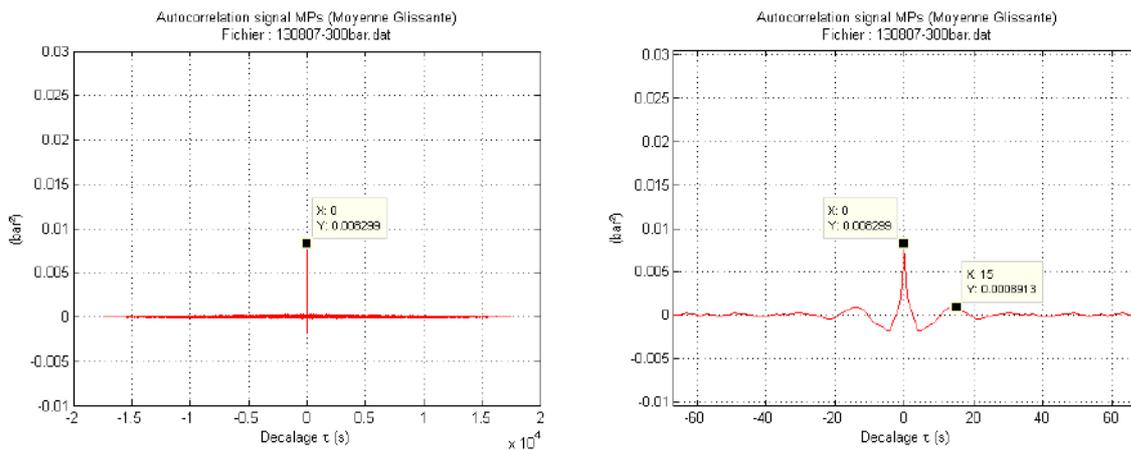


Figure 5.5-18 : Moyenne glissante : Autocorrélation du signal MPs - Essai_2

Les courbes d'autocorrélation ci-dessus font apparaître un rapport de décorrélation valant respectivement 6,74 (Essai_1) et 9,31 (Essai_2).

5.5.3.4 Comparatif des modélisations par régression linéaire et moyenne glissante

Pour l'Essai_1, R vaut respectivement 4,30 (régression linéaire) et 6,74 (moyenne glissante), dans ce dernier cas la décorrélation est améliorée de 57%.

Pour l'Essai_2, R vaut respectivement 5,53 (régression linéaire) et 9,31 (moyenne glissante), soit une décorrélation augmentée de 67%.

5.6 Temps de corrélation du signal MPs

Les valeurs de R peuvent être interprétées comme la dissemblance entre une tranche du signal MP de durée supérieure ou égale à τ et une autre tranche de même durée.

Pour une estimation par moyenne glissante et un décalage τ identique, ces valeurs sont plus élevées.

Conclusion :

A translation temporelle égale, la dissemblance est moins importante pour le signal MPs obtenu à partir d'une régression sur MP qu'à partir d'une moyenne glissante. La modélisation par moyenne glissante améliore la décorrélation de 57% en présence de corrections de la consigne utilisateur par l'opérateur. En l'absence de correction, l'amélioration de la décorrélation apportée par la moyenne glissante passe à 67%.

Nous pouvons également dire que le rayon de corrélation du signal MPs obtenu par soustraction de la régression linéaire est supérieur à celui du signal MPs obtenu par soustraction de la moyenne glissante. Cela signifie que pour un rapport K identique les tranches de segmentation seront donc plus longues, comportant plus d'échantillons ce qui induira un temps de calcul plus grand.

Le temps de corrélation, défini comme étant la durée au-delà de laquelle le processus est considéré sans mémoire apparaît ici de l'ordre d'une vingtaine d'échantillons ($T_e = 1s$), soit :

$$\tau_c = 20 \text{ s}$$

Ceci pour un taux de compression de 1 bar / minute.

5.7 Méthode de modélisation de la tendance du signal MP retenue

Nous adopterons la méthode de modélisation de la tendance du signal MP par moyenne glissante pour les raisons suivantes :

- Prise en compte des corrections de consigne, ce qui permet de conserver une distribution centrée des valeurs en amplitude du signal MPs en cas de corrections de consigne par l'opérateur. Ainsi nous assurons une stationnarité d'ordre 1 sur les mesures de MPs.
- Temps de corrélation plus court à ratio égal. Ceci est intéressant au niveau du nombre d'échantillons à traiter lors de la segmentation.

La tendance de MP est donnée par :

$$td_MP(n) = \left(MP(k) * \frac{1}{N_o} \Pi_{N_o}(k - 6) \right)_{(n)} \quad (5.7-1)$$

5.8 Segmentation du signal MPs

La détermination du temps de corrélation nous permet de pouvoir segmenter le signal MPs en blocs de durée $m.Te$ supérieure ou égale au temps de corrélation τ_c temps au-delà duquel nous pouvons considérer ces différentes tranches comme décorréliées entre elles. Sous cette condition, les échanges d'énergie entre blocs sont nuls en moyenne, ce qui revient à dire aussi que les échanges informationnels sont nuls en moyenne. Cette segmentation sera réalisée sans chevauchement.

Pour des tranches de $m = 256$ échantillons du durée $\tau = 256$ s ($\tau_c = 20$ s $\ll \tau = 256$ s) calculons les moyennes de chaque bloc :

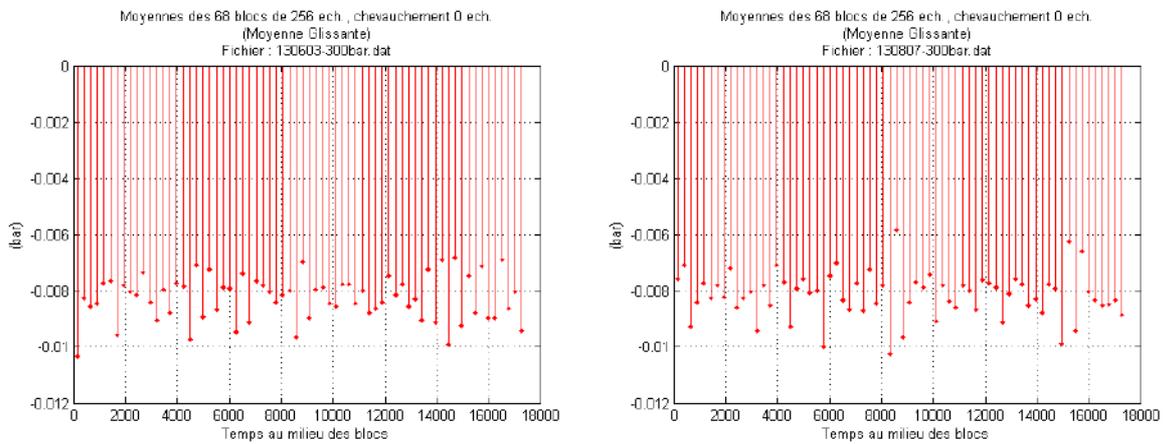


Figure 5.8-1 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 6 éch.

Constatant que ces moyennes sont toutes négatives, nous avons décalé la tendance estimée par moyenne glissante de 5 échantillons au lieu de 6 et obtenus cette fois des moyennes strictement positives :

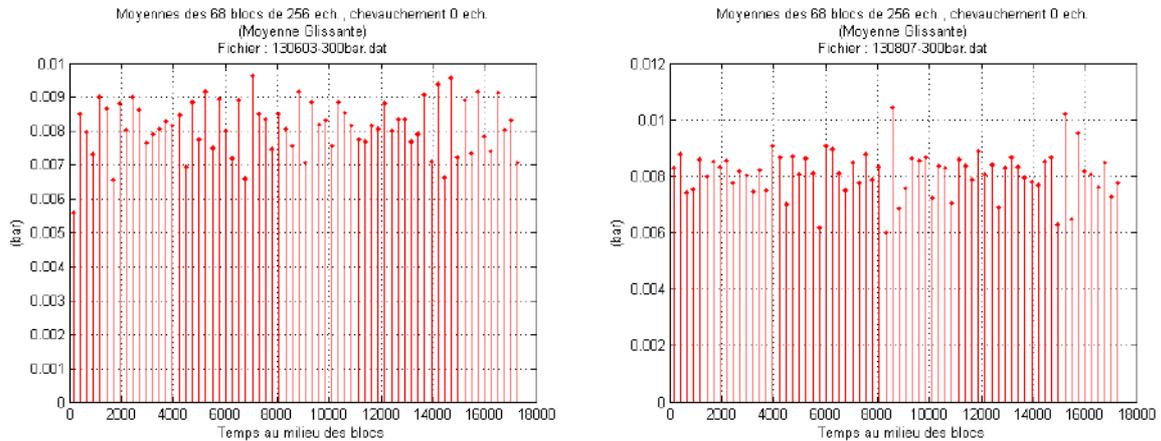


Figure 5.8-2 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5 éch

5.9 Amélioration de la modélisation de la tendance du signal MP par moyenne glissante

Nous souhaiterions obtenir une répartition de ces moyennes de part et d'autre de la pression 0 bar. Or, nous ne pouvons réaliser que des décalages temporels égaux à un nombre entier de périodes d'échantillonnage T_e , car les signaux n'existe pas en dehors de ces instants. Aussi nous avons donc

opté pour la synthèse d'une moyenne glissante obtenue à partir du calcul de la moyenne des deux moyennes glissantes correspondantes à des décalages respectifs de 5 et 6 échantillons :

$$y(n) = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=0}^n x(k) h(n-5) + \sum_{k=0}^n x(k) h(n-6) \right] \quad (5.9-1)$$

Réalisant ainsi un décalage théorique de 5,5 échantillons.

Les signaux MPs, obtenus grâce à cette nouvelle modélisation de leur tendance, ont alors été segmentés.

Les résultats du calcul des moyennes des blocs sont donnés ci-dessous pour chaque essai :

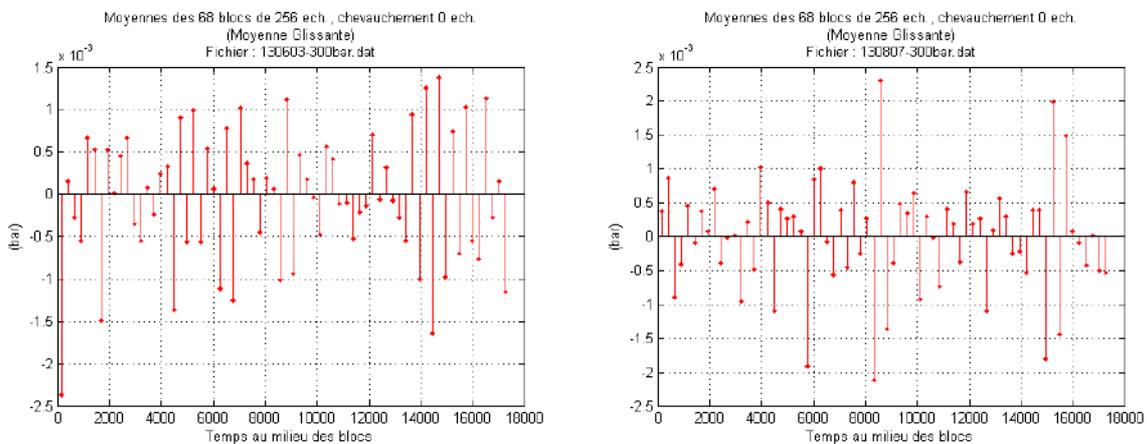


Figure 5.9-1 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. par calcul

Les valeurs de ces moyennes sont maintenant distribuées de façon uniforme, d'un bloc à l'autre, de part et d'autre de 0 bar et sont inférieures à quelques 10^{-3} bar.

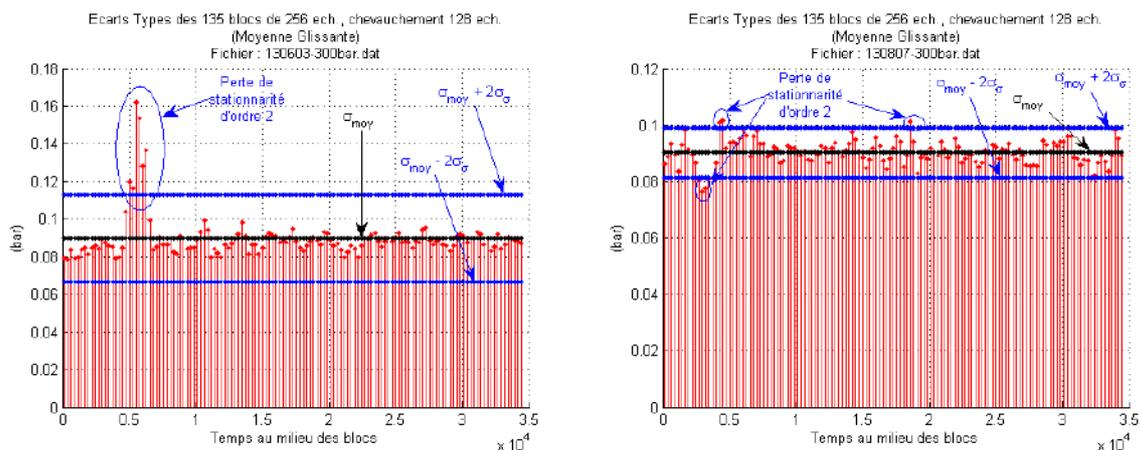


Figure 5.9-2 : Ecart types des blocs Essai_1 et 2 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. par calcul

Nous avons calculé la moyenne des écarts types σ_{moy} et l'écart type des écarts types σ_{σ} . Nous avons tracé la droite correspondant à σ_{moy} (tracé noir) et les deux droites égales respectivement à $\sigma_{\text{moy}} - 2\sigma_{\sigma}$ et $\sigma_{\text{moy}} + 2\sigma_{\sigma}$ (tracés bleus).

L'Essai_2 est peut être considéré stationnaire à l'ordre 2, les pertes de stationnarité n'excédant pas deux échantillons consécutifs. Concernant l'Essai_1 nous avons une perte nette de stationnarité d'ordre 2.

Observons le signal MPs obtenu au moyen de cette modélisation.

- Représentation temporelle

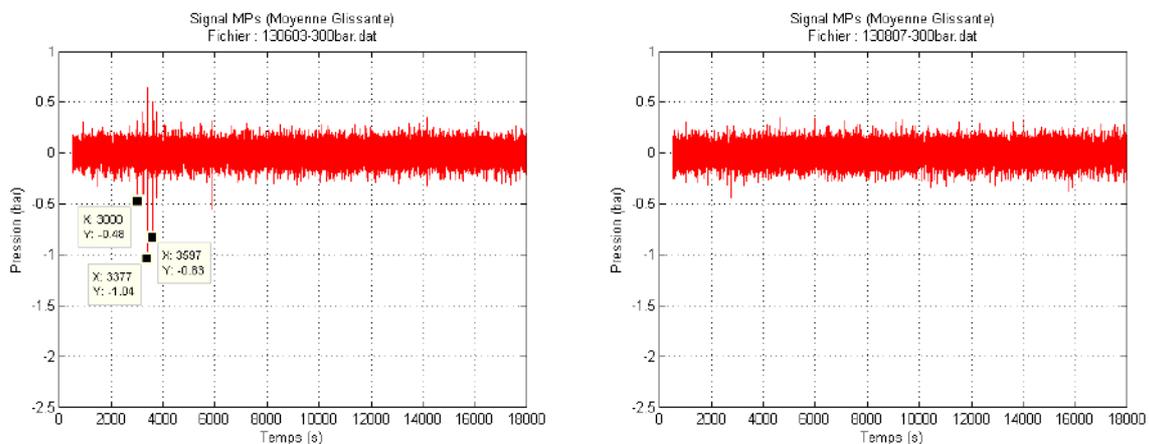


Figure 5.9-3 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Signal MPs - Essai_1 et 2

Peu de changement visible par rapport au signal MPs obtenu au moyen d'une tendance estimée par une moyenne glissante décalée de 6 échantillons (Figure 5.5-15). L'apport est donc négligeable.

- Distribution

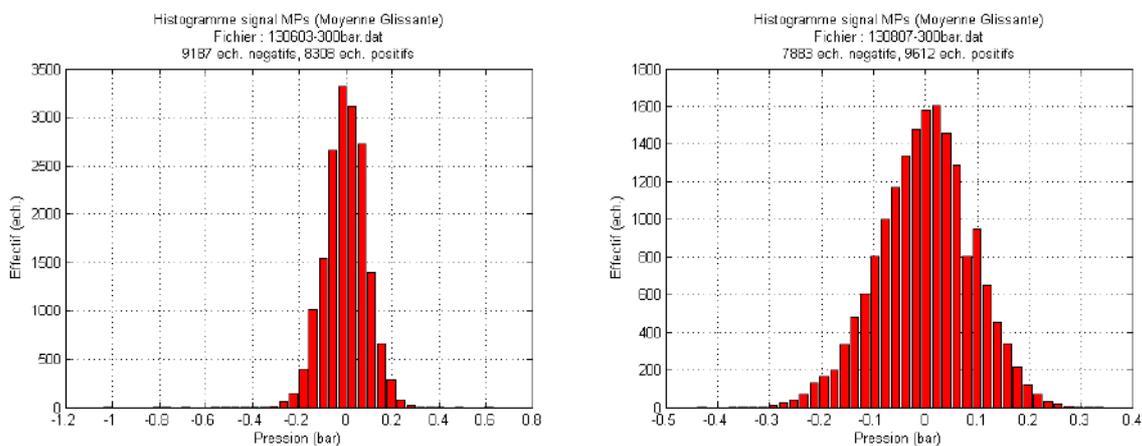


Figure 5.9-4 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Distribution des amplitudes du signal MPs - Essai_1 et 2

Les distributions demeurent quasiment centrées, que des corrections soient réalisées par l'opérateur ou non, comme dans le cas d'un décalage de 6 échantillons de la moyenne glissante (Figure 5.5-16).

- Valeurs caractéristiques

	Essai_1	Essai_2
Moyenne	$-2,8865 \cdot 10^{-5}$	$-1,0289 \cdot 10^{-5}$
Ecart Type	0,0903	0,0903
Minimum	-1,0400	-0,4400
Maximum	0,6350	0,3450

Tableau 5.9-1 : Moyenne glissante décalée de 5,5 éch. : Valeurs caractéristiques du signal Mps Essai_1 et 2

Peu de changement également en ce qui concerne les valeurs caractéristiques des signaux MPs obtenus en comparaison des valeurs obtenues avec une moyenne glissante décalée de 6 échantillons et présentées dans le Tableau 5.5-3.

Les signaux sont mieux centrés (valeurs moyennes dans un rapport de deux ordres de grandeurs environ).

5.10 Stationnarité du signal MPs

Le fait d'avoir ôté au signal MP l'estimation de la consigne automate tout en prenant en compte d'éventuelles corrections opérateur calculée selon l'équation (5.9-1) a rendu le processus sans dérive en moyenne , c'est-à-dire **stationnaire d'ordre 1 qu'il y ait ou non correction de la consigne de pression** de la part de l'opérateur.

Le signal obtenu MPs peut alors être assimilé à une fluctuation autour d'une valeur moyenne constante.

La stationnarité d'ordre 1 nous permet de considérer l'ergodicité de celui-ci à l'ordre 1 et donc, tenant compte du rayon de corrélation, nous renseigne sur la segmentation.

Nous nous sommes ainsi affranchis de la consigne utilisateur et de l'évolution aléatoire de celle-ci (suite aux corrections de l'opérateur).

Nous pouvons également constater qu'en l'absence de correction réalisée par de l'opérateur, la suppression de cette tendance à rendu le signal MPs **pratiquement stationnaire d'ordre 2** à $\sigma_{\text{moy}} = \pm 2\sigma$ (Figure 5.9-2).

5.11 Détermination de la densité de probabilité du bruit de MPs

Aux vues des histogrammes (Figure 5.9-4), nous supposons à priori une distribution gaussienne de MPs. Il existe de nombreux tests d'ajustement statistiques qui nous permettraient de déterminer cette distribution. Nous avons opté pour celui dû à P. Henry (1894), plus simple à calculer et permettant de confirmer l'hypothèse de la distribution d'échantillons selon une loi Normale.

Si la variable aléatoire x suit une distribution gaussienne, alors la probabilité « d'apparition » de la valeur x est donnée par la densité de probabilité $p(x)$:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (5.11-1)$$

Avec :

- La moyenne : $m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i$
- L'écart type : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - m)^2}$

En supposant x centrée et réduite, ($m = 0$ et $\sigma = 1$), on a :

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (5.11-2)$$

L'allure de la courbe de $p(x)$ est donnée ci- après :

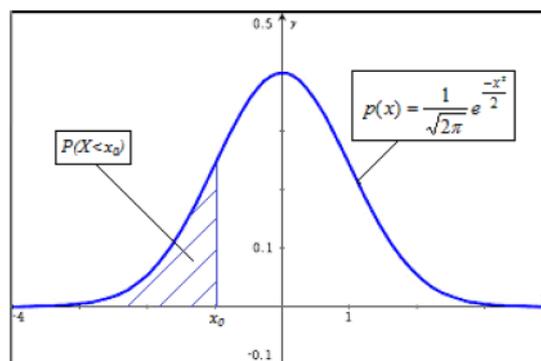


Figure 5.11-1 : Loi Normale centrée réduite

La probabilité d'obtenir la valeur $X < x_0$ est donnée par la fonction répartition qui n'est autre que l'intégrale de la fonction de densité de probabilité :

$$P(X \leq x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (5.11-3)$$

Son allure est donnée ci-dessous :

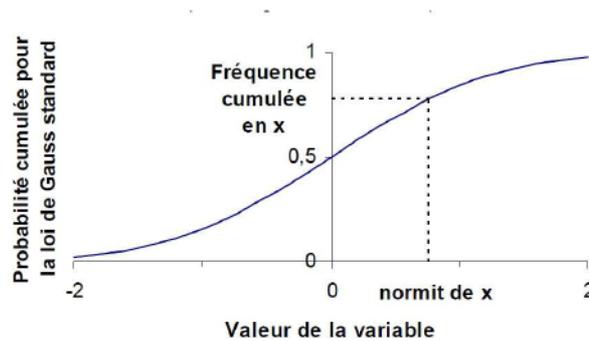


Figure 5.11-2 : Fonction de répartition loi Normale centrée réduite

Les 40 couples de valeurs (n_i, c_i) ayant permis de tracer les histogrammes correspondant aux effectifs n_i de chacune des classes c_i sont récupérés depuis le logiciel Matlab. L'utilisation d'un tableur a permis le calcul des fréquences cumulées f_i et la détermination des valeurs des fractiles t_i (ou *normit* en anglais) correspondants et tels que tel que $P(x < t_i) = f_i$.

La variable aléatoire X est ici la variable c des classes c_i .

Nous traçons alors les points (x, t_i) :

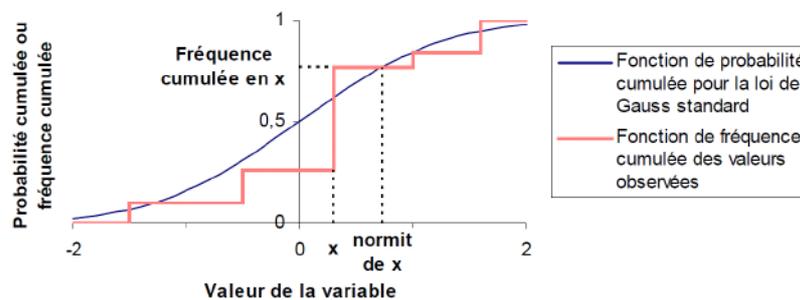


Figure 5.11-3 : Principe de la droite d'Henry

Si pour $-2 \leq t \leq 2$, partie linéaire de la fonction de répartition, nous obtenons une droite, cela nous confirmera l'hypothèse d'une distribution gaussienne des valeurs de x regroupées en classe c_i . Cette droite a pour équation :

$$t = \frac{1}{\sigma} x - \frac{m}{\sigma} \quad (5.11-4)$$

On obtient par cette méthode les tracés suivant pour chacun des essais :

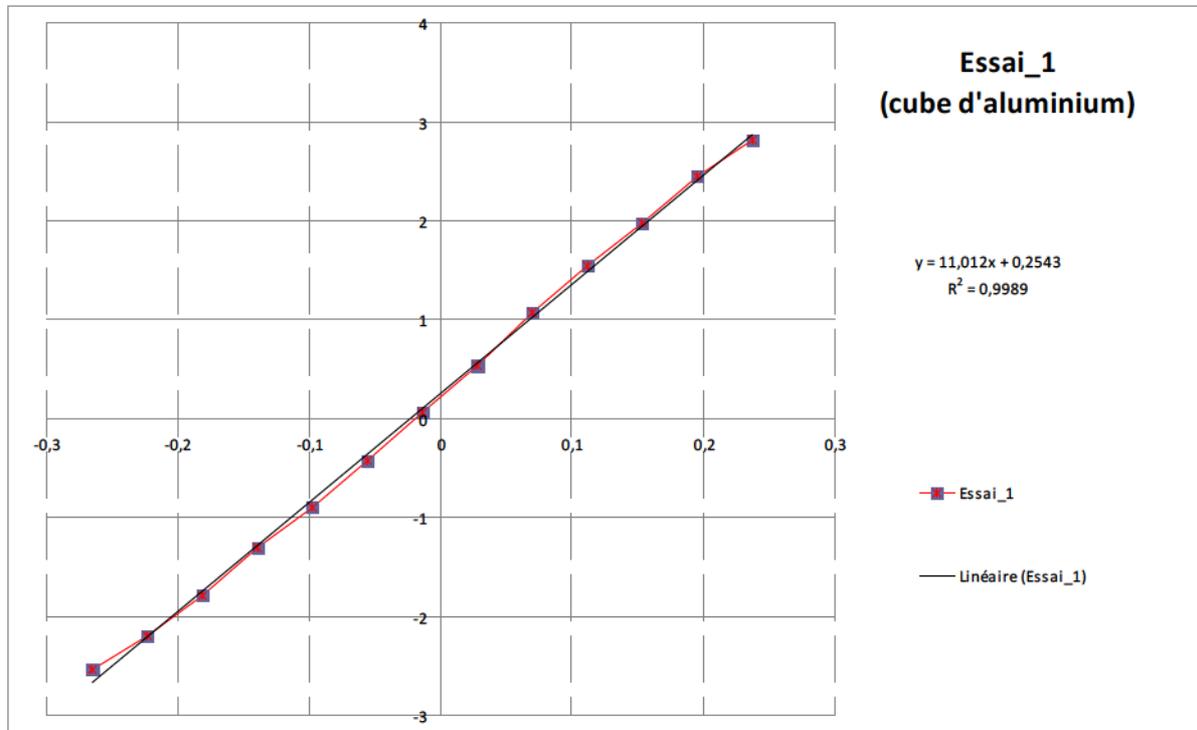


Figure 5.11-4 : Droite d'Henry - Essai_1

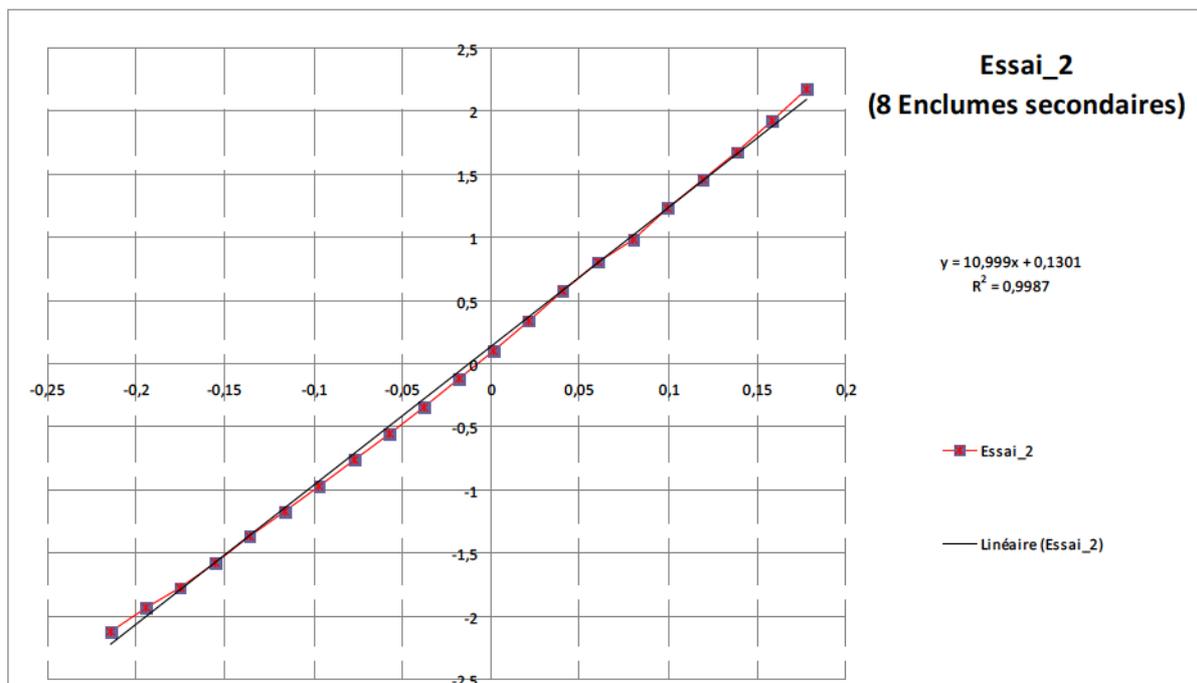


Figure 5.11-5 : Droite d'Henry - Essai_2

Les valeurs très proches de 1 des coefficients de détermination R^2 , indicateur jugeant de la qualité de l'adéquation entre le modèle et les données observées, correspondants aux régressions linéaires sur les points (x_i, t_i) , confirment que ceux-ci sont relativement alignés. Les coefficients de ces droites définis par l'équation (5.11-4), sont en accords avec les valeurs caractéristiques de MPs figurant dans le Tableau 5.9-1.

La nature gaussienne de MPs ainsi confirmée, nous permet d'affirmer l'indépendance des tranches décorréllées de la segmentation du signal mais également indépendantes c'est-à-dire sans échange d'énergie.

Nous pouvons affirmer que le signal MPs est un signal aléatoire gaussien et qu'à partir de là, nous pouvons exprimer les moments de tous ordres dès lors que nous connaissons les moments d'ordre 1 et 2.

La segmentation en tranches de durée supérieure au temps de corrélation nous permet de dire que ces tranches sont décorréllées. Le fait que, de plus, les amplitudes du signal suivent une loi de répartition gaussienne nous permet alors de conclure à l'indépendance de ces tranches.

5.12 Estimation des grandeurs spectrales du signal MPs

Le signal MPs étant aléatoire, ses propriétés temporelles ne peuvent être définies analytiquement mais nous savons déjà que ce signal est gaussien, stationnaire d'ordre 2.

L'analyse spectrale permet de faire ressortir les propriétés énergétiques permanentes des signaux stationnaires.

Cette analyse repose sur le théorème de Bochner-Wiener-Khintchine traduisant la conservation de l'énergie entre les domaines temporel et fréquentiel.

$$\begin{aligned}
 \text{Si} \quad TF \{x(t)\} &= X(f) \\
 \text{Et si} \quad C_{xx}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t-\tau)dt \\
 \text{Alors} \quad TF \{C_{xx}(\tau)\} &= |X(f)|^2 = S(f)
 \end{aligned}
 \tag{5.12-1}$$

La densité spectrale de cette énergie ne pourra être qu'estimée car le processus MPs n'est pas connu sur un temps infini. Les propriétés statistiques et ergodiques de MPs permettent, par sa segmentation, de considérer chaque tranche du signal MPs comme une réalisation indépendante de durée finie, issues d'un même processus. Nous sommes alors dans la situation équivalente d'avoir plusieurs essais de mesure d'un même phénomène aléatoire.

Voyons tout d'abord les méthodes à notre disposition pour obtenir le spectre du signal MPs.

5.12.1 Transformée de Fourier Discrète (TFD)

La TFD permet d'obtenir le spectre discret d'un signal échantillonné. La TFD et sa transformation inverse, la TFD^{-1} , sont définies par :

$$\begin{aligned} X(k) &= TFD\{x(n)\} = \theta \sum_{k=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \\ x(n) &= TFD^{-1}\{X(k)\} = \beta \sum_{n=0}^{N-1} X(k) e^{+j2\pi \frac{nk}{N}} \end{aligned} \quad (5.12-2)$$

Les coefficients θ et β assurent la conservation des unités dans chacun des domaines.

Ils trouvent leur origine dans le peigne de Dirac et dans sa TFD qui sont rappelés ici :

$$\begin{aligned} Pgn_{Te}(t) &= Te \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nTe) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi \frac{k}{Te} t} \\ TFD\{Pgn_{Te}(t)\} &= Te Pgn_{\frac{1}{Te}}(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{Te}\right) \end{aligned} \quad (5.12-3)$$

Le produit est tel que $N\beta\theta = 1$. Dans notre cas $\theta = 1/N$ et par conséquent $\beta = 1$.

Le logiciel utilisé (Matlab ®) effectue le calcul des TFD selon un algorithme de Transformée de Fourier Rapide (TFR ou FFT). L'algorithme de programmation impose un nombre d'échantillons multiple de 2. A cette fin, le logiciel complète si nécessaire le signal de longueur N dont il doit calculer la TFD par des échantillons de valeur nulle (*zeropadding*) afin que sa longueur $nfft$ soit telle que :

$$nfft = 2^p \geq N \quad (5.12-4)$$

- p : Puissance minimale de 2 permettant d'obtenir cette inégalité.

Notons que ce principe de « *zeropadding* » modifie le signal initial en lui ajoutant des échantillons supplémentaires n'ayant aucune réalité physique.

Afin d'obtenir directement les fréquences, modules et valeurs réelles ou complexes d'une TFD, nous avons réalisé un programme qui :

- Renvoie la partie positive du spectre
 Traitant des signaux réels, leur spectre présente une symétrie hermitique entre les fréquences positives et négatives, multipliant par deux l'amplitude des raies de fréquence non nulle.
- Multiplie la TFD par $1 / N$
- Renvoie un nombre de raies égal à $(nfft / 2 + 1)$ car le calcul est réalisé sur un nombre $nfft$ pair d'échantillons.

En effet, la TFD est alors définie par :

- Deux nombres réels : X_0 et $X_{N/2}$
- $(N / 2 - 1)$ nombres complexes : X_k avec $k = 1$ à $N / 2 - 1$

Nous avons donc $(N / 2 + 1)$ nombres car l'association de X_0 et $X_{N/2}$ sera assimilée à un nombre complexe. Au final, nous aurons l'occupation mémoire de $N / 2$ nombres complexes, soient N nombres réels.

Si le spectre est continu, la puissance estimée contenue dans le signal est répartie sur l'ensemble du spectre. On obtient alors une Densité Spectrale de Puissance (DSP) exprimée en $(\text{unité}^2 / \text{Hz})$.

Dans notre étude le spectre est calculé par TFD grâce à des moyens informatiques (cf annexe G). On obtient ainsi un spectre de puissance discret ou spectre de raie. Nous ne pourrions déterminer la puissance contenue dans le signal analysé que pour chacune de ces raies et cette puissance sera exprimée en $(\text{unité})^2$.

L'estimation du SP du signal MPs, a été réalisée au moyen de deux techniques différentes :

- Le Corrélogramme
- Le Périodogramme Moyenné

5.13 Corrélogramme

5.13.1 Calcul du correlogramme

Le schéma ci-dessous résume les étapes du calcul de l'estimation du Spectre de Puissance par la technique du Corrélogramme. C'est l'application directe du théorème de Bochner-Wiener-Khintchine.

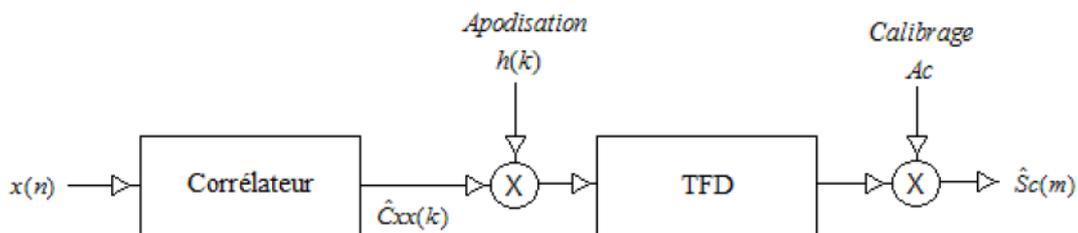


Figure 5.13-1 : Calcul du Corrélogramme

La notation « ^ » rappelle que nous sommes en présence d'une estimation.

$\hat{S}_c(m)$, est un estimateur calibré de $S(m)$ spectre de puissance du signal $x(n)$, et il est donnée par :

$$\hat{S}_c(m) = Ac TFD \{ h(k) \hat{C}_{xx}(k) \} \quad (5.13-1)$$

Ici, la fenêtre d'apodisation est centrée sur $\hat{C}_{xx}(k)$, d'où $h(k)$ et non $h(n)$.

5.13.2 Choix de la fenêtre d'apodisation

La sommation s'effectuant sur un nombre fini d'échantillons, la fenêtre d'apodisation $h(k)$ est une fenêtre rectangulaire d'amplitude 1 qui traduit la limitation du support de la fonction d'autocorrélation, définie par l'équation (5.5-7). $\hat{C}_{xx}(k)$ est donc un estimateur de l'autocorrélation $C_{xx}(k)$ du signal $x(n)$ de durée N .

La largeur de la porte $h(k)$ devra être supérieure au temps de corrélation τ_c et sera au maximum égale à $2\tau_M$ ($2N - 1$ échantillons). Nous nous placerons dans ce dernier cas.

Le coefficient de calibration Ac permet de conserver les unités. Afin de calculer sa valeur, précisons les notions de biais et de variance d'un estimateur.

5.13.3 Biais et Variance d'un estimateur :

Un estimateur \hat{X} d'une grandeur X est qualifié par un biais et une variance. Le biais nous renseigne sur la justesse de la mesure et la variance sur sa fidélité.

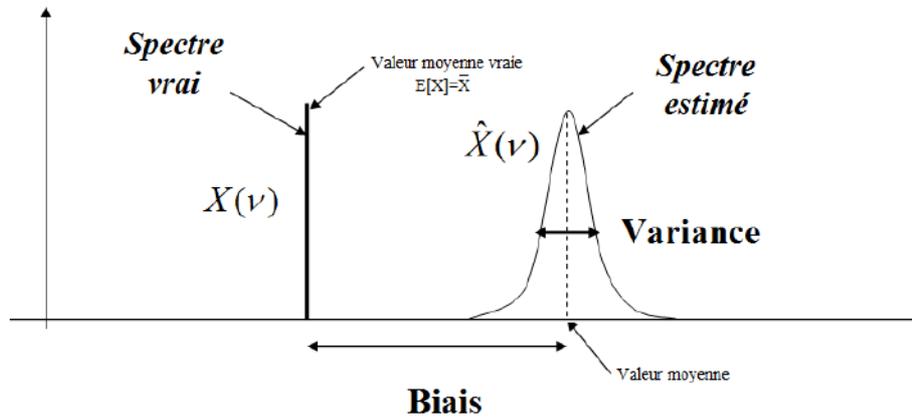


Figure 5.13-2 : Biais et variance d'un estimateur

Le biais peut être vu comme écart entre les moyennes respectives de la grandeur vrai et son estimateur. Nous pouvons donc écrire :

$$E[\hat{X}] = E[X] + \text{Biais}(\hat{X}) \quad (5.13-2)$$

E étant l'espérance mathématique, soit la moyenne d'un nombre infini d'observations :

$$E[X] = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad (5.13-3)$$

La variance est une notion de dispersion autour de la valeur moyenne. Elle est définie par :

$$\text{Var}[\hat{X}] = E\left[\left(\hat{X} - E(\hat{X})\right)^2\right] \quad (5.13-4)$$

La pertinence d'un estimateur peut être jugée par le calcul de l'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) :

$$EQM = E\left[(X - \hat{X})^2\right] = \text{Var}[\hat{X}] + \text{biais}(\hat{X})^2 \quad (5.13-5)$$

5.13.4 Calcul du facteur de calibration Ac

En considérant **qu'en moyenne** l'estimateur $\hat{S}_c(m)$ est non biaisé, l'espérance de $\hat{S}_c(m)$ s'écrit :

$$E[\hat{S}_c(m)] = E[Ac TFD\{C_{xx}(k)h(k)\}] = Ac TFD\{(E[C_{xx}(n)] * TFD\{h(n)\})_k\} \quad (5.13-6)$$

Puisque $\hat{S}_c(m)$ est considéré non biaisé en moyenne, nous avons :

$$E[\hat{S}_c(m)] = Ac \beta \left(E[|X(l)|^2] * H(l) \right)_{(m)} = Ac \beta \sum_{l=-\infty}^{+\infty} S_c(l-m) H(l) \quad (5.13-7)$$

$h(k)$ étant une fenêtre rectangulaire de même longueur que le support de la corrélation, la TFD $\{h(k)\}$ est donc un sinus cardinal dont la largeur du lobe principale est inversement proportionnelle à la durée de la porte.

Nous pouvons ainsi considérer que le spectre de puissance calculé est constant sur le support du spectre de la fenêtre d'apodisation. Ceci nous permet d'écrire :

$$E[\hat{S}_c(m)] = Ac \beta \left(E[|X(l)|^2] * H(l) \right)_{(m)} = Ac \beta S_c(m) \sum_{l=-\infty}^{+\infty} H(l) \quad (5.13-8)$$

Pour avoir l'égalité :

$$E[\hat{S}_c(m)] = S_c(m) \quad (5.13-9)$$

Il faut avoir :

$$Ac = \frac{1}{\beta \times \sum_{l=-\infty}^{+\infty} H(l)} \quad (5.13-10)$$

La fenêtre d'apodisation $h(k)$ étant une fonction porte d'amplitude 1 sur toute la durée de $\hat{C}_{xx}(k)$, le spectre de cette fenêtre est donc assimilable un « Dirac numérique » :

$$\begin{cases} H(0) = 1 \\ H(l) = 0, l \neq 0 \end{cases} \quad (5.13-11)$$

D'où le facteur d'apodisation :

$$Ac = \frac{1}{1 \times H(0)} = 1 \quad (5.13-12)$$

5.13.5 Spectres de Puissance obtenus au moyen du correlogramme

Les résultats obtenus pour chacun des essais sont donnés ci-dessous :

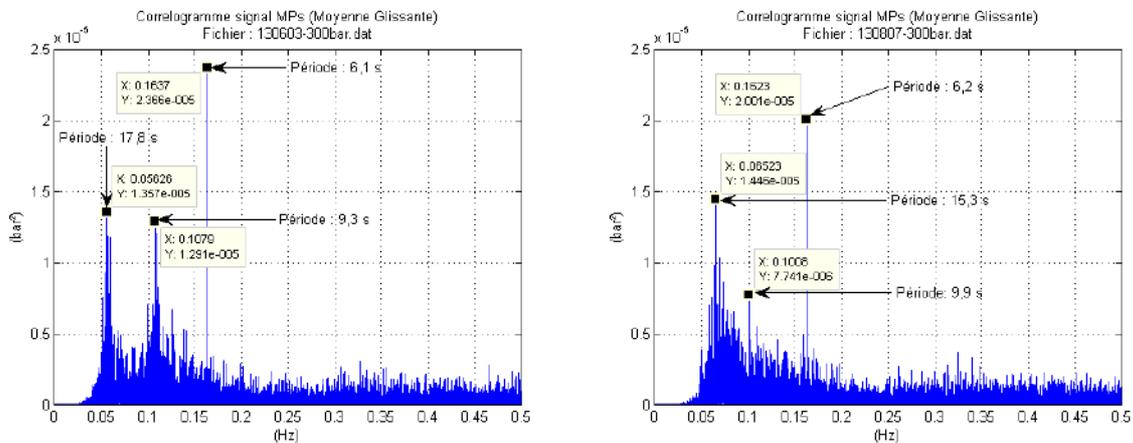


Figure 5.13-3 : Corrélogramme du signal MP– Essai_1 et 2

Les deux spectres de puissance présentent des profils assez semblables avec 3 raies remarquables. La première correspond à la fréquence d'apparition des échelons dans le signal MP dont nous avons identifié la période (15 et 18 s) au moyen du calcul de la fonction d'autocorrélation. Les deux autres raies fréquentielles ne sont pas directement interprétables mais sont de valeurs très proches (0,108 Hz pour 0,101 Hz et 0,164 Hz pour 0,162 Hz). Enfin, nous pouvons observer que lors de la réalisation de corrections sur la consigne de pression par l'opérateur (Figure 5.13-3, Essai_1) une bande d'énergie apparaît, centrée autour de 0,1 Hz.

5.14 Périodogramme moyenné

5.14.1 Calcul du Périodogramme moyenné

Le calcul de l'estimation du Spectre de Puissance, par la technique du Périodogramme moyenné, est décrit ci-dessous :

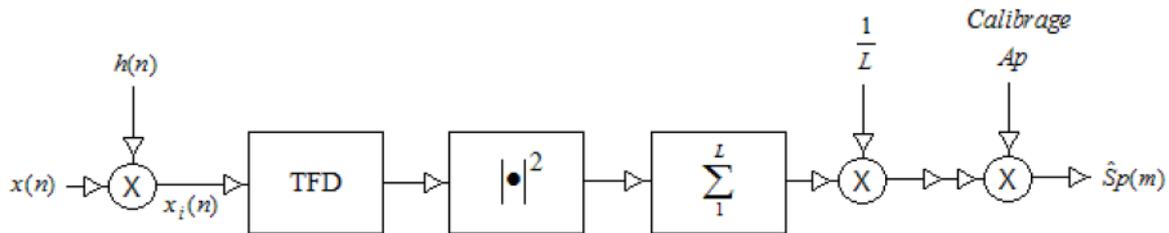


Figure 5.14-1 : Calcul du Périodogramme moyenné

Le Périodogramme est également un estimateur du Spectre de Puissance du signal $x(n)$. Il consiste à :

- Segmenter le signal $x(n)$ au moyen d'une fenêtre glissante $h(n)$, en L blocs $x_i(n)$, l'indice variant de 0 à $L - 1$.
- Calculer le spectre de puissance de chaque bloc.
- Faire la moyenne des spectres obtenus.

D'où :

$$\hat{S}_p(m) = \frac{A_p}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |TFD\{x_i(n) h(n)\}|^2 \quad (5.14-1)$$

5.14.2 Segmentation du signal MPs

L'opération de segmentation est décrite par la figure ci-dessous :

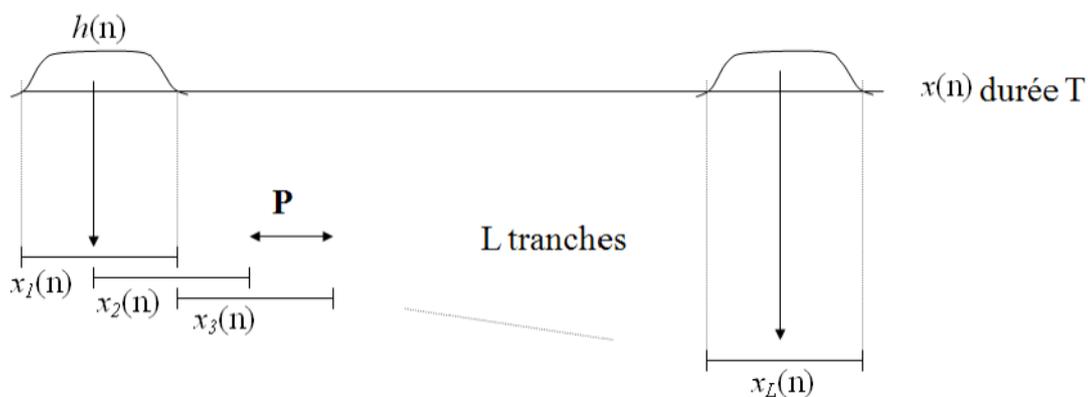


Figure 5.14-2 : Segmentation d'un signal

La segmentation permet un chevauchement des tranches de signal, P étant le nombre d'échantillons communs à deux tranches successives. Toutefois, il ne devrait pas dépasser 50 % sous peine de ne plus respecter l'indépendance statistique entre les blocs dès lors que nous avons pris une durée $2 \tau_c$.

Le biais et la variance associés à l'estimateur qu'est le Périodogramme moyenné, ont les propriétés suivantes :

- Biais : Sa valeur diminue si la durée des segments, soit le nombre d'échantillons N par segment, augmente.

En effet, la segmentation d'un signal peut être vue comme le produit de ce signal par une fenêtre d'une largeur de M échantillons. Ainsi nous ne moyennons pas en fait le carré des modules des TFD des segments du signal mais ceux de la TFD du produit signal – fenêtre. Nous parlons alors de lissage de la densité spectrale. Autrement dit, l'estimation de la DSP par Périodogramme moyenné est correcte si le calcul est effectué sur une durée supérieure au temps de corrélation du signal dans le cas de non recouvrement. Il faut sinon tenir compte du nombre d'échantillons P compris dans le recouvrement.

- Variance : Elle est inversement proportionnelle au nombre de segments L sous les conditions suivantes :
 - Estimateur non biaisé
 - Signal Gaussien
 - Non recouvrement des blocs

Nous avons alors :

$$\frac{\text{Var}[\hat{S}_p(k)]}{S_p^2(k)} = \frac{1}{L} \quad (5.14-2)$$

Or augmenter le nombre de segments L entraîne la diminution du nombre M d'échantillons par segment. Le recouvrement des blocs permet de réduire le biais.

Nous pouvons constater qu'on ne peut minimiser conjointement le biais et la variance de l'estimateur du spectre de puissance par le Périodogramme moyenné.

Choisir un nombre peu élevé d'échantillons par bloc (M petit), revient à prendre une fenêtre d'apodisation (rectangulaire ou autre) étroite ce qui impliquera une résolution fréquentielle du Périodogramme peu apte à la résolution de deux composantes proches. Par contre, la statistique se fera sur un nombre de tranches L plus grand réduisant ainsi la variance dans le rapport $1/L$ et le bruit dans le rapport $1/\sqrt{L}$.

A l'inverse, opter pour un nombre élevé d'échantillons par bloc (M grand) augmentera la résolution fréquentielle du Périodogramme permettant la séparation de deux raies fréquentielles proches mais le nombre de tranches L étant moindre, le bruit sera moins atténué.

Le nombre d'échantillons M d'un segment est assimilable à la largeur de la bande passante du filtre appliqué au signal.

Nous devons réaliser un **compromis** basé sur la nature des signaux à traiter comme cela est résumé sur la figure ci-après.

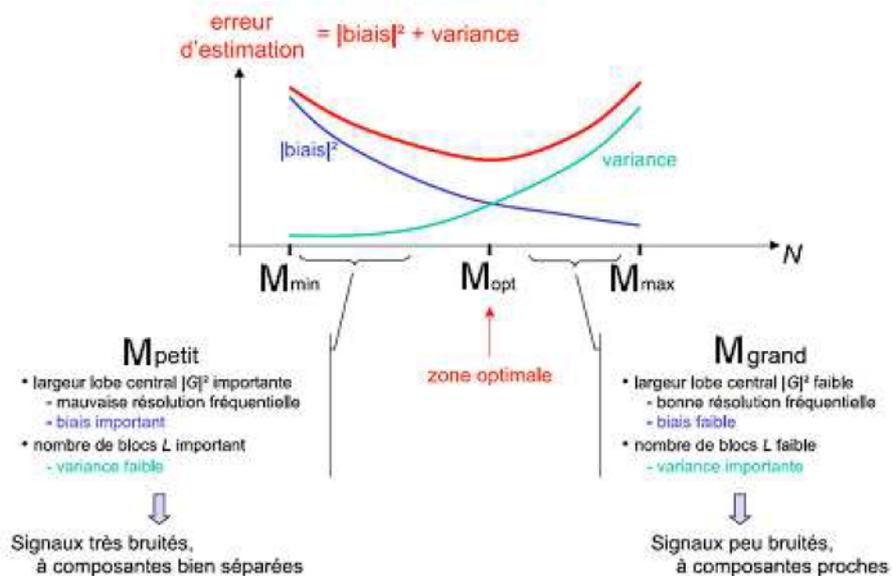


Figure 5.14-3 : Compromis biais / variance – Périodogramme moyenné

Nous choisirons $M = 256$ échantillons, soit une durée de 256 s bien supérieure au temps de corrélation déterminé précédemment ($\tau_c = 20$ s). De plus cette valeur est adaptée au calcul de la TFD sans zeropadding. Enfin nous appliquerons la segmentation précédente.

5.14.3 Choix de la fenêtre

Nous avons choisi une fenêtre rectangulaire de largeur $M \cdot T_e$ égale à 256 s. Une fenêtre différente pourrait être employée pour minimiser les effets de bord entraînant des discontinuités brusques source d'artefacts hautes fréquences dans le spectre.

5.14.4 Calcul du facteur de calibration A_p

La constante de calibration A_p permet de réduire le biais, si l'on peut considérer que sur la durée choisie pour la fenêtre, la DSP du signal varie peu.

D'après l'équation (5.14-1) :

$$E[\hat{S}_p(m)] = E\left[A_p |TFD\{x(n)h(n)\}|^2 \right] \quad (5.14-3)$$

$$E[\hat{S}_p(m)] = Ap \beta^2 E \left[\left| (X(l) * H(l))_{(m)} \right|^2 \right] \quad (5.14-4)$$

$$E[\hat{S}_p(m)] = Ap \beta^2 E \left[\left| \sum_{l=-\infty}^{+\infty} (X(l-m) H(m)) \right|^2 \right] \quad (5.14-5)$$

$$E[\hat{S}_p(m)] = Ap \beta^2 \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \left(S(l-m) |H(m)|^2 \right) \quad (5.14-6)$$

Selon l'hypothèse posée lors du calcul du facteur de calibration du Corrélogramme (§ 5.13.4), nous supposons $S(m)$ constant sur le support de $|H(m)|^2$.

Pour avoir l'égalité suivante :

$$E[\hat{S}_p(m)] = S(m) \quad (5.14-7)$$

Il nous faut avoir :

$$Ap \beta^2 \sum_{l=-\infty}^{+\infty} |H(l)|^2 = 1 \quad (5.14-8)$$

$$Ap = \frac{1}{\beta^2 \sum_{l=-\infty}^{+\infty} |H(l)|^2} \quad (5.14-9)$$

Le théorème de Parseval nous indique qu'il y a conservation de l'énergie entre les domaines temporel et fréquentiel, ainsi nous avons l'égalité :

$$\theta^2 \sum_{n=0}^{M-1} |h(n)|^2 = \beta^2 \sum_{m=0}^{M-1} |H(m)|^2 \quad (5.14-10)$$

Ici le nombre d'échantillons en temps est identique au nombre d'échantillons en fréquence, mais c'est un cas particulier (cf annexe G).

En conclusion, nous avons :

$$Ap = \frac{1}{\theta^2 \sum_{n=0}^{M-1} |h(n)|^2} = \frac{1}{\frac{1}{M^2} \times M^2} = 1 \quad (5.14-11)$$

5.14.5 Spectres de Puissance obtenus au moyen du Périodogramme

Les résultats ci-dessous présentent les Spectres de Puissance obtenus pour chacun des essais en segmentant le signal MPs sans chevauchement et avec un chevauchement de 50%.

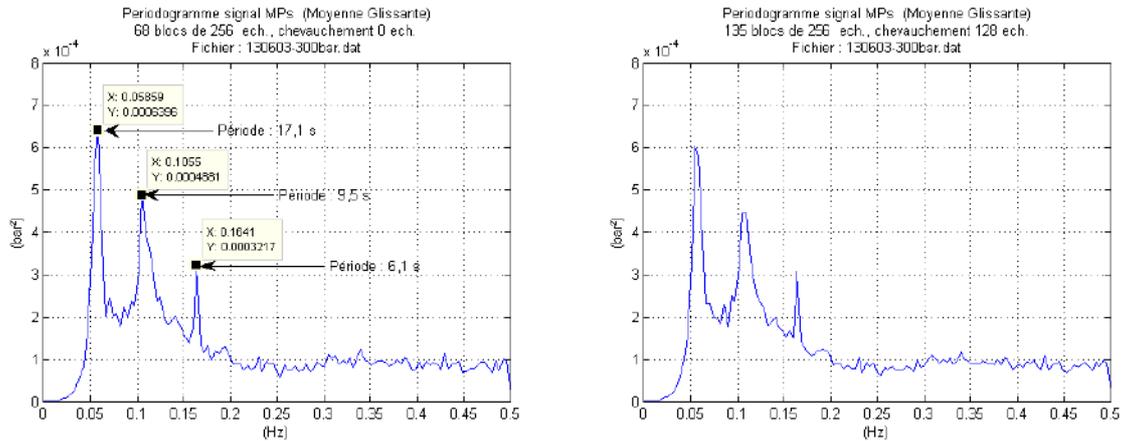


Figure 5.14-4 : Périodogramme moyenné du signal MPs - Essai_1

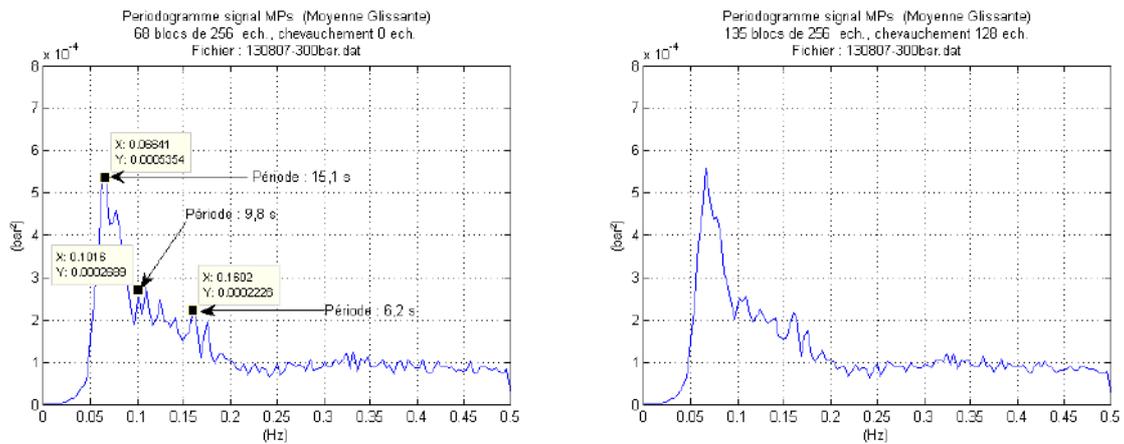


Figure 5.14-5 : Périodogramme moyenné du signal MPs - Essai_2

Sur la Figure 5.14-4 (Essai_1) les trois raies observées sur le spectre de puissance obtenu au moyen du Corrélogramme sont tout à fait identifiables mais elles deviennent indiscernables sur la Figure 5.14-5 (Essai_2).

Cela peut être dû à la faible résolution fréquentielle du périodogramme et au fait que les deux premières raies sont trop proches dans le cas de l'Essai_2 pour être correctement séparées.

En effet, par rapport aux Spectres de Puissance obtenus par la méthode du Corrélogramme la résolution fréquentielle est bien moindre.

Les Périodogrammes ont également été calculés pour un chevauchement des segments de signal mais sans amélioration notable. La résolution fréquentielle n'ayant pas variée, les résultats sont cohérents.

En utilisant le Corrélogramme, la corrélation d'un signal de longueur N est calculée sur un nombre d'échantillon égal à $2N - 1$ échantillons. Lors des Essai_1 et 2, N est de l'ordre de 17 500 échantillons. La FFT de cette corrélation est elle-même calculée sur $nfft = 65\,536$ échantillons (puissance de directement supérieure à 35 000) et retourne un nombre d'échantillon égal $nfft / 2 + 1$ soit 32 769.

On obtient donc un spectre de puissance de 32 769 raies couvrant de 0 à $F_e / 2 = 0,5$ Hz.

La résolution est donc de 15,3 μ Hz, et c'est celle observée sur les spectres obtenus.

Le Périodogramme calcule le Spectre de Puissance de segments de signal d'une longueur de 256 échantillons. Le nombre de raies du spectre tombe alors à 129. Soit une résolution de 3 mHz. De plus l'influence de la nature de la fenêtre et la largeur de son support par rapport à la distance de deux raies spectrales à séparer devient prépondérante. La résolution n'est plus uniquement liée aux nombres de raies disponibles.

Le pouvoir de résolution d'une fenêtre spectrale est illustré ci-dessous

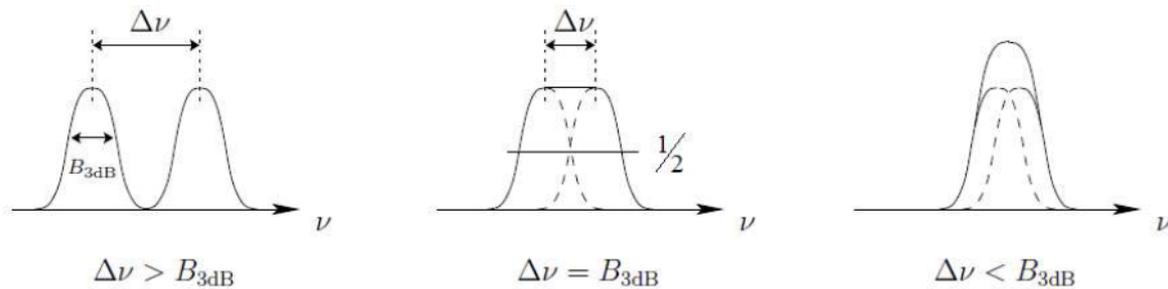


Figure 5.14-6 : Pouvoir de résolution – critère de Rayleigh

On quantifie ce pouvoir de résolution selon les mêmes principes que ceux qu'avait établi Rayleigh en optique.

La résolution fréquentielle d'une fenêtre est ainsi donnée par sa largeur de bande à -3 dB permettant encore de séparer deux fréquences proches.

Dans notre cas, pour une fenêtre rectangulaire cette résolution est donnée par :

$$\frac{0,88}{MTe} = \frac{0,88}{256 \times 1} = 3,4 \text{ mHz} \quad (5.14-12)$$

Conclusion :

Sur le spectre de puissance de l'Essai_2 obtenu par le calcul de Corrélogramme (Figure 5.14-4), les deux premières raies principales sont séparées de 35,6 mHz soit 10 fois cette résolution ce qui explique que le pic soit encore visible sur le spectre de puissance obtenu pour ce même essai par Périodogramme (Figure 5.14-5).

La bande d'énergie, centrée autour de 0,1 Hz et apparaissant lors de corrections (Figure 5.13-3, Essai_1) que nous avons observée sur le spectre de l'Essai_1 obtenus par Corrélogramme n'est absolument plus décelable sur l'estimation par Périodogramme.

Le rapport des résolutions fréquentielles du Périodogramme moyenné, 3,4 mHz, et du Corrélogramme, 15,3 μ Hz, est donc de l'ordre de 220.

Les écarts de niveau de puissance obtenus par Corrélogramme et Périodogramme moyenné trouvent leur origine dans le fait que les raies du spectre de puissance du Corrélogramme, espacées de 15,6 μ Hz, sont intégrées sur 3,4 mHz lors du calcul de Périodogramme.

5.15 Analyse temps – fréquence

L'analyse spectrale des signaux MPs au moyen du Corrélogramme nous a permis de mettre en évidence des différences entre les Spectres de Puissance obtenus à partir des différents essais selon que l'opérateur ait ou non réalisé des corrections. Ces différences sont localisées dans une bande de fréquence centrée autour de 0,1 Hz. Cependant, il nous est impossible de savoir si ces différences apparaissent au moment où l'opérateur effectue des corrections. Il nous faudrait pour cela pouvoir dater l'évolution du spectre dans le temps. C'est ce que permet l'analyse Temps – Fréquence.

5.15.1 Relation d'incertitude Temps – Fréquence

Tenter de dater précisément une variation d'énergie revient à faire tendre le temps d'observation Δt vers zéro ce qui revient à prendre comme fenêtre un Dirac. Or, le spectre d'un Dirac est infini faisant ainsi disparaître toute possibilité de localisation en fréquence. Intuitivement, la mesure d'un phénomène physique suppose son observation durant un temps ne pouvant être nul. La réciproque est également vraie en raisonnant sur une localisation fréquentielle Δf .

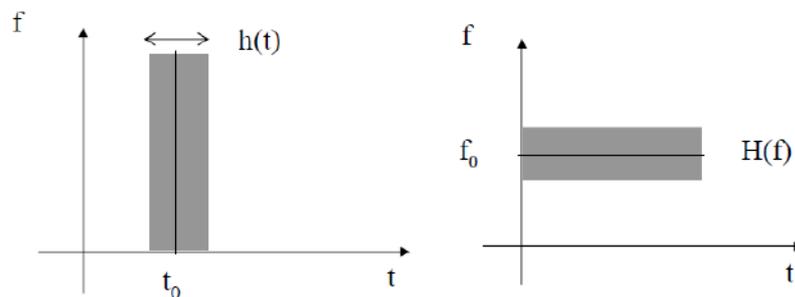


Figure 5.15-1 : Résolution temps - fréquence

Il faudra réaliser un compromis lors d'une analyse temps - fréquence entre la résolution de la localisation fréquentielle et temporelle d'un événement. Cela est traduit par la relation d'incertitude de Heisenberg :

$$\Delta t \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (5.15-1)$$

Il y a égalité pour une fenêtre gaussienne (dont la TF est également une gaussienne).

5.15.2 Transformée de Fourier à Court Terme

La TFD ne permet pas de dater l'apparition de raies dans un spectre, car elle réalise une sommation (en temps discret, une intégration en temps continu) sur toute la durée du signal. Pour retrouver la localisation temporelle, on considère une tranche du signal de durée Δt , et l'on en calcul la TFD. On passe ensuite à la tranche de signal suivante.

Cette segmentation, est obtenue au moyen d'une fenêtre glissante de largeur Δt , et permet de définir la Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT) d'un signal continu $x(t)$:

$$TFCT \{x(t)\} = X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h^*(t-\tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (5.15-2)$$

Dans cette équation, $h(t-\tau)$ est la fenêtre glissante décalée d'une durée τ .

Dans le cas d'un signal discret, l'opération d'intégration devenant une sommation, la TFCT d'un signal $x(n)$ est définie par :

$$TFCT\{x(n)\} = X(k, m) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{N-1} x(n)h(n-k)e^{-j\frac{2\pi}{M}mn} \quad (5.15-3)$$

Cette transformée offre trois paramètres sur lesquels nous pouvons agir :

- M : La longueur de la fenêtre. Nous ferons alors un compromis entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle.
- Le type de fenêtre : Le compromis portera alors entre la résolution fréquentielle et la résolution en amplitude du spectre obtenu.
- P : Le taux de recouvrement entre chaque segment du signal : Il doit être supérieur à 50 % pour ne pas « rater » d'événement.

5.15.3 Spectrogramme

C'est une représentation du spectre d'énergie de chaque tranche du signal, segmenté lors du calcul de la TFCT. Il se calcule en élevant le module de la TFCT au carré :

$$Spcg(t, f) = As|TFCT\{t, f\}|^2 \quad (5.15-4)$$

Nous avons calculé les spectrogrammes des signaux MP obtenus lors des Essais_1 et 2 au moyen de logiciel (Matlab ®) et nous avons conservé les paramètres par défaut.

5.15.4 Choix de la fenêtre

Il s'agit d'une fenêtre de Hamming, dont l'équation est donnée ci-dessous :

$$h(t) = 0,54 + 0,46 \cos\left(\pi \frac{t}{D}\right) \quad (5.15-5)$$

Avec :

- D : Durée de la fenêtre.

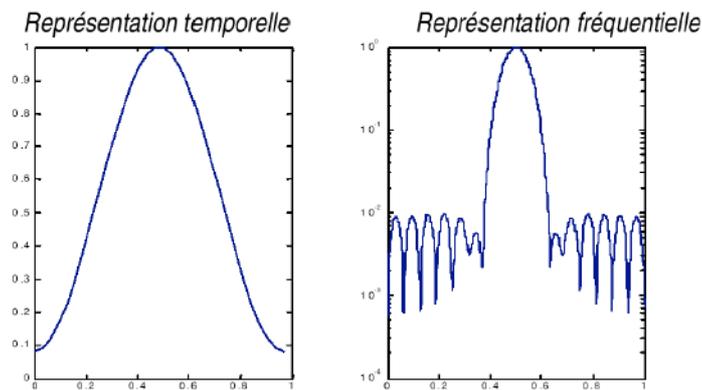


Figure 5.15-2 : Fenêtre de Hamming

Très semblable à la fenêtre de Hann étudiée dans l'annexe G , elle en est une amélioration du fait que son premier lobe secondaire se trouve atténué de 9 dB.

5.15.5 Facteur de calibration

Il est donné par :

$$Ap = \frac{2}{Fe \sum_{n=1}^M |h(n)|^2} \quad (5.15-6)$$

Le facteur 2 permet de tenir compte de l'énergie portée par la partie négative du spectre. Ce facteur est égal à 1 pour la composante continue ($f=0$) et pour la fréquence de Nyquist ($Fe/2$).

5.15.6 Segmentation

Le nombre d'échantillons par segment est de 256 (valeur maximale permise par le logiciel limitant les performances en termes de résolution fréquentielle) ce qui à une période d'échantillonnage de 1 s, correspond à une durée de 256 s. Cela permet de rester dans les mêmes conditions que lors du

calcul du Périodogramme moyenné et assure que la longueur de la fenêtre est supérieure au temps de corrélation du signal MPs ($\tau_c = 20$ s soient 20 échantillons).

Le recouvrement est de 240 échantillons soit un taux de :

$$\frac{240}{256} \times 100 = 93,75\%$$

5.15.7 Spectrogrammes du signal MPs

Les spectrogrammes des signaux MPs correspondants aux Essais 1 et 2 figurent ci-dessous :

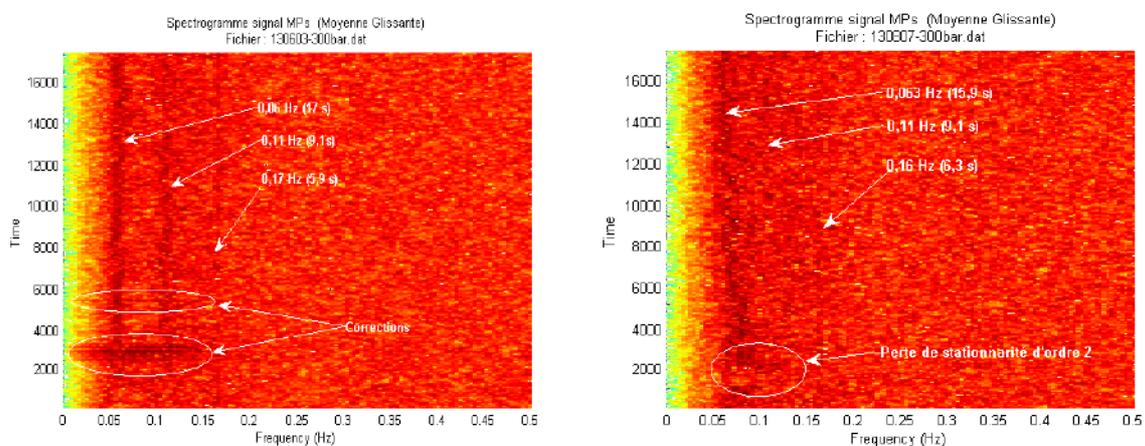


Figure 5.15-3 : Spectrogramme du signal MPs – Essai_1 et 2

Nous pouvons repérer sur le spectrogramme de l'Essai_1 la modification du spectre de puissance aux instants correspondants à la réalisation de corrections de la consigne de pression par l'opérateur et correspondant à la perte de stationnarité observée sur la Figure 5.9-2 (Essai_1, tracé droit).

La largeur de ces bandes d'énergie, de l'ordre de 0,1 Hz, et leur position, centrée sur environ 0,08 Hz correspondent à la modification du spectre de puissance obtenus par Corrélogramme et repérés sur la Figure 5.13-3, Essai_1 tracé gauche.

Les brèves pertes de stationnarité (sur deux échelons consécutifs au maximum) observées lors de l'Essai_2 sur la Figure 5.9-2 (Essai_2, tracé droit) sont également identifiables sur le Corrélogramme de l'Essai_2 par des modifications de la distribution spectrale de puissance. Elles sont cependant différentes de celles observées dans le cas de correction de la consigne par l'opérateur. Elles sont peut-être dues à une modification par l'automate du taux de compression, fixé par l'opérateur à 1 bar / minute, afin de rattraper un retard entre la mesure de pression et la consigne déterminé en début d'essai.

5.16 Observation du signal « Main Displacement » (MD)

Il s'agit du signal de mesure de déplacement vertical de l'outil supérieur sous la poussée du piston principal délivré par les capteurs de position LVDT. L'allure du signal MD au cours des deux essais considérés lors de l'étude du signal MP figure ci-dessous :

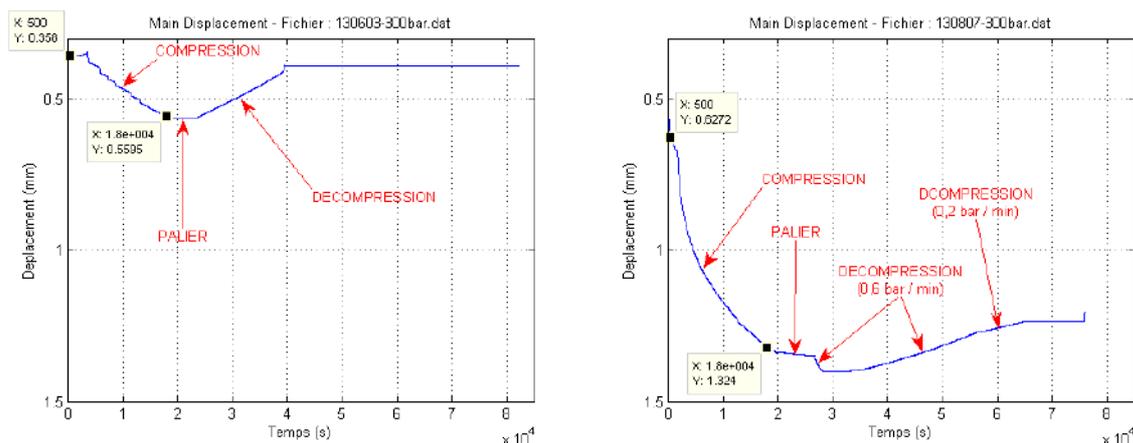


Figure 5.16-1 : Signal « Main Displacement MD » - Essai_1 et Essai_2

Afin de rendre plus parlant le déplacement de haut en bas de l'outil, nous avons inversé l'échelle verticale des graphes indiquant sa position en millimètre.

Deux curseurs sont placés aux instants 500 s et 18000 s délimitant la phase de compression hors séquence de fermeture de l'outil D-DIA, telle que définie au paragraphe 5.3.1. Nous retrouvons les trois phases principales d'un essai :

- **Compression :**
D'une durée 18 000 s (5h) pour atteindre les 300 bar du palier avec un taux de compression de 1 bar / min. Nous avons un enfoncement des LVDT ce qui est bien traduit par les déplacements vers le bas
- **Palier :**
Pression maintenue constante pendant la phase d'expérimentation. Le piston étant immobile, la sortie des capteurs LVDT est stable.
- **Décompression :**
Réalisée à un taux identique à celui de la compression (1 bar / min) lors de l'Essai_1 (cube d'aluminium). Lors de l'Essai_2 le taux de décompression est d'abord de 0,6 bar / min puis 0,2 bar / min. le piston remonte, relaxant les LVDT.

Nous pouvons également remarquer que le déplacement du piston secondaire est beaucoup plus important lors de la compression d'un échantillon géologique (Essai_2). En effet, d'après les valeurs des curseurs nous observons une descente de :

- Essai_1 : $0,5595 - 0,358 = 0,2015$ mm (201,5 μ m)
- Essai_2 : $1,324 - 0,6272 = 0,6968$ mm (696,8 μ m)

La descente du piston est donc 3,5 fois plus élevée durant l'Essai_2.

5.16.1 Etude du signal MD durant la phase de Compression

Les figurent ci-dessous détaillent la phase de compression :

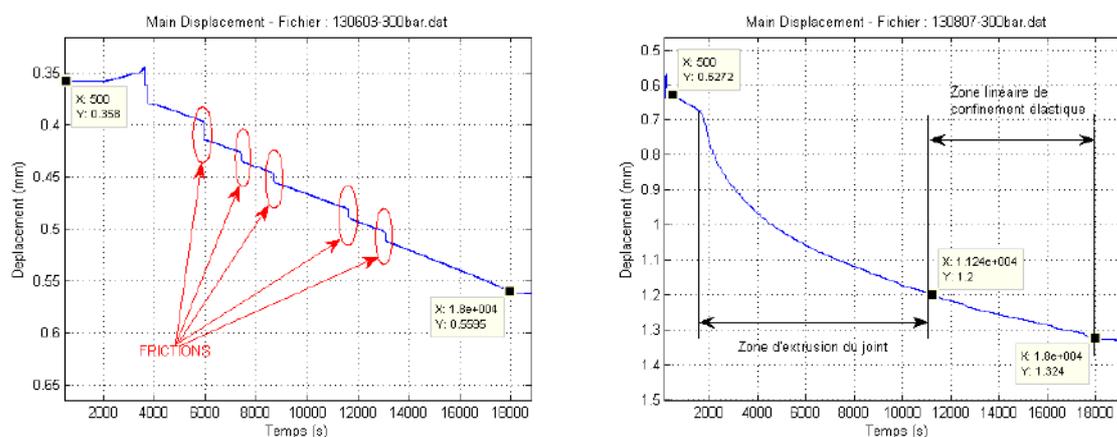


Figure 5.16-2 : Signal MD : Phase de compression Essai_1 et 2

- Essai_1 : Le déplacement du piston semble linéaire. Cependant apparaissent de ruptures douces identifiées comme étant des phénomènes de friction. Ces frictions ont lieu, malgré la disposition de feuilles de Téflon et de lubrifiant les entre les parties inférieure et supérieure de l'outil D-DIA.
- Essai_2 : Le déplacement du piston présente deux profils différents. Un premier profil non linéaire, durant lequel le joint placé entre les enclumes secondaires est extrudé. Puis, lorsque l'extrusion n'est plus possible, le déplacement devient linéaire, correspondant à une déformation élastique de l'ensemble enclumes secondaires – octaèdre – échantillon. D'après la position des curseurs, la transition entre ces deux zones de fonctionnement a lieu environ 11240 s après le début de la compression le piston ayant parcouru plus de 80% de sa course finale. La pression hydraulique du vérin actionnant le piston est alors de 205,9 bar.

L'extrusion du joint explique que la course de piston central soit supérieure lors de l'essai_2.

5.16.2 Phénomène de Friction

Lorsque nous détaillons la zone de déplacement linéaire du piston lors de l'Essai_2, nous voyons également apparaître, tout comme lors de l'Essai_1, des phénomènes de friction mais provoquant des changements plus doux.

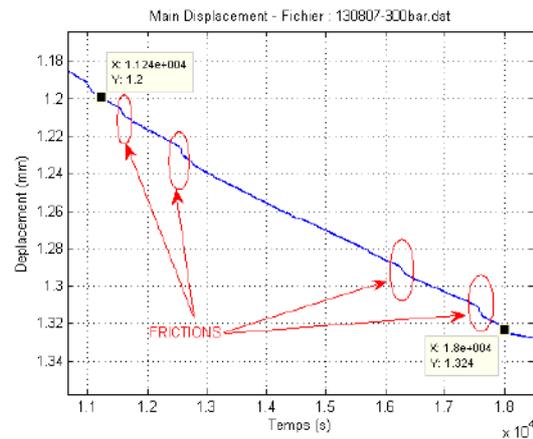


Figure 5.16-3 : Phénomènes de friction lors du confinement Essai_2

A partir des tracés ci-après, quantifions ces phénomènes lors de l'Essai_1 et 2.

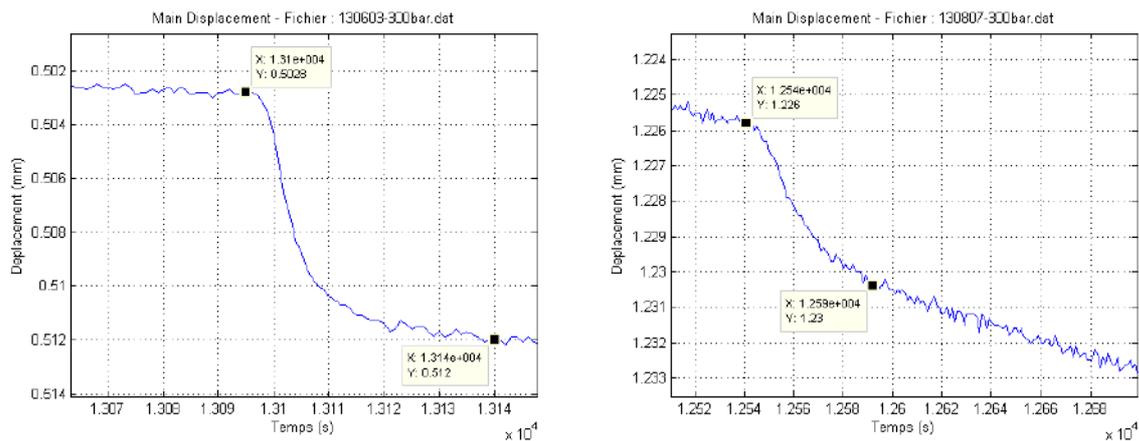


Figure 5.16-4 Amplitude des phénomènes de friction lors des Essai_1 et 2

Les deux exemples choisis sont apparus sensiblement au même instant de la compression. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Essai_1	Temps (s)		Position (μm)		Pression Hydraulique (bar)		Force (tf / MPa)	
	Début :	13095	Début :	502,8	Début :	219,4	Début :	633 / 6,21
	Fin :	13140	Fin :	512,0	Fin :	220,4	Fin :	635 / 6,23
	Durée :	45 s	Course : (μm)	9,2	Amplitude :	1,0 bar	Amplitude :	2 tf / 0,02 MN
Essai_2	Temps (s)		Position (mm)		Pression Hydraulique (bar)		Force (tf / MPa)	
	Début :	12541	Début :	1226	Début :	210,7	Début :	607 / 5,95
	Fin :	12592	Fin :	1230	Fin :	211,7	Fin :	610 / 5,98
	Durée :	51 s	Course : (μm)	4,0	Amplitude :	1,0 bar	Amplitude :	3 tf / 0,03 MN

Tableau 5.16-1 : Caractéristiques des phénomènes de friction

6 Traitement des signaux issus de l'instrumentation de la presse

6.1 Introduction

Comme cela a été décrit au chapitre 4, cette dernière fournit des signaux provenant de deux types de capteurs :

- 16 Jauge de contrainte : Installées sur les 4 piliers de la presse, elles permettent de mesurer la déformation au point de fixation de la jauge dans la direction longitudinale de leur grille de mesure.
- 16 Rosettes de jauge de contrainte : Installées sur l'outil D-DIA permettent de mesurer la déformation dans toutes les directions du plan sur lequel elles sont fixées.

La priorité de notre étude étant la mise en sécurité des utilisateurs et la préservation de la presse et notamment de l'outil D-DIA, nous nous sommes prioritairement intéressés à l'analyse des signaux fournis par les rosettes. C'est en effet après la casse de cet outil que la décision a été prise d'instrumenter la presse LVP. Nous allons donc décrire les traitements que nous avons appliqués à ces signaux afin d'en retirer le maximum d'informations sur son comportement sous contrainte et envisager une méthode de surveillance afin de garantir que sous les contraintes appliquées par le piston central, les déformations subies demeurent dans le domaine élastique de l'acier le constituant. Le code réalisant ces traitements et écrit sous Matlab ® se trouve en annexe I où l'on trouvera également la fonction de filtrage utilisée ici (fonction REJ) et réalisée selon l'.

Nous étudierons à la fin de ce chapitre les signaux issus des jauges disposées sur les piliers ceux-ci pouvant nous renseigner sur le comportement de la structure de la presse lors de son fonctionnement.

6.2 Choix ds Essais étudiés

Afin de mettre en relations les résultats obtenus par les deux sources de signaux dont nous disposons :

- L'automate Mavo pilotant la presse LVP.
- La chaîne d'acquisition HBM.

Cependant, nous devons prendre en compte le fait que les signaux MP et MD et ceux provenant des jauge et rosettes, provenant de sources différentes, ne sont pas synchronisés.

Nous avons étudiés les signaux issus des rosettes disposées sur l'outil D-DIA et obtenus au cours des deux essais considérés lors de notre étude des signaux de mesure de pression hydraulique du vérin actionnant le piston principal (MP) et de la position de ce dernier (MD) fournis par l'automate Mavo.

Les mesures issues des jauge de contrainte disposées sur les piliers ont été obtenues lors d'un troisième essai.

Nous limiterons, ici également, l'étude de ces essais aux phases de compression.

Sont résumées dans le tableau ci-dessous les principales données de ces essais:

	Essai_1	Essai_2	Essai_3
Date de l'essai :	03/06/2013	07/08/2013	28/08/2013
Pression du palier :	300 bar		
Force équivalente :	864,6 tf / 8,48 MN		
Taux de compression :	1 bar / min		
Capteurs	8 Rosettes	8 Rosettes	16 jauges
Emplacement des capteurs	D-DIA inférieur	D-DIA inférieur (6) D-DIA supérieur (2)	Piliers
Structure soumise à compression :	Cube d'Aluminium	Echantillon géologique	Cube d'Aluminium
Chauffage :	Non	1500 °C	Non
Portion du signal étudié :	500 s à 18 000 s		
Pression hydraulique initiale P_0 :	13,4 bar	15,5 bar	11,8 bar
Pression hydraulique maximale P_{max} :	299,8 bar	299,3 bar	299,6 bar
Fréquence d'échantillonnage :	2400 Hz		
Nombre d'échantillons :	126 Mech. / rosette	42 Mech. / jauge	

Tableau 6.2-1 : Données principales des essais étudiés

Lors de l'Essai_2 l'échantillon géologique a été porté à 1500 °C durant la phase de palier, la chauffe ayant commencé un quart d'heure après le début de cette phase.

6.3 Configurations des mesures

L'emplacement et le repérage des capteurs, sont décrits au chapitre 4 et dans le rapport d'intervention de la société HBM disponible dans l'annexe I.

Nous exposons également dans ce chapitre, les combinaisons de capteurs que nous avons retenus. En effet, les 24 voies de mesures de l'instrumentation HBM dont nous disposions à la date de ces essais ne nous permettaient qu'une surveillance partielle de la structure de la presse lors d'un essai.

En résumé, les signaux proviennent :

- Essai_1 : De la totalité des 8 rosettes disposées sur la partie inférieure de l'outil D-DIA (repérées en vert sur la Figure 6.3-1, gauche).
- Essai_2 : Des 2 rosettes disposées sur la partie haute de l'outil D-DIA, (repérées en rouge sur la Figure 6.3-1, gauche), des 2 rosettes placées en regard sur la partie basse (S1, E2) ainsi que des deux couples de rosettes adjacentes (W1, S2) et (E1, N2).
- Essai_3 : De l'ensemble de 4 rosettes disposées sur chacun des quatre piliers (Figure 6.3-1, droite).

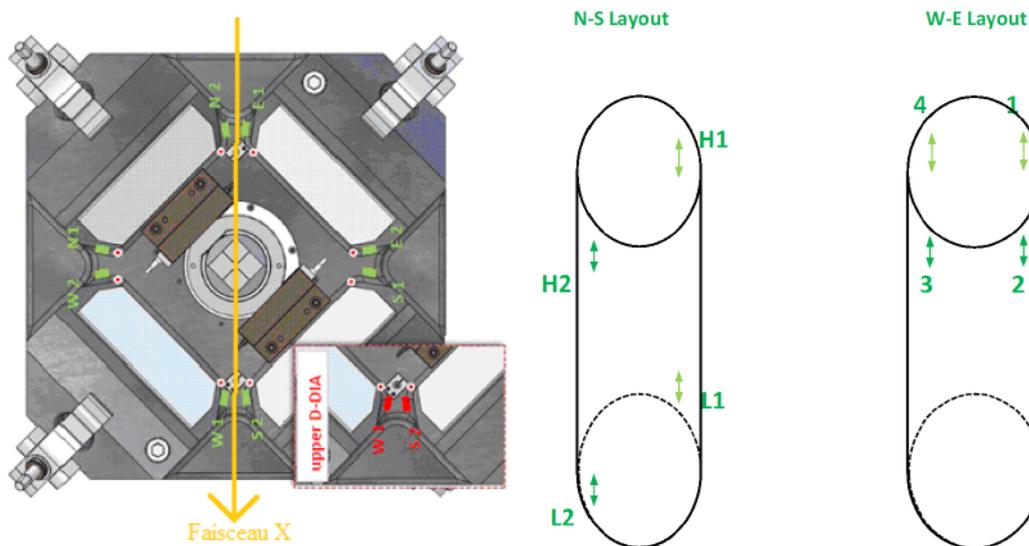


Figure 6.3-1 : Disposition des capteurs sur l'outil D-DIA et sur les piliers

La cadence d'échantillonnage retenue est la valeur maximale permise par l'instrumentation HBM. Ce choix devant nous permettre de détecter d'éventuels événements transitoires. Il nous impose en contre partie un volume de données particulièrement volumineux de 42 Mech par jauge de contrainte et de 126 Mech par rosette (42 Mech pour chacune des 3 grilles de la rosette) lors de l'acquisition de la seule phase de compression d'un essai.

Le filtrage anti-repliement configuré par défaut à cette cadence d'échantillonnage, est assuré par un filtre passe-bas de type Butterworth dont la fréquence de coupure est égale à 250 Hz.

Intéressons-nous aux deux premiers essais (Essai_1 et 2) durant lesquels nous avons réalisé des mesures sur l'outil de la presse.

6.4 Etude des signaux issus des rosettes disposées sur l'outil D-DIA

Il s'agit des mesures de déformation délivrées par la chaîne d'acquisition HBM lors des Essai_1 et 2. Nous présentons sur la page suivante uniquement les signaux provenant de deux rosettes pour chacun des deux essais.

Il s'agit pour l'essai_1 de deux rosettes adjacentes disposées sur l'outil inférieur DDL_WW1 et DDL_S2 (Repérées W1 et S2 en vert Figure 6.3-1 gauche) et pour l'Essai_2 de deux rosettes placées selon une symétrie verticale sur l'outil inférieur et supérieur, DDL_W1 et DDU_W1 (Repérées W1 en vert et S2 en rouge Figure 6.3-1, gauche).

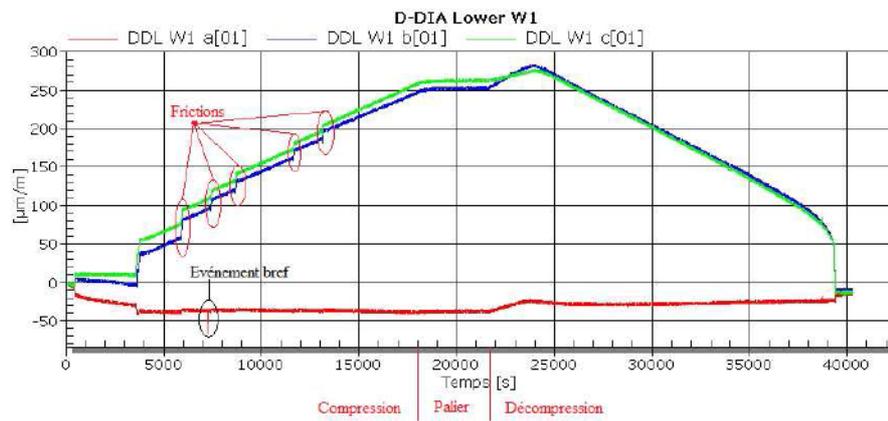


Figure 6.4-1 : Signaux de déformation rosette DDL_W1 - Essai_1

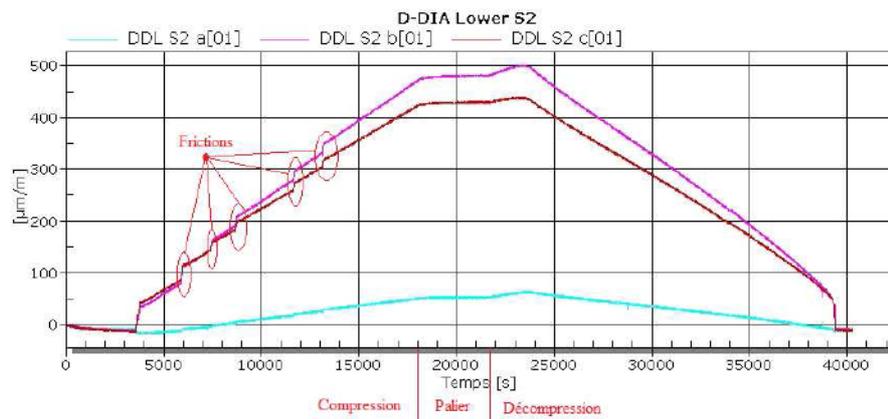


Figure 6.4-2 : Signaux de déformation rosette DDL_S2 - Essai_1

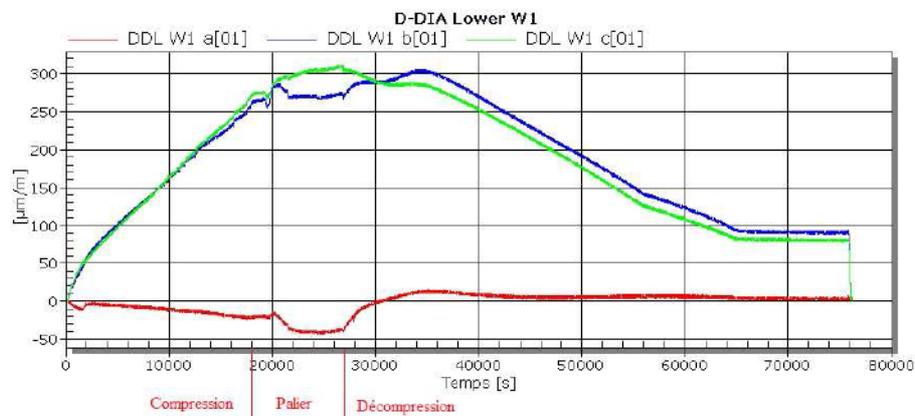


Figure 6.4-3 : Signaux de déformation rosette DDL_W1 - Essai_2

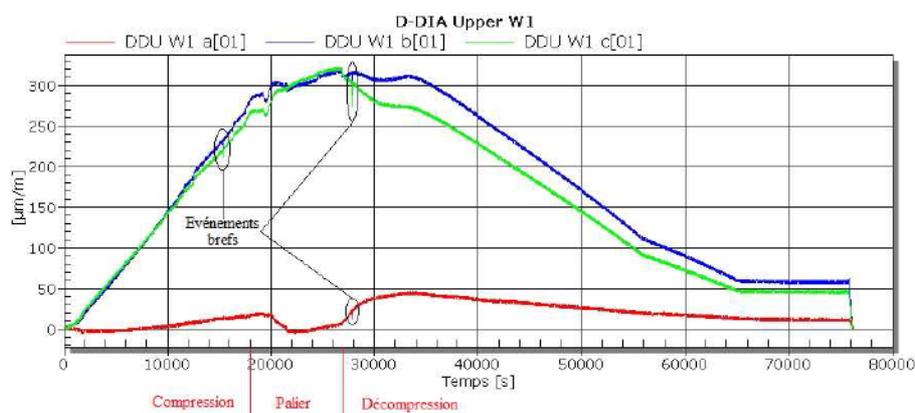


Figure 6.4-4 : Signaux de déformation rosette DDU_W1 - Essai_2

Chacune de ces courbes comporte trois tracés correspondants aux déformations vues par les trois grilles de la rosette correspondante, repérées 'a', 'b' et 'c'. Les grilles 'a' étant orientées vers l'extérieur de l'outil.

Nous pouvons, à l'examen de ces courbes, faire les remarques suivantes :

6.4.1 Rapprochement des signaux de déformation au signal MP

Nous avons repérés sur ces graphiques les trois phases principales d'essai décrites au chapitre 5 traitant des signaux issus de l'automate pilotant la presse:

- Compression : Durée identique pour les deux essais de 5 h (18 000s), temps nécessaire pour atteindre une pression hydraulique de 300 bar à un taux de 1 bar /minute.
- Palier : Durée de 1h pour l'Essai_1 et de 2h 28 min pour l'Essai_2.
- Décompression : Nous pouvons constater que, durant cette phase, la pente des signaux correspondants à l'Essai_2 évolue, conformément aux taux de décompression utilisés de 0,6 bar / min dans un premier temps puis de 0,2 bar / min.

Nous retrouvons dans la tendance des signaux de déformation, comme dans le signal de mesure de pression MP, la consigne de l'automate $u(n)$ traduction de la consigne utilisateur $u(t)$. Les signaux de déformation traduisent l'effet de cette consigne sur l'outil D-DIA.

Les corrections de consigne apportées par l'opérateur ne sont pas décelables du fait, sans doute, de la faible variation de pression hydraulique qu'elles provoquent. Nous avons vu, lors de l'étude du signal MP, que ces variations étaient de l'ordre de 2 bar au maximum, entraînant vraisemblablement sur l'outil une variation de contrainte, et par conséquent de déformation, trop faible pour être mesurable.

De plus, leur durée, de l'ordre d'une dizaine de secondes, représente, à la cadence d'échantillonnage des signaux de déformation de 2400 Hz, une variation lente de leur amplitude sur 24000 échantillons.

Pour les même raison les échelons de pression du signal MP de l'ordre de 0,5 bar et d'une durée de 15 à 18 secondes sont indécélables sur les signaux de déformation.

6.4.2 Rapprochement des signaux de déformation au signal MD

Ces courbes présentent un profil immédiatement identifiable à celui des signaux MD de chaque essai étudiés au chapitre 5.

Nous avons constaté que le signal MD, lors de la phase de compression de l'Essai_2 sur un échantillon géologique, présentait une portion non linéaire due à l'extrusion du joint placé entre les enclumes secondaires. Nous retrouvons cette non linéarité sur les mesures de déformation de la rosette DDL_W1 (Figure 6.4-3) de 0 à 12000 s environ. Par contre, la jauge DDU_W1 (outil supérieur) ne semble pas présenter de non linéarité significative (Figure 6.4-4).

Nous avons également repéré des phénomènes de friction à des instants sensiblement identiques (au décalage temporelle près des deux sources de signaux) à ceux observés sur les signaux MD correspondant.

6.4.3 Remarques sur l'évolution des signaux de déformation

Les signaux 'b' et 'c' présentent des amplitudes sensiblement égales, alors que les signaux 'a' sont relativement faibles. Ceci tendant à montrer, en première approximation, que la direction des déformations et contraintes principales est celle de la bissectrice de l'angle de 45° formé par les grille 'b' et 'c', soit par rapport à la grille 'a' un angle de l'ordre de $45^\circ + 45^\circ/2 \approx 68^\circ$. Cette direction pointant vers l'intérieur de l'outil.

Pour un même essai, les amplitudes atteintes en fin de compression par les signaux des grilles 'b' et 'c' sont différentes d'une rosette à l'autre. Ainsi pour l'essai _1, le niveau de ces signaux est de l'ordre de :

- 250 à 260 $\mu\text{m} / \text{m}$ pour la rosette DDL_W1 (Figure 6.4-1).
- 430 à 480 $\mu\text{m} / \text{m}$ pour la rosette DDL_S2 (Figure 6.4-2).

En revanche, ces amplitudes semblent constantes d'un essai à l'autre comme on peut le voir pour la rosette DDL_W1 (Figure 6.4-1 et Figure 6.4-3).

Lors des phases de décompression l'amplitude relative des signaux 'b' et 'c' peuvent s'inverser : ainsi si le signal 'b' était supérieur au signal 'c' lors des phases de compression et de palier, 'c' devient supérieur à 'b' lors de la décompression, et réciproquement. Cela peut révéler une modification de la direction principale lors de la décompression.

6.4.4 Observation d'événements brefs

Des événements brefs sont également repérables. Durant la phase de compression et en début de phase de décompression. Ces derniers sont peut-être dus à des casses d'enclumes secondaires survenant fréquemment lors de la relâche des contraintes s'exerçant sur elles.

Notre étude portant sur les phases de compression, examinons celles-ci de plus près.

6.5 *Présentations des traitements réalisés*

6.5.1 Limitations matériels des possibilités de traitement

Comme cela est présenté au chapitre 4 caractérisant l'achaine d'acquisition, la taille des signaux ne nous a pas permis de traiter systématiquement toutes les jauges ni toute la durée des essais. C'est pour cela que nous avons choisi de ne traiter que la phase de compression et que cette étude sera réalisée sur des tranches de signaux.

Les traitements ont été réalisés sur des tranches de signaux d'une durée maximale d égale à 100 s. Calculons le volume de données correspondant aux signaux issus des trois grilles d'une rosette sur une telle durée :

$$3 \times \frac{d}{T_e} = 3 \times d \times F_e = 3 \times 100 \times 2400 = 720 \text{ kech} \quad (6.5-1)$$

Ce volume de données nous permet de réaliser des calculs de corrélation, de TFD, et de convolution dans des délais raisonnables autorisant les essais successifs nécessaires à la mise au point et à l'analyse de ces traitements.

Si nous avons opté pour une durée maximale d'observations de 100 s, nous sommes également contraint par la suppression des zones d'amorçages, produites par les divers filtrages réalisés au cours de traitements décrits ci-après, à respecter une durée minimale d'observation de 11 s, car, comme cela est illustré Figure 6.5-1, la demie durée d'observation ($t_0 - t_d$) doit respecter :

$$4,7225 \text{ s} + 0,5 \text{ s} = 5,2225 \text{ s} \leq (t_d - t_0) = \quad (6.5-2)$$

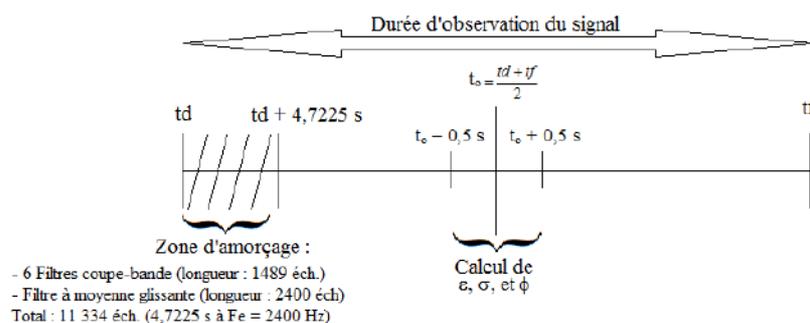


Figure 6.5-1 : Durée d'observation minimale et maximale

Soient td et tf les instants de début et de fin d'observation, nous avons choisi :

$$11s \leq (tf - td) \leq 100s \quad (6.5-3)$$

6.5.2 Description des traitements réalisés sur les signaux de déformation

6.5.2.1 Définition de la plage d'observation des signaux de déformation

Les traitements seront réalisés sur une durée d'observation maximale de 100 s. Nous avons respecté les critères suivant pour sélectionner cette plage d'observation :

- Etre suffisamment proche de la fin de la phase de compression (18000s).
- S'assurer que aucun phénomène de friction, ni événement bref n'ait lieu durant cette observation.
- Faire en sorte que cette durée d'observation soit commune aux Essai_1 et 2.

Nous avons défini une plage allant de 16000s à 16100s, correspondant aux pressions hydrauliques (signal MP) suivantes :

- Essai_1 : MP(n=16000) = 267,3 bar
 MP(n=16100) = 268,5 bar
- Essai_2 : MP(n=16000) = 267,0 bar
 MP(n=16100) = 268,6 bar

Cela représente une variation de 1,2 bar pour l'Essai_1 et de 1,6 bar pour l'Essai-2. Ces valeurs, associées à un taux de compression de 1 bar / minute, semblent indiquer ces portions de signal de contiennent un ou plusieurs échelon de 0,5 bar comme vu lors de l'étude de MP. Ces chiffres sont cependant une approximation car les signaux MP et de déformation provenant des deux sources de signaux différentes, ils ne sont pas synchronisés.

6.5.2.2 Principales étapes du traitement des signaux de déformation

Nous avons dans un premier temps réalisé les étapes repérées 2) à 5) ci-dessous. La nécessité de filtrer les signaux issus des rosettes afin de les débarrasser de perturbations amenées par le réseau d'alimentation 50 Hz est alors apparue évident. Nous avons donc réalisé ce filtrage avant tout traitement. Ainsi notre démarche en vue de réaliser l'analyse des signaux de déformation peut être décrite par les cinq étapes principales suivantes :

- 1) Filtrage permettant la réjection de la fréquence du réseau 50 Hz et de ses harmoniques.
- 2) Calcul des modules des déformations principales, et des contraintes principales à partir des signaux de déformation 'a', 'b', et 'c'. Nous nous sommes ensuite concentré sur l'étude du module des contraintes principales, le signal σ .
- 3) Modélisation de la tendance du signal σ par moyenne glissante. Vérification de la stationnarité du signal obtenu par soustraction de cette tendance au signal σ .
- 4) Analyse des phénomènes de friction apparaissant sur le signal σ .
- 5) Analyse d'événements brefs se produisant durant la phase de compression.

Ces traitements vont être présentés en détails ci-après.

6.6 Filtrage des signaux de déformation

Dans un premier temps nous avons construit, à partir des signaux de déformation, le signal σ , puis modélisé sa tendance, σ_t . Nous avons ensuite voulu vérifier la stationnarité du signal $\sigma_0 = \sigma - \sigma_t$. C'est à la vue des résultats de l'autocorrélation de σ_t et de son Corrélogramme que la nécessité de filtrer les signaux de déformation, avant tout traitement est apparue.

Le tracé de la fonction d'autocorrélation de σ_t et son Corrélogramme sont présentés ci-dessous :

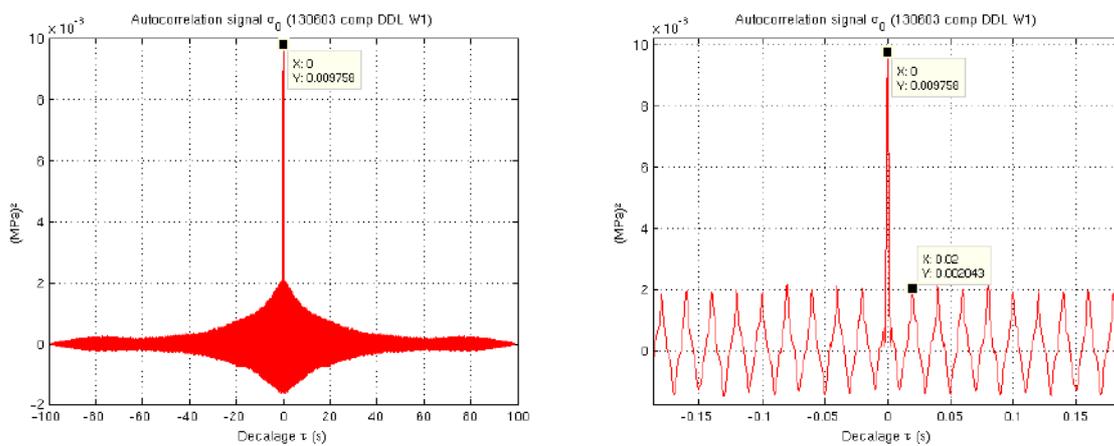


Figure 6.6-1 : Autocorrelation signal σ sans filtrage – DDL_W1 Essai_1

La périodicité de 20 ms (50 Hz) est évidente à la vue de la fonction de corrélation. Le coefficient de décorrélation que nous avons définis lors de l'étude du signal MP (cf chapitre 5) vaut ici :

$$R = \frac{C_{xx}(\tau = 0)}{C_{xx}(\tau = 20ms)} = \frac{0,009758}{0,002043} \approx 4,78 \quad (6.6-1)$$

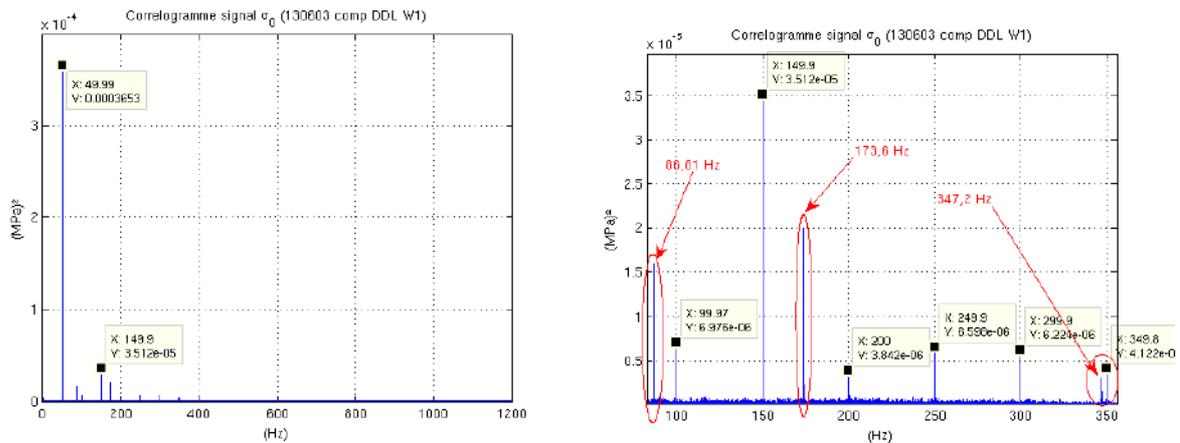


Figure 6.6-2 : Corrélogramme du signal σ sans filtrage -DDL_W1 Essai_1

Il apparaît, sur le Corrélogramme, qu'il nous faut débarrasser les signaux de déformation non seulement de la fréquence 50 Hz mais également de ses cinq harmoniques, jusqu'à 300Hz. En effet, l'amplitude de ces 6 raies sont vraiment prépondérantes par rapport au reste du contenu spectrale pouvant présenter un intérêt (raies cerclées de rouge).

Le filtrage sera réalisé au moyen du filtre RIF coupe-bande dont la étudié dans l'annexe G et dont le code écrit sous Matlab ® est disponible dans l'annexe H. Rappelons ces principales caractéristiques :

- Longueur : 1489 échantillons
- Atténuation à la fréquence de coupure (f_c) : 36,8 dB
- Largeur de bande coupée : 5 Hz (-3dB)
- Fréquences caractéristiques : $f_{c1,2} = f_c \pm 2,5$ Hz

Nous avons conçu ce filtre dans un premier temps pour rejeter une bande de fréquence centrée sur 50Hz, mais il est très facile, lors de la programmation de sa réponse impulsionnelle, de le rendre paramétrable par le seul ajustement des deux fréquences caractéristiques. Ainsi en respectant la condition $f_{c1,2} = f_c \pm 2,5$ Hz nous pouvons également éliminer les harmoniques de la fréquence du réseau d'alimentation. Nous constituons ainsi une banque de 6 filtres numériques en cascade afin d'éliminer les bandes de fréquences centrées sur les fréquences de :

- 50 Hz
- 100 Hz
- 150 Hz
- 200 Hz
- 250 Hz
- 300 Hz

Le choix de ne pas éliminer l'harmonique de 350 Hz est évident au regard de la Figure 6.6-2 (gauche), où l'on nous pouvons observer que celle-ci est proche d'une raie du spectre à 347,7 Hz qui peut être propre au signal. Le filtrage étant réalisé par opération de convolution successives entre les 6 réponses impulsionnelles et chaque signal de déformation 'a', 'b', 'c'. Nous supprimerons ensuite les zones d'amorçages constituées des 8934 (6×1489) premiers échantillons des signaux filtrés. Cela représente, à une cadence d'échantillonnage de 2400 Hz, la suppression des 3,7225 premières secondes de ces signaux.

Le résultat de ce filtrage est présenté ci- après sur le tracé du Corrélogramme du signal σ .

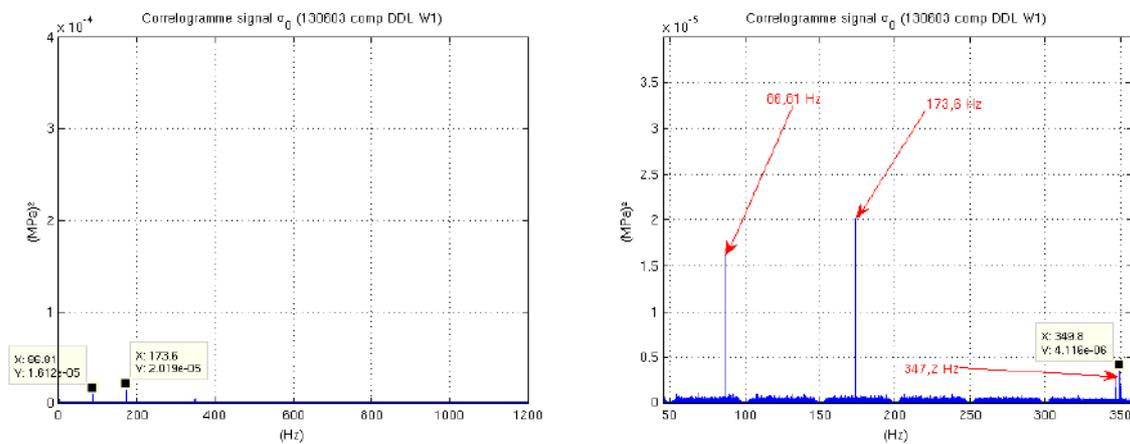


Figure 6.6-3 : Corrélogramme du signal σ_0 Essai_1

Nous avons choisi d'éliminer du signal en sortie de cette banque de 6 filtres les échantillons correspondant à la zone d'amorçage de ces filtres. La taille de la zone d'amorçage est de longueur $6L$, L longueur de chacun des filtres :

$$6 \times L = 6 \times 1489 = 8934 \text{ éch.} \quad (6.6-2)$$

Soit une durée de :

$$8934 \times T_e = \frac{8934}{F_e} = \frac{8934}{2400} = 3,7225 \text{ s} \quad (6.6-3)$$

Les 3,7225 premières secondes du signal σ en sortie de la banque de filtres seront donc supprimées.

6.7 Détermination des déformations, contraintes et directions principales

Ce calcul est réalisé conformément à ce qui est décrit au paragraphe 3.19. Nous avons déterminé successivement :

- $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: Les déformations principales, selon les équations (3.19-18) et (3.19-19).
- σ_x, σ_y : Les contraintes principales, selon l'équation (3.19-25).
- ϕ : La direction principale selon l'équation (3.19-26).

Cette dernière étant définie par rapport à la direction de la grille a.

Nous avons ensuite calculé, ε et σ , les modules des déformations et contraintes principales :

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2} \quad (6.7-1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (6.7-2)$$

Sur la page suivante figure l'évolution des signaux ε , σ et ϕ durant la phase de compression des Essai_1 et 2 correspondant aux rosettes que nous avons retenues. A leur examen, nous pouvons faire les observations suivantes :

- La direction principale apparaît très instable dans en première partie de la phase de compression. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en début de compression le signal 'a' est pratiquement nul (voir équation (6.7-3)).
- On retrouve les événements brefs repérés sur les tracés des signaux 'a', 'b' et 'c' (Figure 6.4-1 à Figure 6.4-4) mais également des événements invisibles sur ces mêmes tracés.
- Les événements brefs ne sont pas présents sur toutes les jauges avec la même intensité. Ils peuvent même ne pas apparaître.
- Comme nous l'avons supposé à la vue des signaux de déformation, les valeurs finales de contrainte peuvent aller du simple au double suivant l'emplacement des rosettes :
Entre 60 et 80 MPa pour les rosettes DDL_W1 et DDU_W1 et plus de 120 MPa pour la rosette DDL_S2. Ces valeurs semblent cependant répétées d'un essai à l'autre (DDL_W1).
- Les valeurs finales des directions principales semblent toutes se stabiliser aux alentours de 70°.

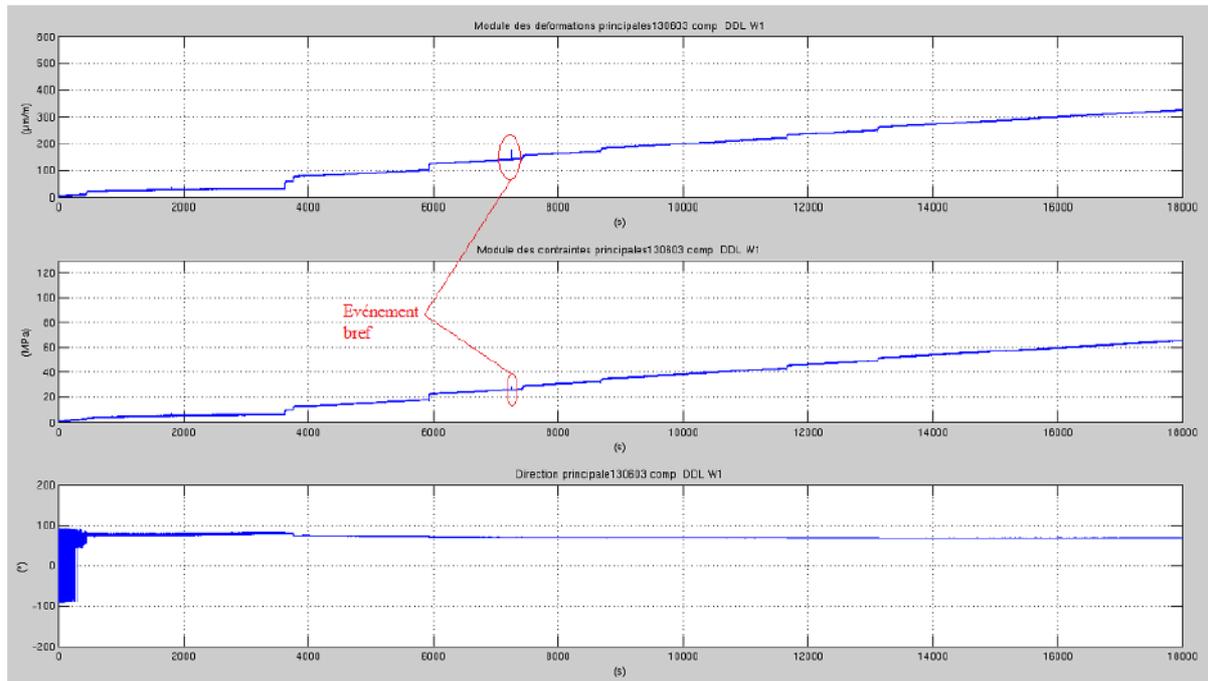


Figure 6.7-1 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDL_W1 - Essai_1

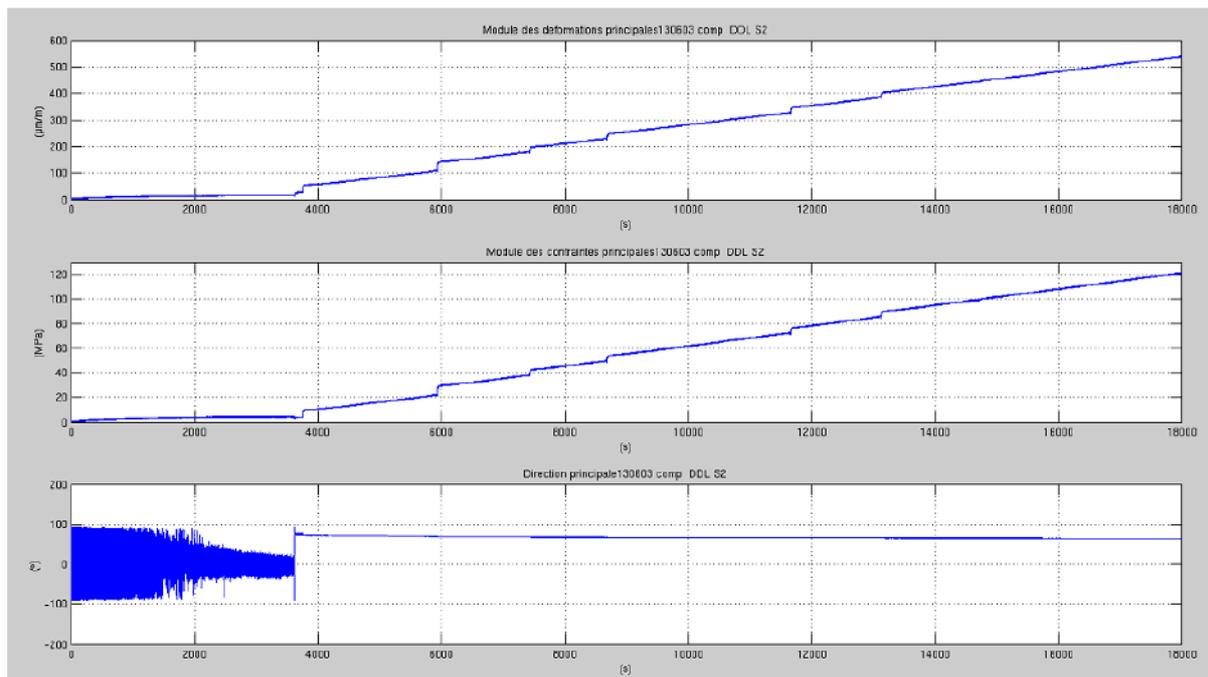


Figure 6.7-2 : Signaux ε , σ , ϕ rosette DDL_S2 - Essai_1

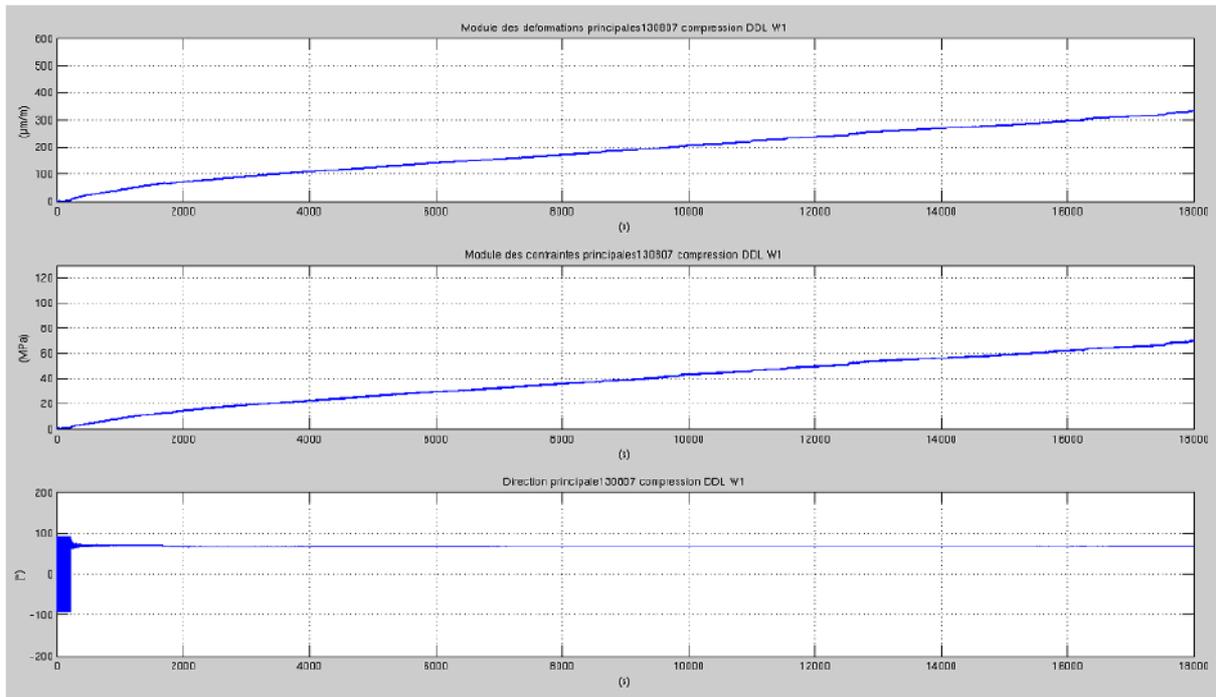


Figure 6.7-3 : Signaux ϵ , σ , ϕ rosette DDL_W1 - Essai_2

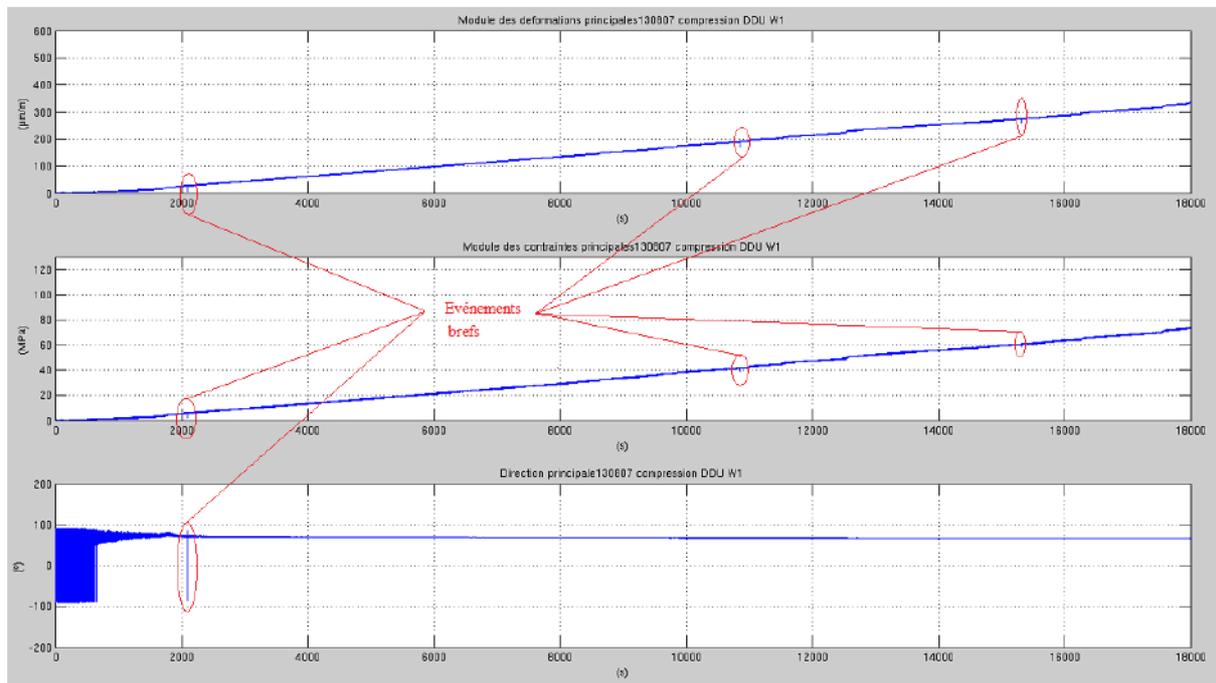


Figure 6.7-4 : Signaux ϵ , σ , ϕ rosette DDU_W1 - Essai_2

Ces calculs nous ont permis de faire un état des modules des déformations et des contraintes principales ainsi que des directions principales en quatre instants uniformément au cours de la phase de compression :

- 4500 s (25%)
- 9000 s (50%)
- 13500 s (75%)
- 17990 s (100%)

Les valeurs et leur écart type sont donnés dans les deux tableaux ci-après. Ces valeurs ont été obtenues par le calcul de moyennes sur $\pm 0,5$ s autour des instants déterminés ci-dessus. Les écarts types de contrainte et de déformation sont eux calculées sur les signaux rendus stationnaires afin de ne pas être biaisés.

ESSAI_1	t (s)	4500		9000		13500		18990	
	MP (bar)	78,8		152,6		226,2		299,8	
DDL W1	ε ($\mu\text{m/m}$)	84,0	0,42	185,8	0,41	265,0	0,41	325,1	0,39
	σ (Mpa)	14,1	0,07	35,7	0,09	52,7	0,09	65,5	0,09
	ϕ ($^\circ$)	73,9	0,19	69,3	0,09	68,5	0,06	68,6	0,05
DDL S2	ε ($\mu\text{m/m}$)	69,9	0,40	254,6	0,39	411,8	0,40	538,5	0,39
	σ (Mpa)	13,4	0,01	55,6	0,10	91,9	0,10	121,3	0,10
	ϕ ($^\circ$)	71,2	0,23	66,0	0,07	64,7	0,04	64,2	0,03
DDL S1	ε ($\mu\text{m/m}$)	68,4	0,52	173,1	0,43	252,7	0,43	313,9	0,42
	σ (Mpa)	11,4	0,08	33,6	0,09	51,0	0,10	64,5	0,10
	ϕ ($^\circ$)	63,2	0,21	64,3	0,09	64,6	0,06	64,9	0,06
DDL E2	ε ($\mu\text{m/m}$)	101,8	0,37	219,6	0,39	306,4	0,39	372,7	0,40
	σ (Mpa)	19,0	0,08	44,8	0,09	63,8	0,09	78,3	0,10
	ϕ ($^\circ$)	73,2	0,17	69,6	0,07	69,1	0,05	69,2	0,04
DDL E1	ε ($\mu\text{m/m}$)	57,4	0,36	95,4	0,38	170,1	0,39	232,5	0,40
	σ (Mpa)	13,4	0,11	16,2	0,07	32,1	0,08	45,5	0,09
	ϕ ($^\circ$)	-69,9	0,33	77,2	0,17	71,9	0,10	70,5	0,07
DDL N2	ε ($\mu\text{m/m}$)	59,2	0,39	60,7	0,43	149,3	0,39	219,4	0,04
	σ (Mpa)	15,1	0,11	10,4	0,07	29,3	0,09	44,5	0,09
	ϕ ($^\circ$)	-34,4	0,31	73,3	0,25	69,4	0,10	68,7	0,08
DDL N1	ε ($\mu\text{m/m}$)	77,5	0,48	194,9	0,43	284,0	0,39	350,9	0,40
	σ (Mpa)	12,9	0,07	38,1	0,09	57,8	0,09	72,7	0,09
	ϕ ($^\circ$)	63,1	0,16	63,7	0,07	64,2	0,05	64,6	0,04
DDL W2	ε ($\mu\text{m/m}$)	44,1	0,36	104,1	0,39	192,0	0,39	262,5	0,39
	σ (Mpa)	10,3	0,10	19,1	0,08	38,0	0,09	53,1	0,09
	ϕ ($^\circ$)	-66,9	0,42	75,1	0,16	71,5	0,09	70,5	0,70

Tableau 6.7-1 : Valeurs des signaux ε , σ , et ϕ au cours de la compression - Essai _1

ESSAI_2	t (s)	4500		9000		13500		18990	
	MP (bar)	80,3		153,1		226,5		299,3	
DDL W1	E ($\mu\text{m/m}$)	116,9	0,39	187,4	0,41	261,8	0,41	333,5	0,38
	S (Mpa)	24,3	0,10	39,2	0,10	55,0	0,10	70,0	0,10
	phi ($^{\circ}$)	66,3	0,14	67,5	0,09	68,1	0,06	68,6	0,05
DDL S2	E ($\mu\text{m/m}$)	119,4	0,37	254,6	0,39	399,7	0,38	541,0	0,39
	S (Mpa)	27,3	0,10	58,3	0,10	91,4	0,10	123,6	0,10
	phi ($^{\circ}$)	64,6	0,14	64,4	0,07	64,4	0,04	64,5	0,03
DDL S1	E ($\mu\text{m/m}$)	127,6	0,42	196,4	0,44	266,9	0,41	335,1	0,41
	S (Mpa)	26,5	0,10	41,1	0,10	56,4	0,10	71,3	0,10
	phi ($^{\circ}$)	67,6	0,14	68,1	0,09	68,0	0,07	67,9	0,05
DDL E2	E ($\mu\text{m/m}$)	135,6	0,39	214,7	0,38	294,1	0,41	370,2	0,41
	S (Mpa)	28,8	0,10	46,0	0,10	63,2	0,10	79,7	0,11
	phi ($^{\circ}$)	66,6	0,12	67,5	0,08	68,0	0,06	68,3	0,05
DDU W1	E ($\mu\text{m/m}$)	71,3	0,39	154,7	0,38	245,3	0,39	333,6	0,40
	S (Mpa)	15,4	0,10	33,9	0,10	54,2	0,11	73,9	0,10
	phi ($^{\circ}$)	69,3	0,25	67,4	0,11	66,1	0,07	65,7	0,05
DDU S2	E ($\mu\text{m/m}$)	35,5	0,42	90,6	0,95	162,3	1,10	234,9	1,00
	S (Mpa)	5,8	0,08	17,6	0,29	33,3	0,33	49,0	0,32
	phi ($^{\circ}$)	-79,2	0,65	81,1	0,23	75,5	0,12	73,4	0,08
DDL N1	E ($\mu\text{m/m}$)	134,8	0,40	213,3	0,39	290,1	0,38	362,7	0,38
	S (Mpa)	28,7	0,10	45,8	0,10	62,7	0,10	78,6	0,10
	phi ($^{\circ}$)	66,6	0,12	67,0	0,08	66,9	0,06	66,8	0,04
DDL W2	E ($\mu\text{m/m}$)	20,0	0,37	95,1	0,39	181,1	0,37	263,5	0,38
	S (Mpa)	3,4	0,08	19,5	0,10	37,9	0,10	55,5	0,10
	phi ($^{\circ}$)	-86,9	6,30	74,5	0,18	71,9	0,10	71,0	0,07

Tableau 6.7-2 : Valeurs des signaux ε , σ , et ϕ au cours de la compression - Essai_2

A l'aide de ces valeurs, nous pouvons immédiatement confirmer les observations que nous avons faites l'examen visuel des signaux de déformation issus des rosettes au chapitre 6.4.3 ainsi qu'en début de ce chapitre :

- Les résultats sont reproductibles à plus de 90% d'un essai à l'autre à intervalle de 2 mois :

Essai_1 DDL_W1 $\sigma(17990\text{s}) = 65,5 \text{ MPa}$ Essai_2 DDL_W1 $\sigma(17990\text{s}) = 70,0 \text{ Mpa}$

Essai_1 DDL_S2 $\sigma(17990\text{s}) = 121,3 \text{ MPa}$ Essai_2 DDL_S2 $\sigma(17990\text{s}) = 123,6 \text{ Mpa}$

- Les valeurs de contrainte sont très variables suivant l'emplacement des rosettes sur l'outil. Même si d'un essai à l'autre toutes les rosettes n'ont pu être surveillées, nous pouvons faire le bilan suivant :
Les minimums sont obtenus pour les rosettes DDL_N2 (44,5 MPa) lors de l'Essai_1 et DDU_S2 (49,0 MPa) lors de l'Essai_2. Les maximums lors des deux essais sont mesurés par la rosette DDL_S2 avec 121,3 et 123,6 MPa. Ainsi les écarts sont de 250% à 270 %.
- Les valeurs des directions principales se stabilisent lors des deux essais aux environ de $70^\circ \pm 4^\circ$.

Afin de mieux visualiser l'évolution des valeurs de contraintes pour chacune des rosettes, les figures des deux pages suivantes représentent ces valeurs pour les couples de rosettes situées en vis-à-vis et de part et d'autres des plans inclinés de l'outil D-DIA.

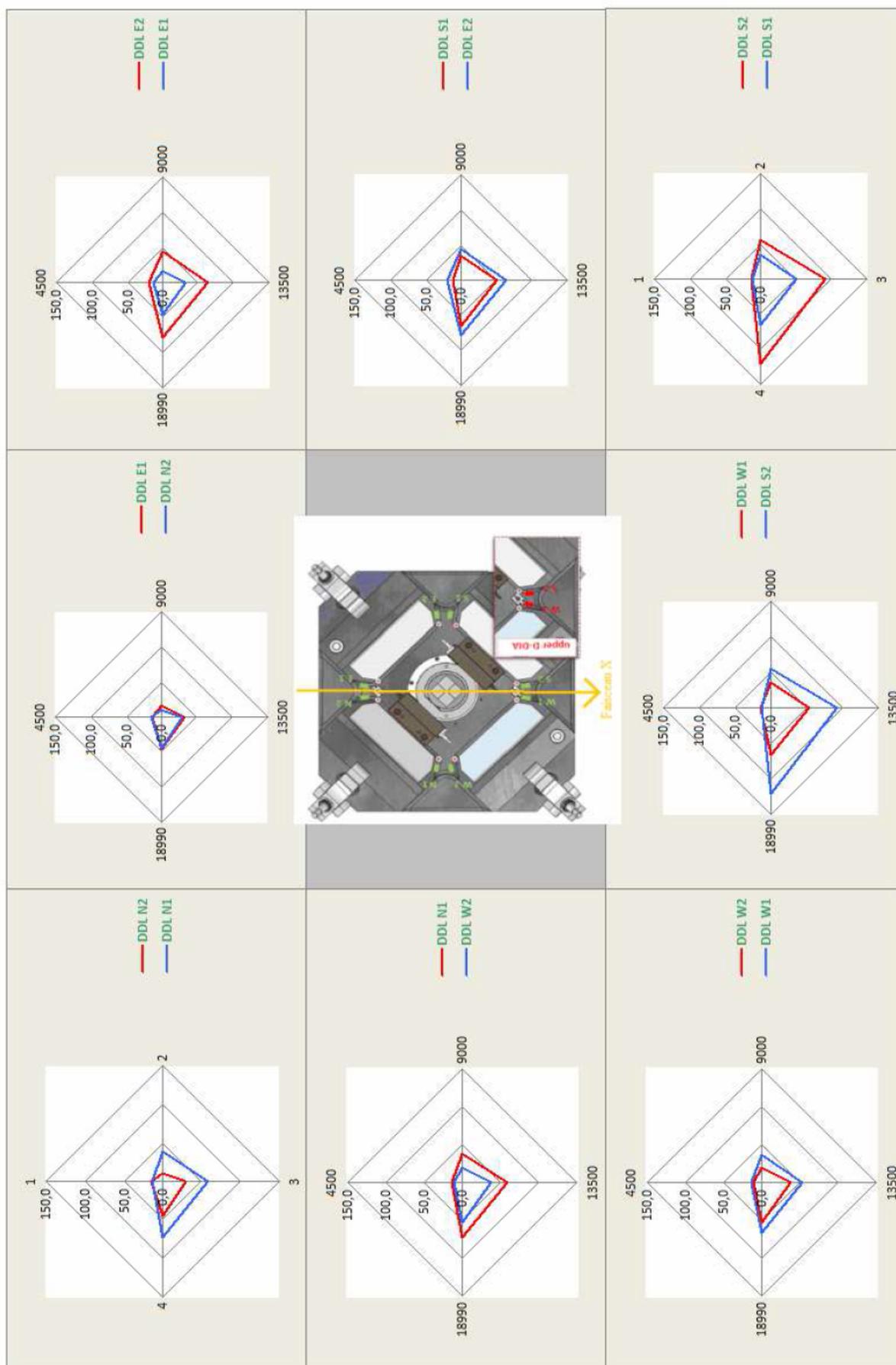


Figure 6.7-5 : Evolution des contraintes durant la compression – Essai_1

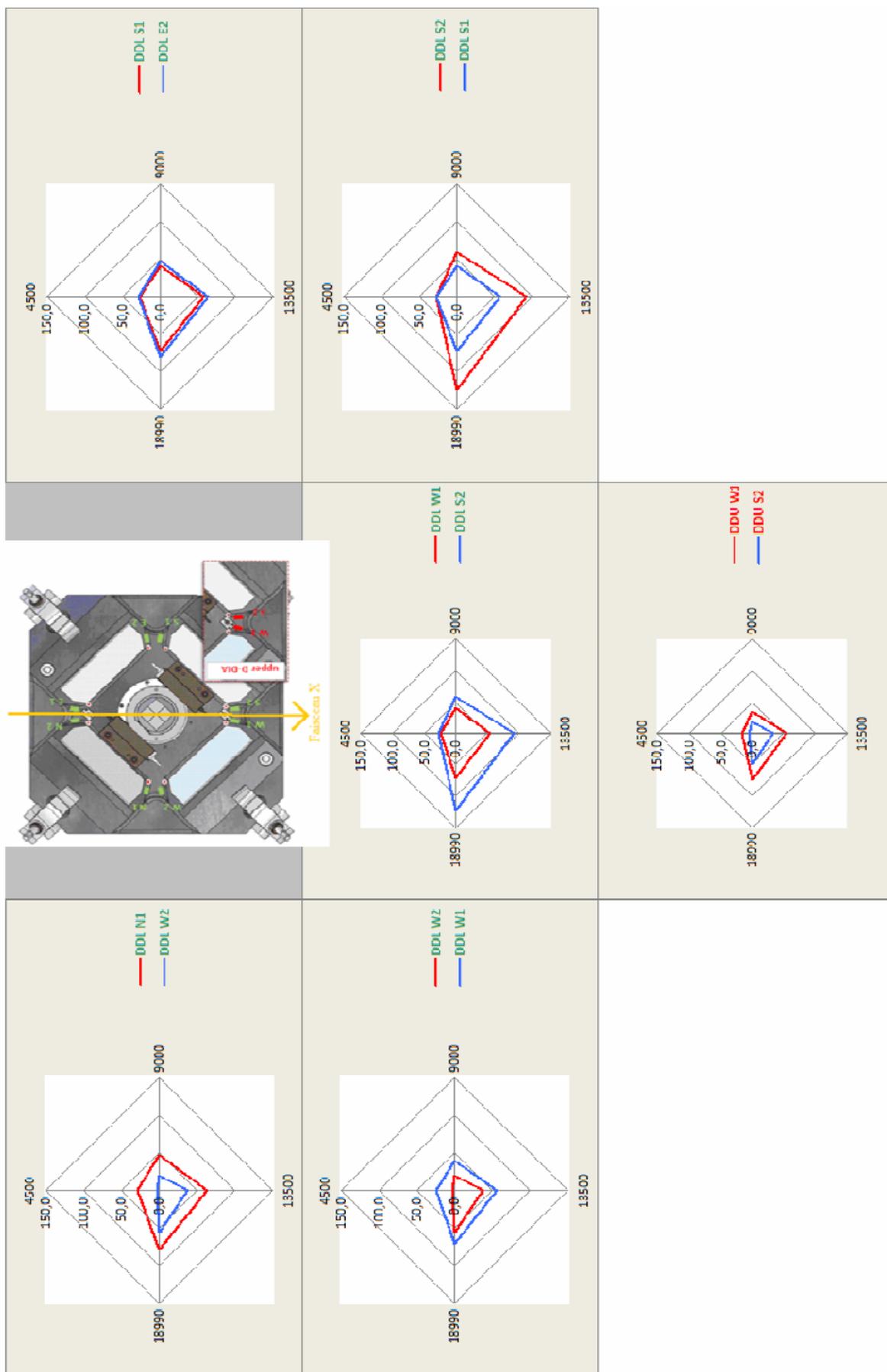


Figure 6.7-6 : Evolution des contraintes durant la compression – Essai_2

Les valeurs obtenues lors des deux essais en fin de compression (17990 s) sont représentées ci-après en fausses couleurs afin de mieux visualiser leur disparité.

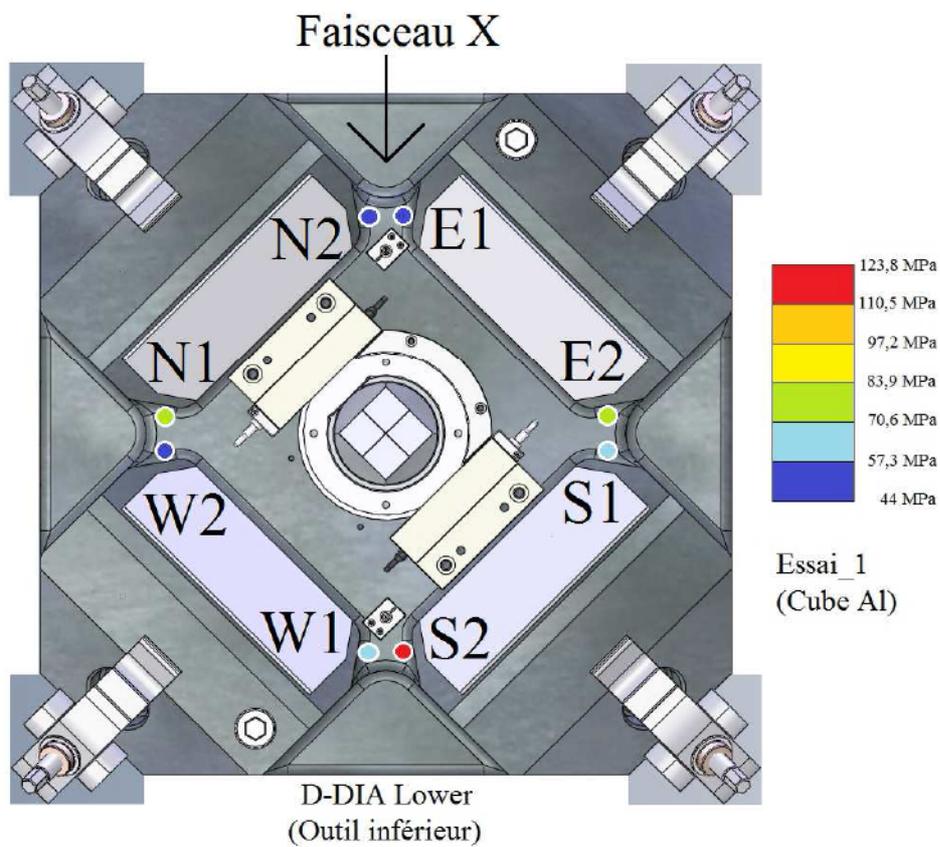


Figure 6.7-7 : Valeurs de contraintes en fin de compression – Essais_1

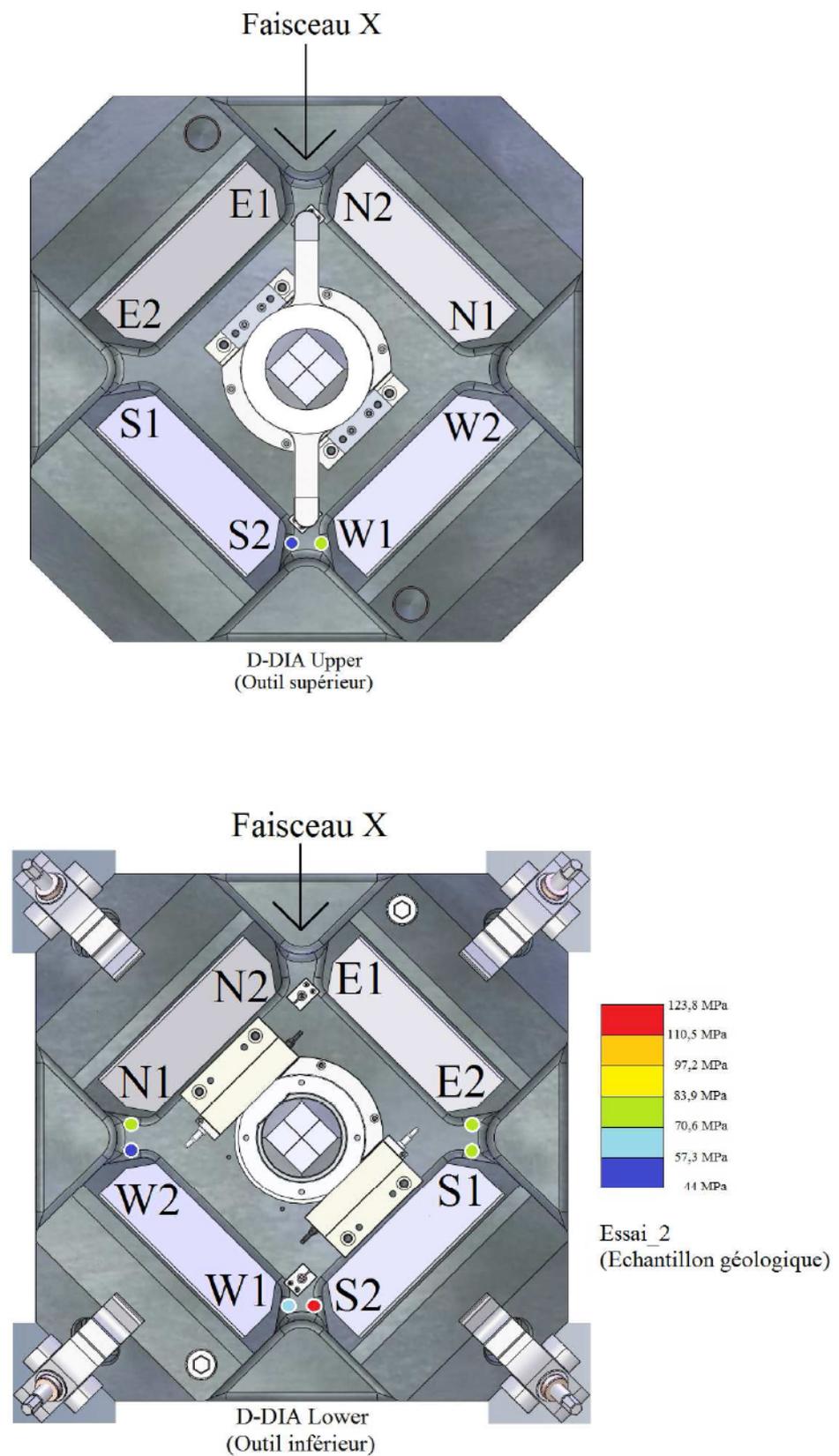


Figure 6.7-8 : Valeurs de contrainte obtenues en fin de compression sur outil supérieur – Essai_2

Sur le dessin figurant en page suivante, sont tracés, pour les deux rosettes se trouvant en vis-à-vis sur la partie inférieure de l'outil, DDL_W1 et DDL_WW2 :

- Les axes 'a', 'b', 'c' des grilles de rosettes
- Les déformations $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$.
- Les axes X,Y de la base principale.
- La direction principale ϕ définie par rapport à l'axe longitudinal de la grille 'a'.
- Les déformations principale ε_x et ε_y et leur module ε .
- Les contraintes principale σ_x et σ_y et leur module σ .

Les valeurs correspondantes figurent dans le tableau ci-après. Elles ont été déterminées en fin de phase de compression (17990 s) lors de l'Essai_1. Ce sont des valeurs moyennes calculées sur 1s.

Essai_1	DDL_W1	DDL_S2
ε_a ($\mu\text{m} / \text{m}$)	-39,0250	50,4988
ε_b ($\mu\text{m} / \text{m}$)	246,7117	470,0767
ε_c ($\mu\text{m} / \text{m}$)	257,9648	422,1749
ϕ ($^\circ$)	68,6173	64,2451
ε_x ($\mu\text{m} / \text{m}$)	311,6731	534,9506
ε_y ($\mu\text{m} / \text{m}$)	-92,7333	-62,2451
ε ($\mu\text{m} / \text{m}$)	325,3080	538,6065
σ_x (MPa)	65,5046	119,1387
σ_y (MPa)	0,1774	22,6634
σ (MPa)	65,5269	121,2843

Tableau 6.7-3 : Valeurs des déformations et contraintes rosettes DDL_W1 et DDL_W2 (17990 s)

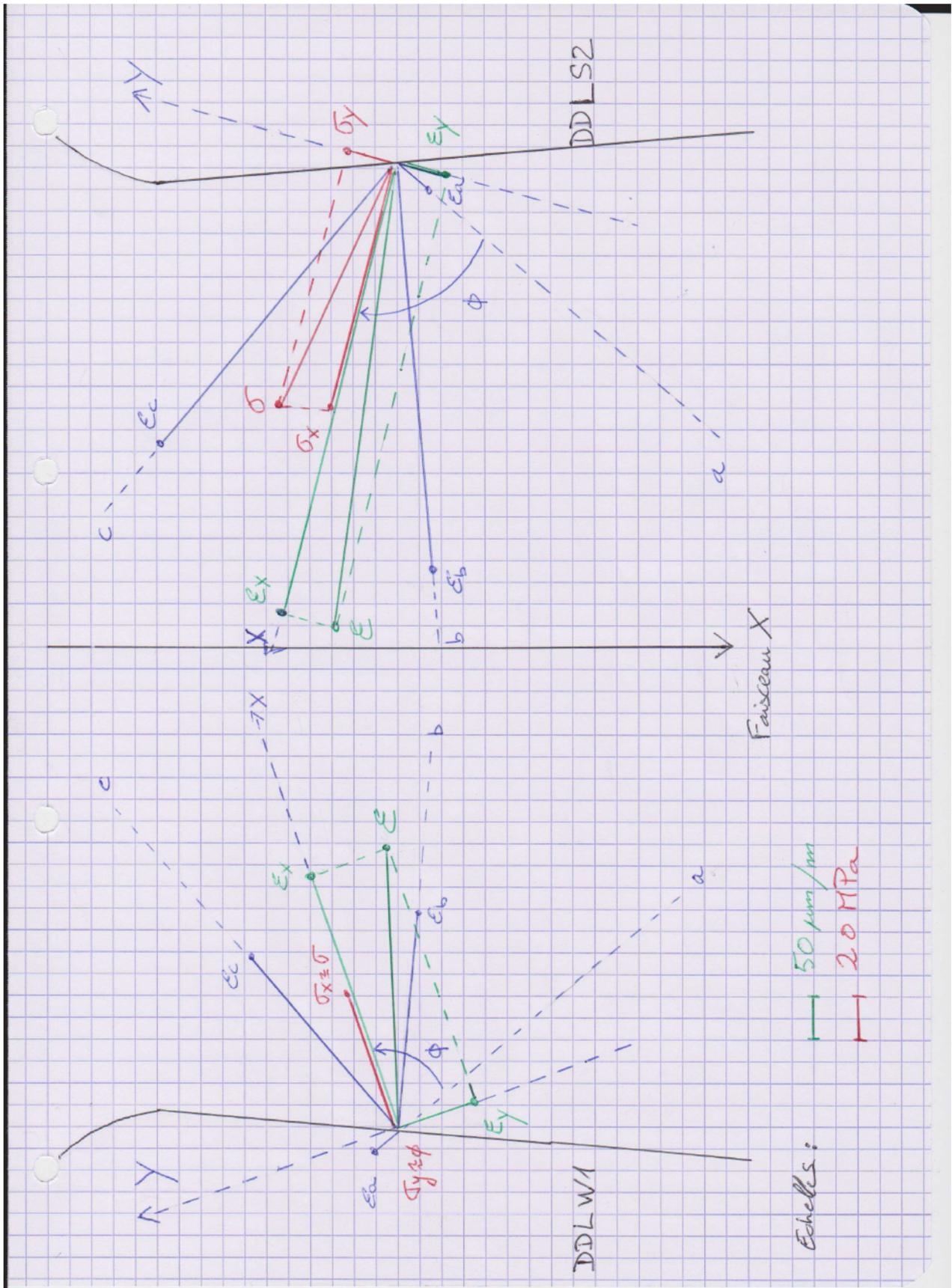


Figure 6.7-9 : Tracé des contraintes et déformations DDL_W1 et DDL_S2 (17990 s)

Toujours à partir des valeurs des modules de contraintes et de déformations principales (Tableau 6.7-1 et Tableau 6.7-2), nous avons tracé les caractéristiques contrainte-déformation et contrainte-pression hydraulique (signal MP) pour chaque essai et chaque couple de rosettes retenus.

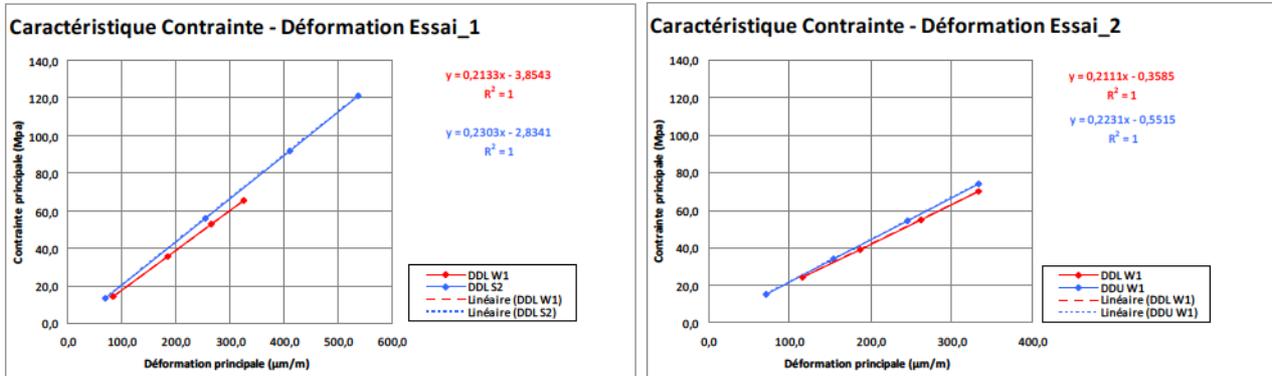


Figure 6.7-10 : Caractéristiques contrainte-déformation – Essais_1 et 2

Pour chaque tracé nous avons déterminé une droite de régression linéaire passant au plus près des quatre points de chaque caractéristique. Leur équation respective se trouve dans le coin supérieur droit. Le coefficient de détermination, R^2 , égal à 1, traduit le fait que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100% de la distribution des points.

Cette linéarité nous confirme que le matériau constituant l'outil est dans sa zone de déformation plastique. Le coefficient directeur de ces droites est alors identifiable au module de Young. Ici les contraintes étant exprimées en MPa et les déformations en $\mu\text{m} / \text{m}$, il nous suffit de multiplier ce coefficient par 10^{12} pour obtenir sa valeur en GPa. On trouve alors une valeur comprise entre 211 et 230 GPa, compatible avec le module Young de l'acier.

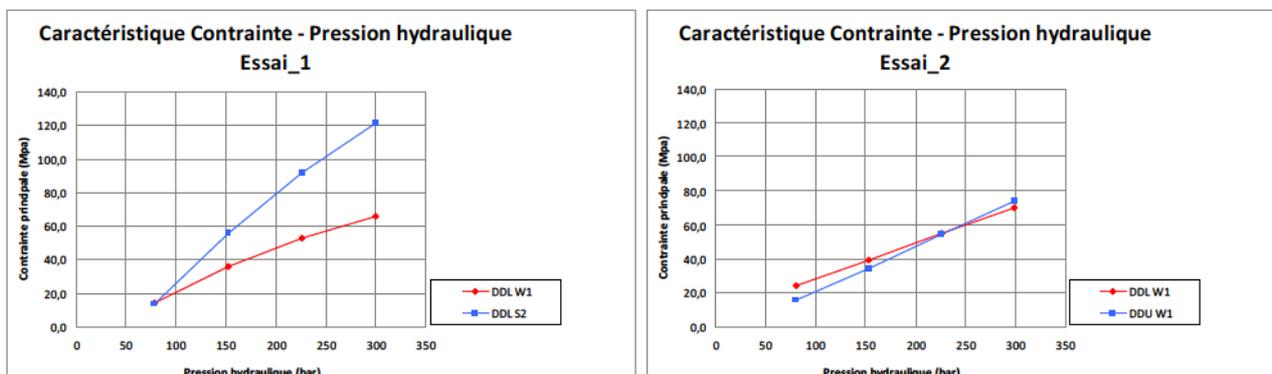


Figure 6.7-11 : Caractéristiques contrainte-pression hydraulique Essai_1 et 2

Ces caractéristiques reflètent la disparité des contraintes exercées par le piston central en divers points des parties haute et basse de l'outil.

6.8 Modélisation de la tendance du signal de contrainte σ par moyenne glissante

Nous allons nous intéresser dans la suite de cette étude, au seul signal σ , module des contraintes principales. Ce dernier étant la grandeur de sortie nous intéressant dans le cadre de notre étude.

Au vue de notre analyse du signal MP, nous avons opté directement pour une modélisation de la tendance de σ par moyenne glissante. Selon la même démarche que celle adoptée dans le cas du signal MP, nous avons vérifié si cette tendance, σ_{td} , nous permettait, par sa soustraction au signal σ , d'obtenir un signal, σ_0 , stationnaire.

Les principes des traitements réalisés ici ayant été exposés lors de l'étude du signal MP, nous en reprendrons les résultats sans plus de justifications.

6.8.1 Méthode

La réponse impulsionnelle, $h(n)$, d'un filtre RIF réalisant une moyenne glissante sur N_0 échantillons est une fonction porte de longueur N_0 et d'amplitude $1 / N_0$. La moyenne glissante, $\sigma_0(n)$, du signal numérique, $\sigma(n)$, est directement obtenue par convolution :

$$\sigma_{td}(n) = (\sigma(k) * h(k))_{(n)} = \left(\sigma(k) * \frac{1}{N_0} \Pi_{N_0}(k) \right)_{(n)} = \sum_{k=0}^n \sigma(k) h(n-k) \quad (6.8-1)$$

6.8.1.1 Remarques sur le choix de N_0

Nous avons choisi pour valeur de N_0 **2400 échantillons**, correspondant à une durée de **1 seconde**. Ce choix permettant une future décimation du signal σ dans un rapport de 2400, juste par prélèvement d'un échantillon sur 2400, chacun d'eux étant la moyenne des 2400 échantillons précédents. Cette opération permettrait de ramener la cadence d'échantillonnage à 1 Hz. Nous pourrions alors comparer les signaux MP, MD, et le signal σ provenant des deux sources de signaux que sont l'automate Mavo et l'instrumentation HBM, afin de :

- Tenter, par corrélation de ces signaux, de déterminer leur décalage temporel.
- Réaliser le calcul de fonctions de cohérence afin de déterminer une éventuelle relation linéaire entre ces signaux.

Nous devons garder à l'esprit que ce filtrage de type passe-bas, tend à « lisser » les événements de durée inférieurs à 1 s pouvant être présents sur le signal σ . C'est pourquoi nous avons choisi une portion de signal dépourvue de tout événement bref.

6.8.2 Allure de la tendance du signal σ modélisée par moyenne glissante

Les résultats obtenus pour $N_0=2400$ sont présentés ci-après :

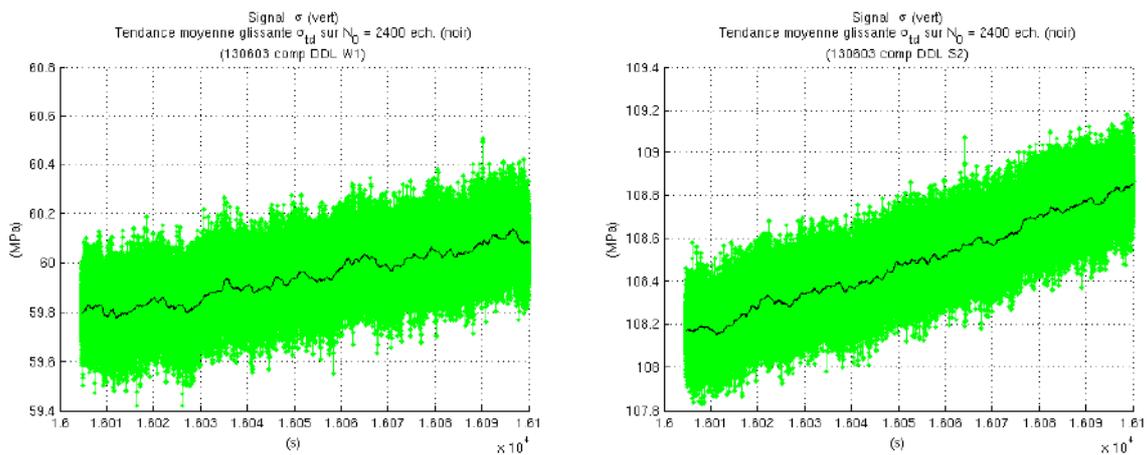


Figure 6.8-1 : Signal σ et σ_{id} obtenu par moyenne glissante – Essai_1

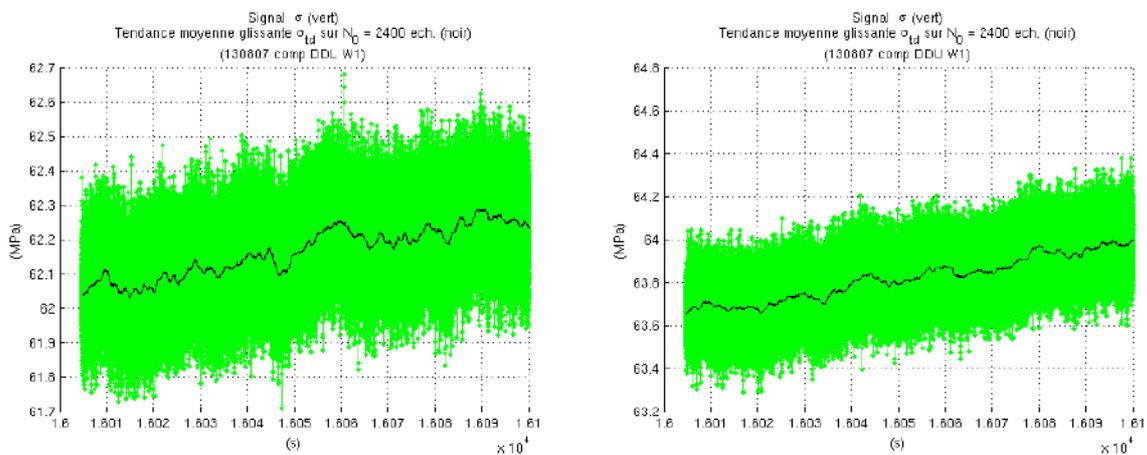


Figure 6.8-2 : Signal σ et σ_{id} obtenu par moyenne glissante – Essai_2

Le signal σ_{id} ne laisse apparaître aucune forme de signal échelon présent dans le signal de mesure de la pression hydraulique MP.

Le signal σ_{id} est décalé d'une durée correspondant au retard apporté par le filtrage RIF à moyenne glissante. Ce retard est fonction de la longueur de la réponse impulsionnelle $L = N_0 + 1 = 2401$ échantillons et de N_s valeur de l'échantillon pour laquelle elle présente un axe de symétrie :

$$\begin{cases} N_s = \frac{L-1}{2} = \frac{N_o}{2} \\ \tau = \frac{d\phi}{d\omega} = -NsTe = -\frac{N_o}{2Fe} = \frac{2400}{2 \times 2400} = 0,5s \end{cases} \quad (6.8-2)$$

La tendance de σ est donnée par :

$$\sigma_{td}(n) = \left(\sigma(k) * \frac{1}{N_o} \Pi_{N_o}(k - 2401) \right)_{(n)} \quad (6.8-3)$$

Nous réaliserons également la suppression de la zone d'amorçage, ici d'une longueur $L_0 = 2401$ échantillons, supprimant ainsi à une cadence d'échantillonnage de 2400 Hz, un peu plus d'une seconde en début du signal σ filtré.

Au total, la suppression des zones d'amorçage représente donc un nombre d'échantillons :

$$6L + L_0 = 6 \times 1489 + 2401 = 11335 \text{ éch.} \quad (6.8-4)$$

Cela représente la suppression de :

$$11335 \times Te = \frac{11335}{Fe} = \frac{11335}{2400} = 3,7229...s \quad (6.8-5)$$

Les 3,7229 premières secondes du signal σ_{td} seront ainsi supprimées. Cela nous impose, lors la rédaction du code de programmation des traitements, une gestion du nombre d'échantillons et des décalages des signaux que nous voudrions comparer.

6.8.3 Signal σ_0

Ce signal est défini par :

$$\sigma_0 = \sigma - \sigma_{td} \quad (6.8-6)$$

La représentation des signaux obtenus pour les essais et rosettes que nous avons retenus est donnée ci-après :

- Représentation temporelle

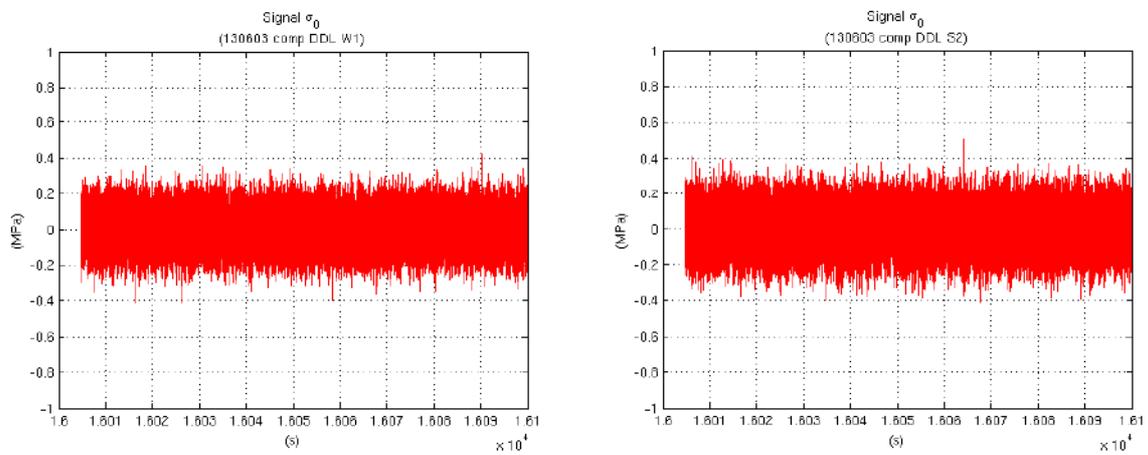


Figure 6.8-3 : Signal σ_0 - Essai_1

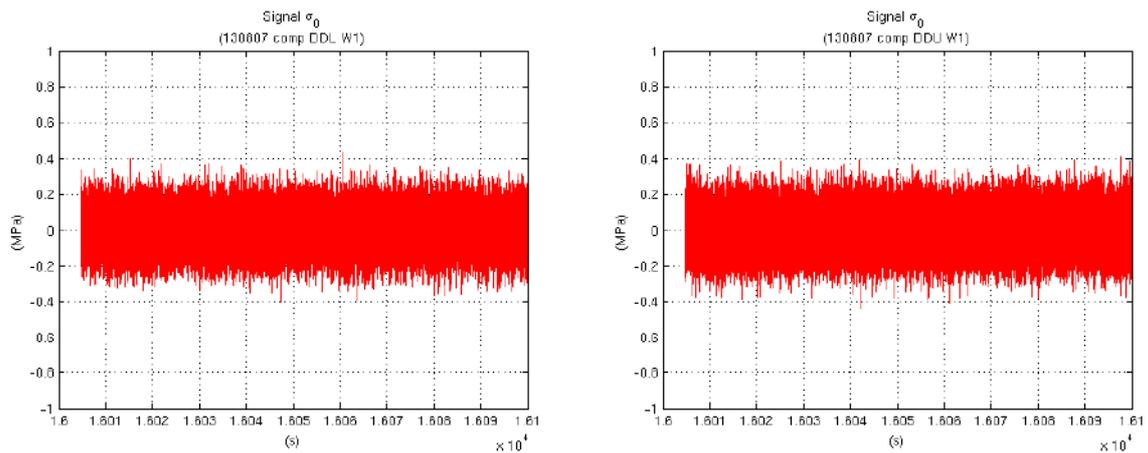


Figure 6.8-4 Signal σ_0 - Essai_2

Visuellement ces signaux semblent centrés. Examinons pour cela les distributions des valeurs de leurs amplitudes et leurs valeurs caractéristiques.

- Distribution

Ces distributions sont visualisées au moyen d'histogrammes et les valeurs des amplitudes de σ_0 sont réparties sur 40 classes de largeur identique.

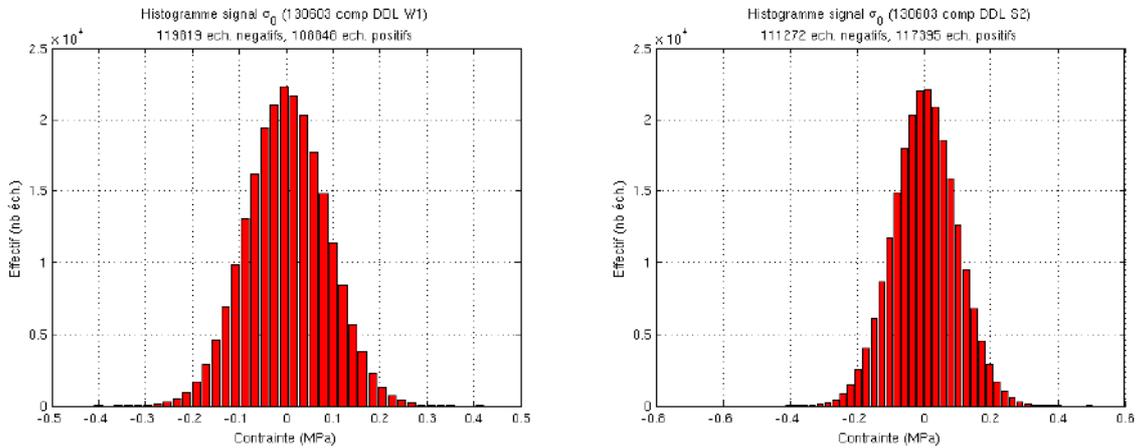


Figure 6.8-5 : Distribution des amplitudes du signal σ_0 - Essai_1

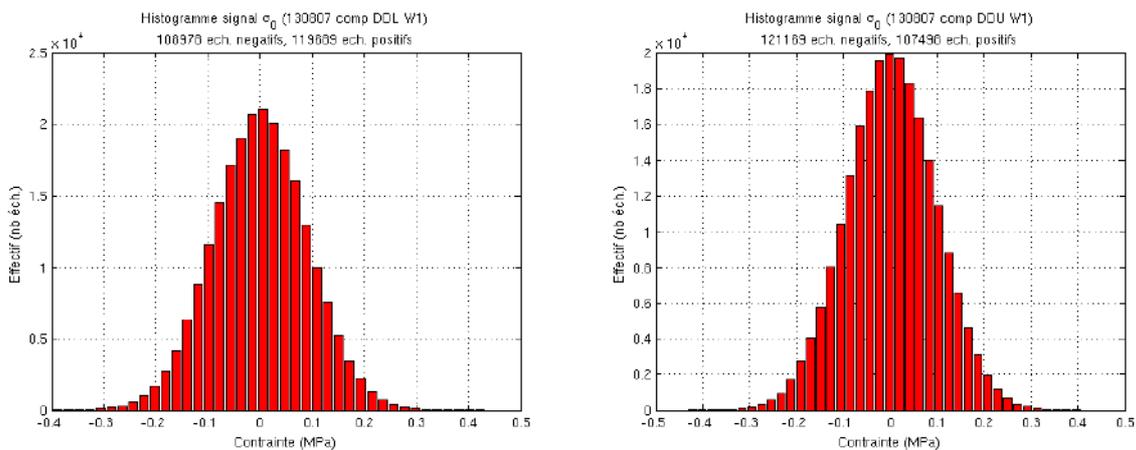


Figure 6.8-6 : Distribution des amplitudes du signal σ_0 - Essai_2

Ces distributions semblent centrées et gaussienne. Le calcul des ratios des effectifs des classes positives et négatives donne les valeurs suivantes :

	Essai_1 DDL_W1	Essai_1 DDL_S2	Essai_2 DDL_W1	Essai_2 DDU_W1
Effectif négatif	47,6 %	51,3 %	52,3 %	47 %
Effectif positif	52,4 %	48,7 %	47,7 %	53 %

Tableau 6.8-1 : Symétrie de la distribution des valeurs d'amplitude du signal σ_0 - Essai_1 et 2

Ces résultats révèlent une dissymétrie des histogrammes au maximum égale à 3 % confirmant que les signaux σ_0 sont relativement bien centrés.

- Valeurs caractéristiques

Ces valeurs sont calculées sur la durée d'observation de 100 s (240 kéch).

	Essai_1 DDL_W1	Essai_1 DDL_S2	Essai_2 DDL_W1	Essai_2 DDU_W1
Moyenne (MPa)	0,0015	0,0036	$9,9337 \cdot 10^{-4}$	0,0018
Ecart Type (MPa)	0,0851	0,0949	0,0903	0,0953
Minimum (MPa)	-0,4102	-0,4129	-0,3990	-0,4317
Maximum (MPa)	0,4231	0,5055	0,4320	0,4073

Tableau 6.8-2 : Valeurs caractéristiques du signal σ_0 - Essai_1 et 2

On retrouve la confirmation du centrage de σ_0 par les valeurs des moyennes très faibles et les valeurs quasiment opposées des minimums et maximums.

- Autocorrélation

L'autocorrélation du signal σ_0 pour chacun des essais considérés, figure ci-dessous :

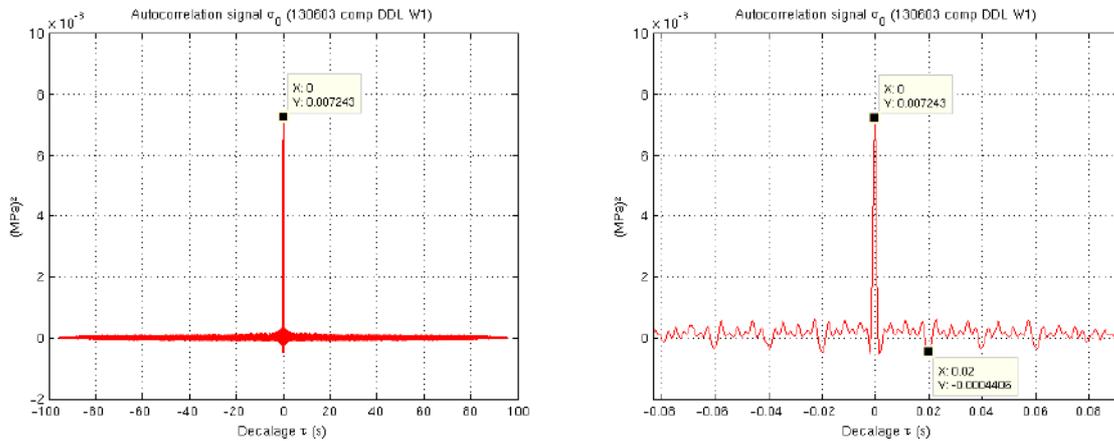


Figure 6.8-7 : Autocorrélation du signal σ_0 - Essai_1

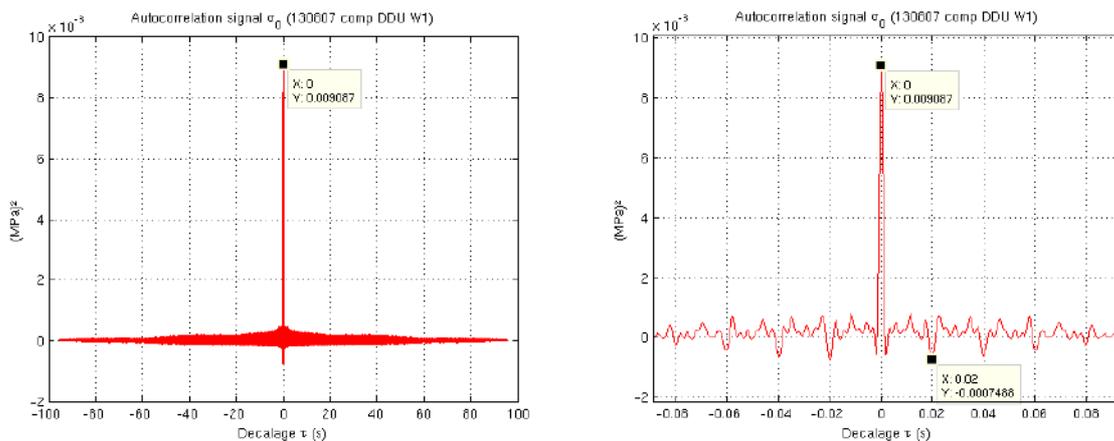


Figure 6.8-8 : Autocorrélation du signal σ_0 - Essai_2

Les courbes d'autocorrélation, ci-dessus, font apparaître un rapport de décorrélation, R , valant respectivement 16,4 (Essai_1) et 12,1 (Essai_2). Nous pouvons ici juger de l'efficacité du filtrage au moyen de notre banque de 6 filtres, puisque le facteur de décorrélation dans le cas de la rosette DDL_W1 (Essai_1) pris en exemple est passé de 4,78 à 16,4 ayant ainsi plus que triplé.

6.8.4 Temps de corrélation du signal σ_0

Le temps de corrélation, défini comme étant la durée au-delà de laquelle le processus est considéré sans mémoire, apparaît ici égal à 20 ms. Cela semble dû à la 7^e harmonique de la raie 50 Hz que nous avons décidé de ne pas supprimer, sa fréquence de 350 Hz étant proche d'une raie spectrale à conserver.

$$\tau_c = 20 \text{ ms}$$

6.8.5 Segmentation du signal σ_0

Ayant déterminé le temps de corrélation du signal σ_0 , nous pouvons procéder à sa segmentation sous réserve de s'assurer que la durée d'un segment de signal, $M.Te$, soit supérieure à τ_c . Ainsi les segments pourront être considérés comme décorrélés. Nous avons opté pour une segmentation sans chevauchement en blocs de tailles $M = 1024$ échantillons. La durée d'un segment est ainsi de $\tau = 0,5$ s, ce qui permet de vérifier que $\tau_c = 20 \text{ ms} \ll \tau = 0,5 \text{ s}$.

6.8.6 Stationnarité du signal σ_0

Nous avons alors calculé la moyenne et les écarts types de chaque bloc dont nous présentons une partie des résultats (une rosette par essai).

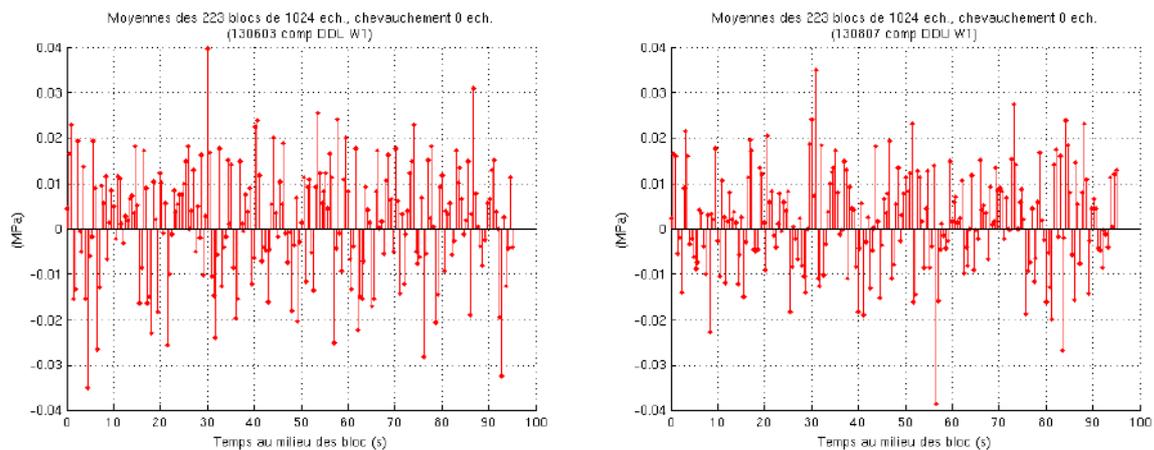


Figure 6.8-9 : Valeurs moyennes des blocs - Essai_1 et 2

Ces moyennes semblent relativement réparties autour d'une valeur de contrainte nulle et sont inférieures à 0,04 MPa. σ_0 fluctue donc autour de zéro.

Le fait d'avoir ôté au signal σ l'estimation de sa tendance par moyenne glissante sur 2400 échantillons, a rendu le processus sans dérive en moyenne, c'est-à-dire **stationnaire d'ordre 1**. Cette tendance, σ_{td} , peut être considérée comme l'effet de la consigne automate sur l'outil D-DIA par l'application de contraintes.

Le signal obtenu MPs peut alors être assimilé à une fluctuation autour d'une valeur moyenne constante.

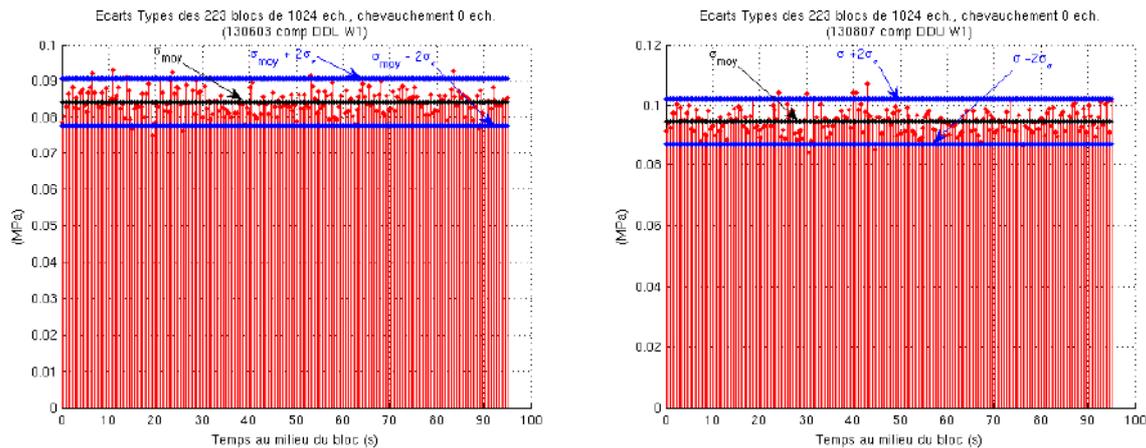


Figure 6.8-10 : Ecart types des blocs - Essai_1 et 2

Nous avons calculé la moyenne des écarts types, σ_{moy} , et l'écart type des écarts types σ_{σ} . Nous avons tracé la droite correspondant à σ_{moy} (tracé noir) et les deux droites égales respectivement à $\sigma_{moy} - 2\sigma_{\sigma}$ et $\sigma_{moy} + 2\sigma_{\sigma}$ (tracés bleus).

Les deux signaux ainsi segmentés peuvent être considéré comme étant **pratiquement stationnaire d'ordre 2** à $\sigma_{moy} = \pm 2\sigma_{\sigma}$.

6.8.7 Détermination de la densité de probabilité du bruit de σ_0

Nous allons vérifier, en utilisant la méthode de la droite d'Henry, si la distribution des valeurs d'amplitude de σ_0 est gaussienne comme le suggère les histogrammes présentés en Figure 5.5-16 et Figure 6.8-6. Nous réaliserons cette vérification sur une rosette par essai. Nous obtenons les tracés suivants :

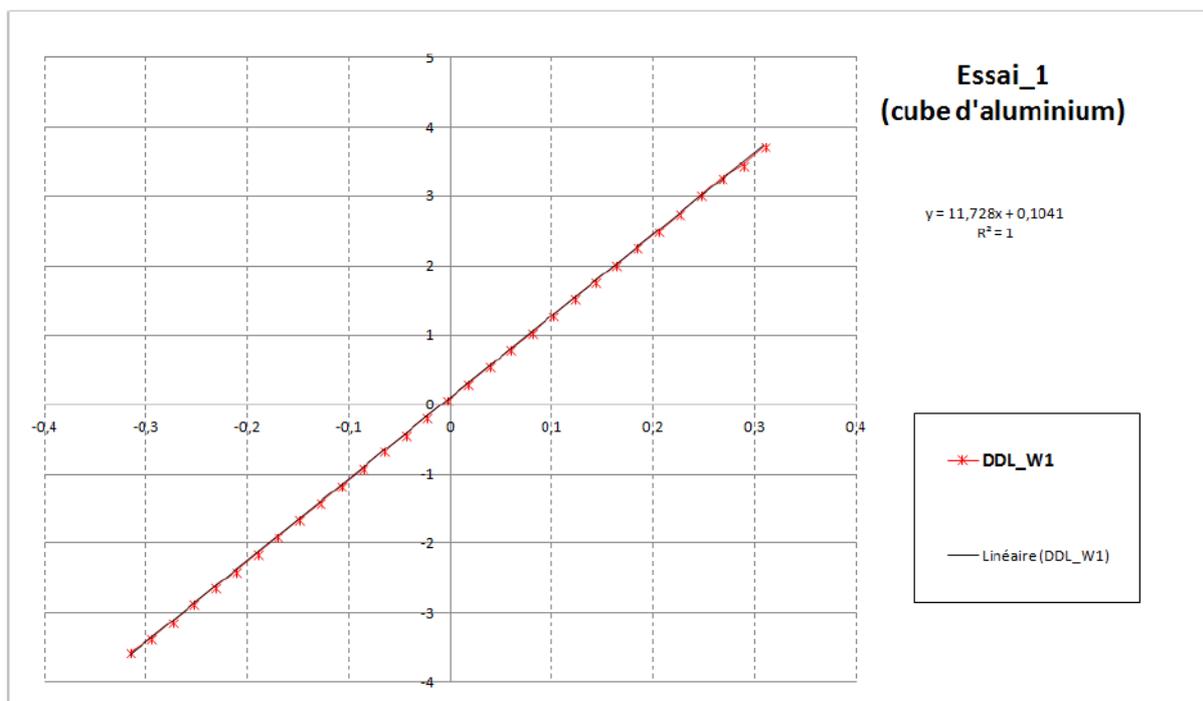


Figure 6.8-11 : Droite d'Henry - Essai_1

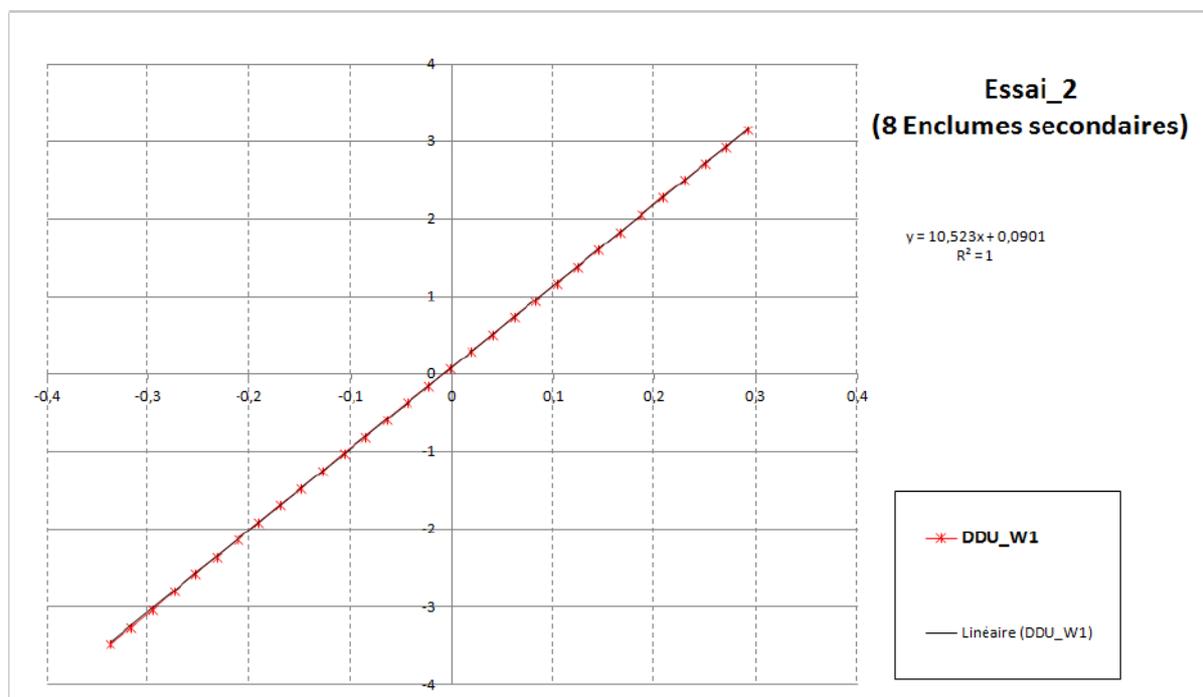


Figure 6.8-12 : Droite d'Henry – Essai_2

Sur chacun de ces graphes figure l'équation de la droite de régression linéaire passant au plus près des points. Le coefficient de détermination associé égal à 1, confirme l'alignement des points et de fait, la distribution gaussienne de l'amplitude du signal σ_0 . **Le signal σ_0 est aléatoire et gaussien.**

La segmentation de σ_0 permettra d'obtenir des tranches de signal décorréelées si leur durée est supérieure à τ_c mais également indépendante (sans échange d'énergie) du fait de la nature gaussienne de σ_0 .

6.8.8 Estimation des grandeurs spectrales du signal σ_0

Nous avons montré que le signal σ_0 est aléatoire, gaussien, et stationnaire d'ordre 2. Nous allons par cette analyse tenter de déterminer les propriétés énergétiques dans le domaine fréquentiel au moyen de deux techniques différentes détaillées au chapitre 5 paragraphes 5.13 et 5.14:

- Le Corrélogramme.
- Le Périodogramme Moyenné.

6.8.8.1 Corrélogramme

Le Corrélogramme est un estimateur de Spectre de Puissance. La fenêtre d'apodisation $h(k)$ est une fenêtre rectangulaire d'amplitude 1. Sa largeur est égale à la durée d'observation de 100 s que nous nous sommes fixée. Le facteur de calibration Ac est égal à :

$$Ac = \frac{1}{1 \times H(0)} = 1 \quad (6.8-7)$$

Les spectres de puissance obtenus par cette technique figurent ci- après.

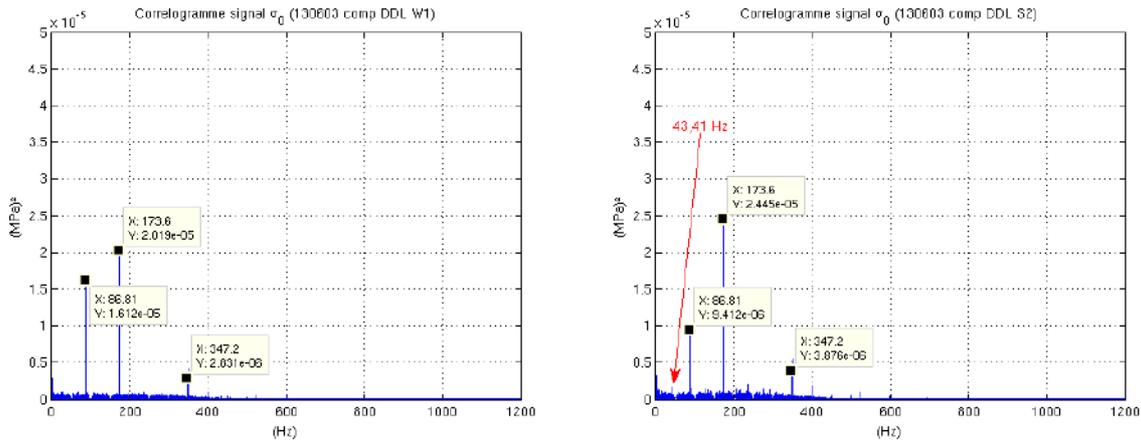


Figure 6.8-13 : Corrélogramme du signal σ_0 – Essai_1

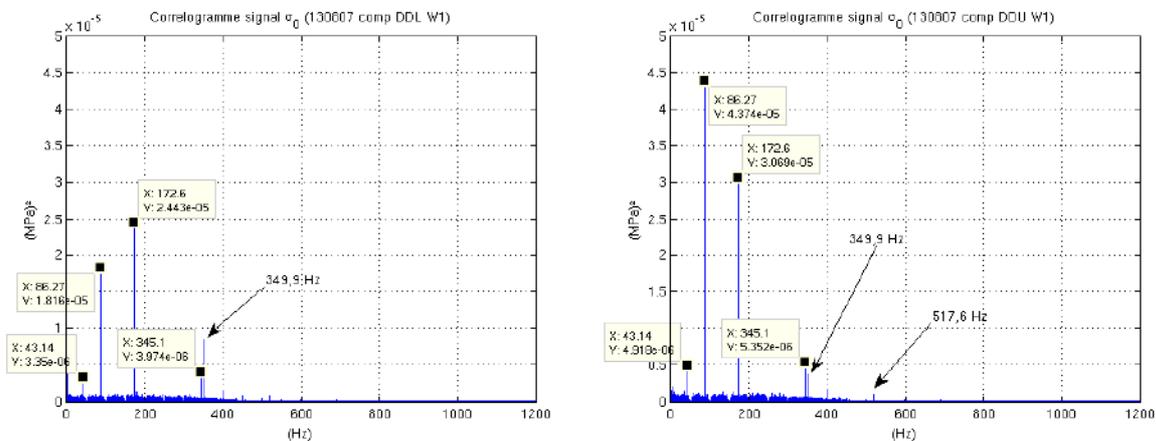


Figure 6.8-14 : Corrélogramme du signal σ_0 - Essai_2

Les deux spectres de puissance des signaux, acquis lors de deux essais différents et provenant de deux rosettes placés en des endroits différents sur l'outil D-DIA, présentent des raies spectrales communes, des profils assez semblables et 3 raies remarquables :

- ≈ 86 Hz
- ≈ 174 Hz
- ≈ 344 Hz

Des sous harmoniques et harmoniques peuvent plus ou moins être distinguées.

6.8.8.2 Périodogramme moyenné

Autre estimateur du Spectre de Puissance, le Périodogramme consiste, rappelons-le, à :

- Segmenter le signal au moyen d'une fenêtre glissante $h(n)$, en L blocs.
- Calculer le spectre de puissance de chaque bloc.
- Faire la moyenne des spectres obtenus.

Nous avons conservé la segmentation utilisée précédemment avec des segments de longueur $M = 1024$ échantillons et sans chevauchement, soit $P = 0$. Sur une durée d'observation de 100 s minorée de 4,7225 s, correspondant à la suppression des zones d'amorçage des filtres utilisés, et avec une cadence d'échantillonnage de 2400 Hz, cela représente un nombre de segment L :

$$L = (100 - 4,7225) \times \frac{2400}{1024} \approx 223,3 \quad (6.8-8)$$

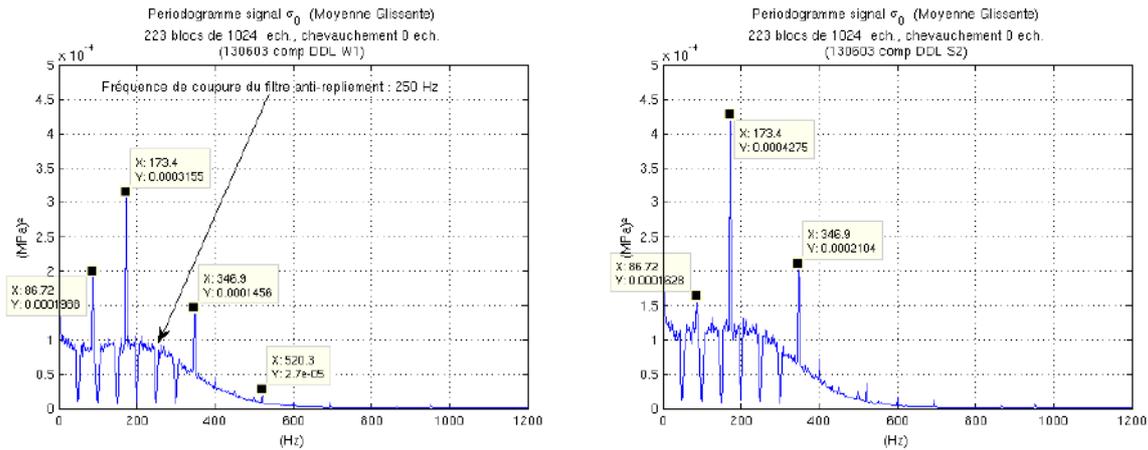
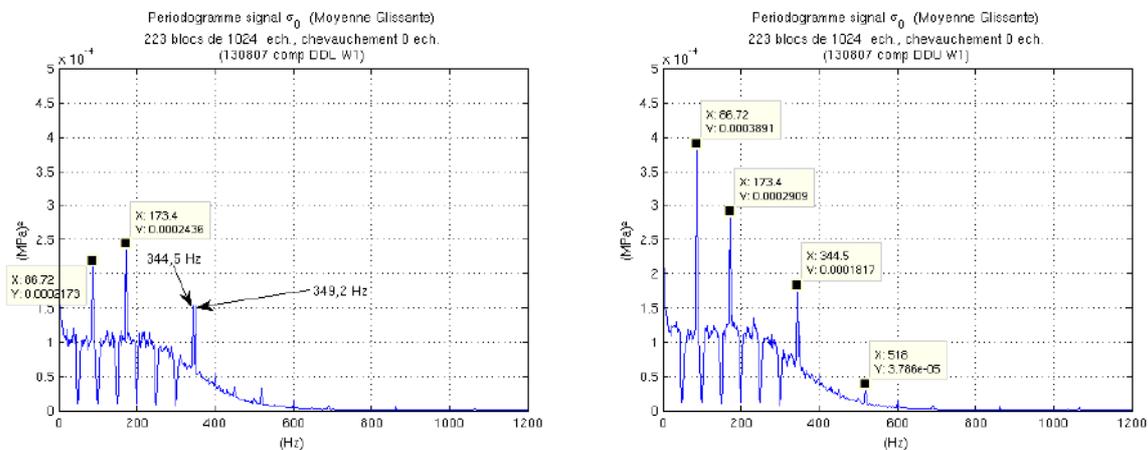
Nous nous sommes assurés de faire en sorte que soit pris en compte le nombre entier directement inférieur, soit 223 blocs. La valeur de $M = 1024 = 2^{10}$ est adaptée au algorithme de calcul de TFD.

Nous avons choisi une fenêtre rectangulaire de largeur $M.T_e$ égale à 0,5 s. Une fenêtre différente pourrait être employée pour minimiser les effets de bord.

Rappelons que la constante de calibration A_p est définie par :

$$A_p = \frac{1}{\theta^2 \sum_{n=0}^{M-1} |h(n)|^2} = \frac{1}{\frac{1}{M^2} \times M^2} = 1 \quad (6.8-9)$$

Les résultats ci-après présentent les Spectres de Puissance obtenus.

Figure 6.8-15 : Périodogramme moyenné du signal σ_0 - Essai_1Figure 6.8-16 : Périodogramme moyenné du signal σ_0 - Essai_2

Nous pouvons identifier sur le profil des spectres obtenus, l'effet du filtrage anti-repliement configuré pour une fréquence de coupure de 250 Hz et se traduisant par une décroissance régulière de la valeur moyenne de l'énergie fréquentielle au delà de cette fréquence.

L'une des caractéristiques du Périodogramme est de présenter une résolution fréquentielle moindre que celle offerte par le Corrélogramme. Toutefois, les raies identifiées au moyen du Corrélogramme restent parfaitement identifiables.

Conclusion :

Ceci permettrait l'utilisation du Périodogramme reposant sur la segmentation du signal pertinente pour une utilisation a posteriori en temps réel. Nous pourrions alors réaliser une surveillance du contenu fréquentiel de σ_0 . En effet, une évolution soudaine de ce spectre pourrait

traduire un dysfonctionnement de la presse. A contrario, une lente dérive du contenu spectral de σ_0 pourrait avoir pour origine un phénomène de fatigue.

6.9 Analyse des événements brefs

Comme nous l'avons vu en première analyse visuelle, les signaux de déformation 'a', 'b', 'c', issus des grilles des rosettes peuvent présenter des événements brefs que nous retrouvons sur les signaux ε , σ , et non systématiquement sur le signal ϕ . Nous présentons ci-dessous un exemple de tels événements pour chaque essai ayant eu lieu durant la phase de compression.

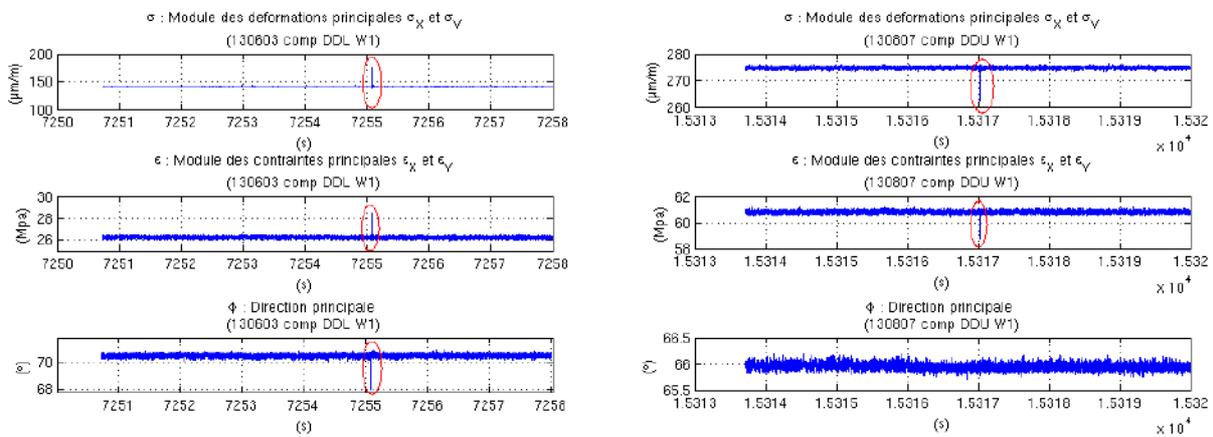


Figure 6.9-1 : Événements brefs présents sur les signaux ε , σ et ϕ – Essai_1 et 2

Leur survenue peuvent donner lieu à l'apparition de pic positif ou négatif sur les signaux ε et σ .

Il est à noter que, dans le cas de l'Essai_2, aucun événement analogue à celui présenté ci-dessus sur la rosette DDU_W1 positionnée sur la partie supérieure de l'outil, n'est décelable sur la rosette DDL_W1 située en face et fixée sur la partie inférieure de l'outil.

Ce type d'événements est éliminé du signal σ_{td} , car celui-ci est obtenu par calcul d'une moyenne glissante sur σ , réalisant ainsi un filtrage passe-bas.

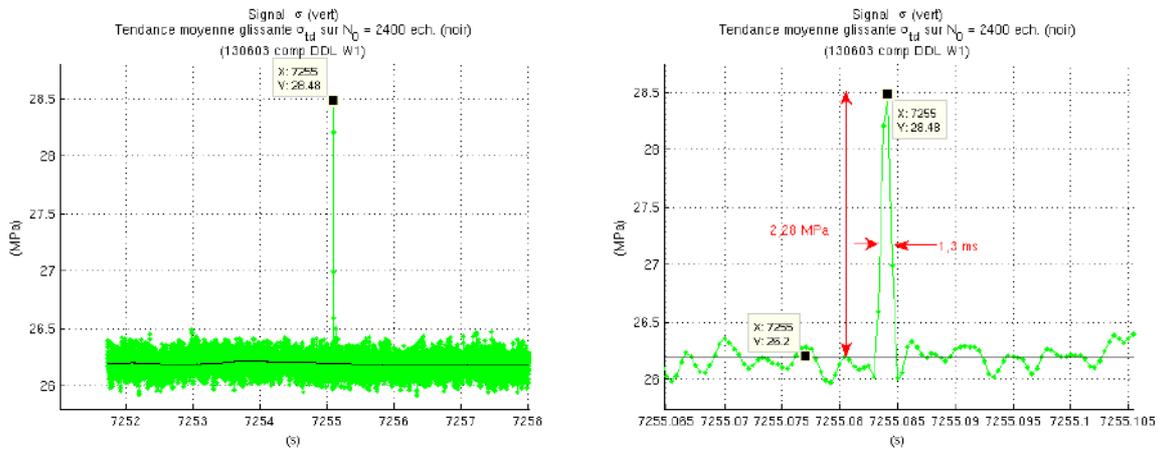


Figure 6.9-2 : Evénement bref présents sur le signal σ – Essai_1

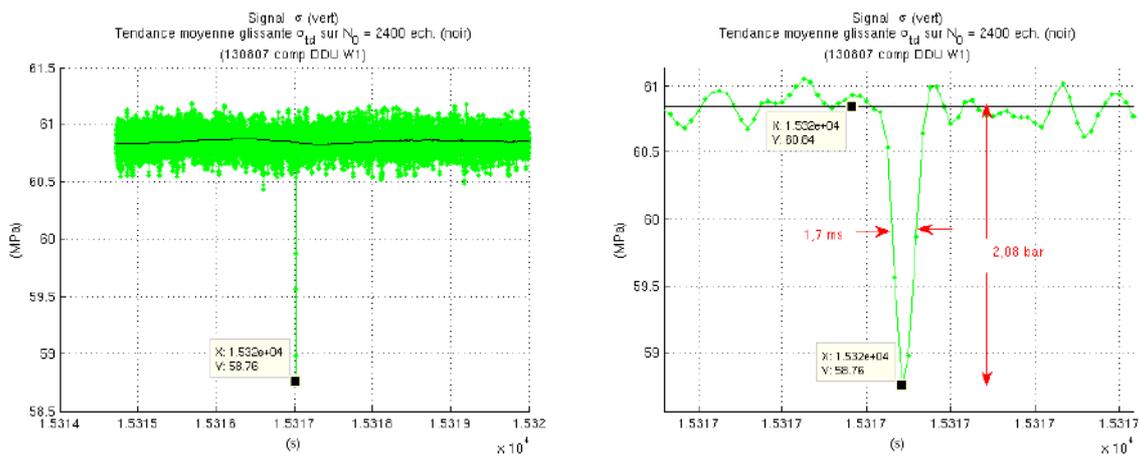


Figure 6.9-3 : Evénement bref présents sur le signal σ_0 – Essai_2

Nous trouvons sur les tracés de σ_0 , les caractéristiques d'amplitude et de durée à la demi amplitude. La durée totale de ces deux événements est de 5 à 6 échantillons soit environ $2,5 \text{ ms}$ ($F_e = 2400 \text{ Hz}$). Il est à noter que du fait de la bande passante du système conditionneur-amplificateur de 1 kHz (-1 dB) et du filtrage anti-repliement ($f_c = 250 \text{ Hz}$) ces transitoires peuvent présenter une amplitude plus élevée.

Nous retrouvons ces événements brefs sur le signal σ_0 :

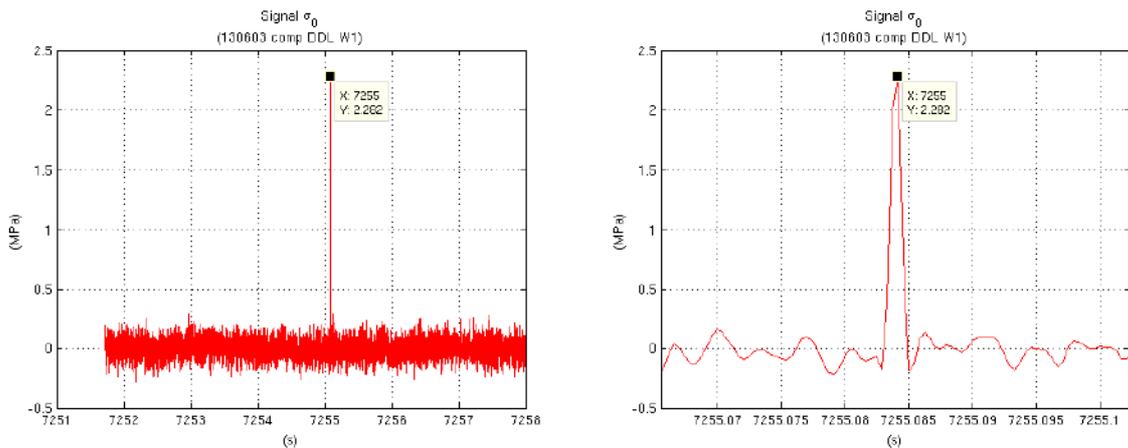


Figure 6.9-4 : Événement bref présents sur le signal σ_0 – Essai_1

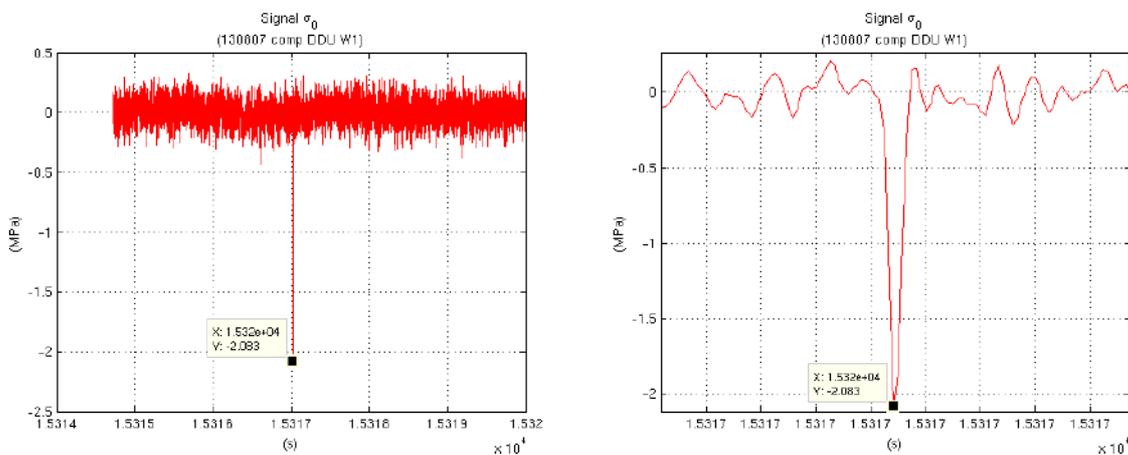


Figure 6.9-5 : Événement bref présent sur le signal σ_0 – Essai_2

Nous avons rendu le signal σ_0 stationnaire sur une durée d'observation de 100 s ne comportant aucun événement transitoire ou phénomène de friction. Procédons à la segmentation du signal et examinons son comportement lors de la survenue d'événements brefs. Les moyennes des blocs ne sont pas affectées par la survenue d'un transitoire en fin de phase de compression car leur amplitude, de l'ordre de 2 MPa et surtout leur durée de 6 échantillons, ne sauraient modifier la valeur moyenne d'un segment de signal de 1024 échantillons. La stationnarité d'ordre 1 est donc conservée. Cela ne serait plus le cas si cet événement survenait au début de la phase de compression, lorsque l'amplitude du pic de 2 MPa n'est plus négligeable devant la contrainte moyenne subie par l'outil.

Cela est illustré ci-après pour un événement survenu 2084 s après le début de la compression et où nous pouvons constater la présence de blocs de moyenne positive supérieure en nombre par rapport aux blocs de moyenne négative.

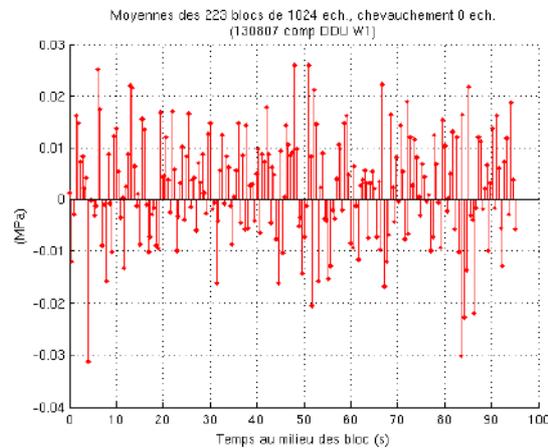


Figure 6.9-6 : Perte de stationnarité d'ordre 1 lors d'un événement bref en début de compression _Essai_2

La perte de stationnarité d'ordre 1 se déduit de la répartition non uniforme de part et d'autre de zéro des moyennes des blocs.

Examinons les écarts types des blocs.

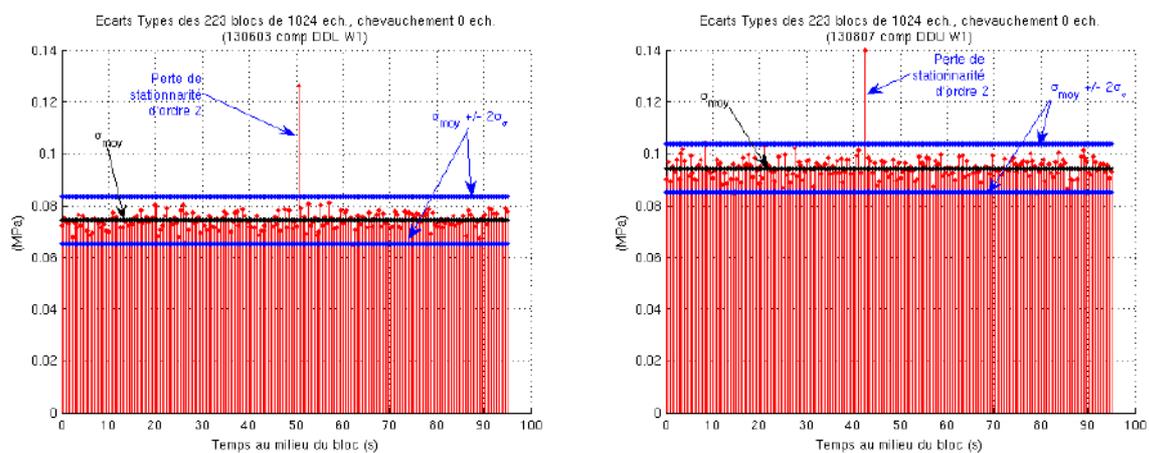


Figure 6.9-7 : Écarts types des segments du signal σ_0 comportant un événement bref – Essai_1 et 2

Ici la perte de stationnarité d'ordre 2 du signal σ_0 en présence d'un événement bref est évidente.

6.9.1 Possibilité de détection

Nous pouvons voir en la perte de stationnarité d'ordre 2 du signal segmenté, **une méthode de détection d'un événement transitoire qui serait utilisable dans le cadre d'une application en temps réel où la segmentation serait mise en œuvre.**

Une autre méthode de détection d'événement bref pouvant être applicable dans ce cadre, est l'utilisation de l'outil financier que sont les courbes de Bollinger. Celles-ci sont utilisées pour réaliser une surveillance du cours d'une action cotée en bourse. Elle repose sur le principe du calcul d'une moyenne glissante associée à un écart type glissant sur un nombre N_{evt} d'échantillons :

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N_{evt}} \sum_{k=0}^{N_{evt}-1} x_{n-k} \quad (6.9-1)$$

$$\sigma_{x_n} = \sqrt{\frac{1}{N_{evt}-1} \sum_{k=0}^{N_{evt}-1} (x_k - \bar{x}_n)^2} \quad (6.9-2)$$

Dans notre cas la valeur de N_{evt} est choisie afin que la moyenne glissante ne filtre pas les événements brefs que nous cherchons à détecter. Elle devrait être inférieure à 6 échantillons, durée des événements. Nous pouvons remarquer que si $N_{evt} = 2$, la moyenne glissante réalise une approximation numérique de la dérivée de σ_0 par rapport au temps. En d'autres termes, nous obtenons la vitesse de variation de σ_0 . Nous avons tracé les courbes de Bollinger pour les deux événements que nous étudions.

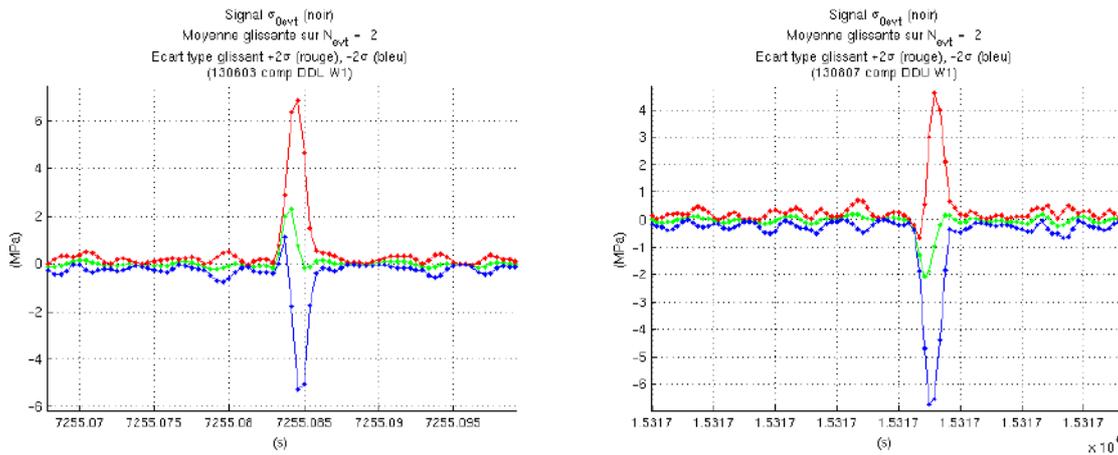


Figure 6.9-8 : Courbes de Bollinger – Essai_1 et 2

Sur ces tracés figurent :

- Le signal σ_{0evt} obtenu à partir du signal σ par soustraction de sa moyenne glissante calculée sur N_{evt} échantillons.
- Les traces de $\sigma_{0evt} \pm 2 \sigma_{xn}$, σ_{xn} étant l'écart type glissant sur N_{evt} échantillons du signal σ_{0evt} .

Nous constatons qu'en l'absence d'événement les deux écarts types sont à peu près constants. Nous pourrions donc définir deux seuils correspondant. Tant que le système, est stable les écarts types σ_{xn} demeureraient à l'intérieur de ces seuils d'alarme.

Si un événement bref survenait, il serait alors détecté dès le premier échantillon car les écarts types σ_{xn} franchiraient ces seuils. De plus, il est important de savoir à quelle vitesse nous nous rapprochons de ces seuil et cela peut être connu, en prenant $N_{evt}=2$ comme c'est le cas ici.

6.9.2 Analyse temps – fréquence d'un événement bref

Celle-ci est réalisée par Spectrogramme au moyen de logiciel (Matlab ®) et nous avons conservé les paramètres par défaut. Le nombre d'échantillons par segment est de 256 (valeur maximale permise par le logiciel) ce qui à une fréquence d'échantillonnage de 2400 Hz, correspond à une durée de 107 ms. La fenêtre d'apodisation est une fenêtre de Hamming. Le chevauchement des segments est de 240 échantillons soit un taux de :

$$\frac{240}{256} \times 100 = 93,75\%$$

Dans ces conditions les Spectrogrammes obtenus figurent ci-dessous :

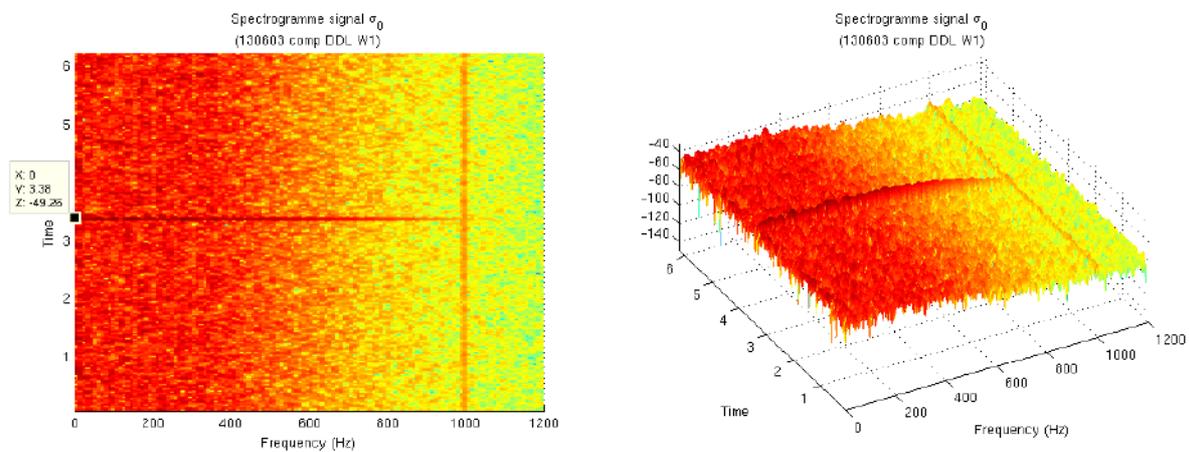


Figure 6.9-9 : Spectrogramme du signal σ_0 en présence d'un événement bref – Essai_1

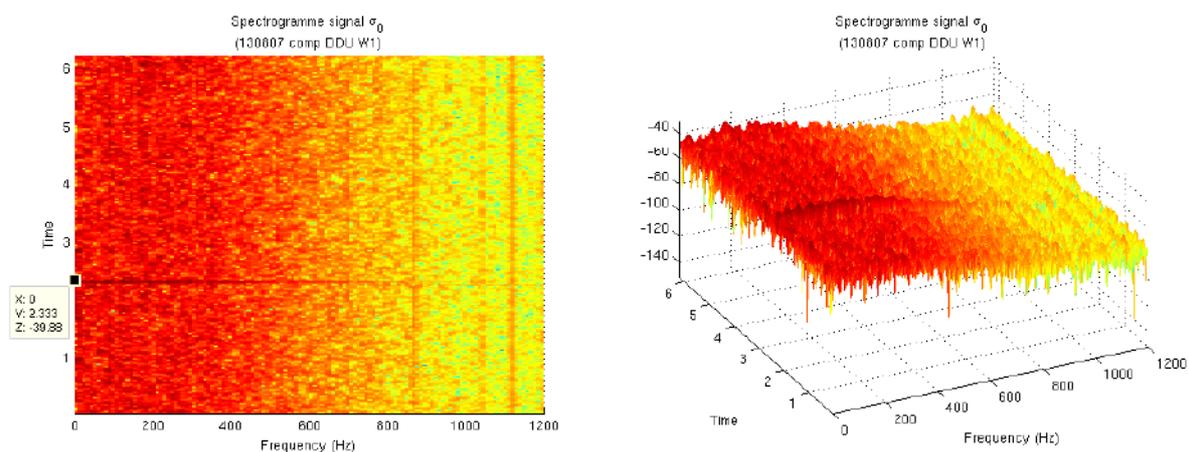


Figure 6.9-10 : Spectrogramme du signal σ_0 en présence d'un événement bref – Essai_2

Les événements sont très clairement identifiables. Ils possèdent une large étendue spectrale comme cela pouvait être prévisible du fait de leur brièveté temporelle.

Sur ces Corrélogrammes sont également visible le profil dû au filtrage anti-repliement et déjà observé sur les Périodogrammes, ainsi que des raies spectrales aux alentours de 1000 Hz, proches de $F_e / 2 = 1200$ Hz, et non révélées par nos précédents traitements.

6.10 Analyse des phénomènes de friction

Observés sur le signal MD de mesure du déplacement vertical de l'outil supérieur sous la pression exercé par le piston principal, nous avons découverts que les phénomènes de friction étaient présents également sur les signaux de déformation issus des grilles des rosettes. Ils sont en effet synchrones au délai près existant entre les deux sources de signal.

Ils sont donc logiquement présent sur le signal σ construit à partir des signaux de déformation 'a', 'b' et 'c', mais aussi sur le signal σ_{td} obtenu par moyenne glissante sur σ . Le filtrage passe-bas réalisé par la moyenne glissante présente une fréquence de coupure proportionnelle à N_0 . Or ici $N_0 = 2400$ échantillons et correspond à une durée de 1 s. Or les phénomènes de friction sont présentent une durée de plusieurs dizaines de secondes et ne sont donc pas effacés par ce filtrage.

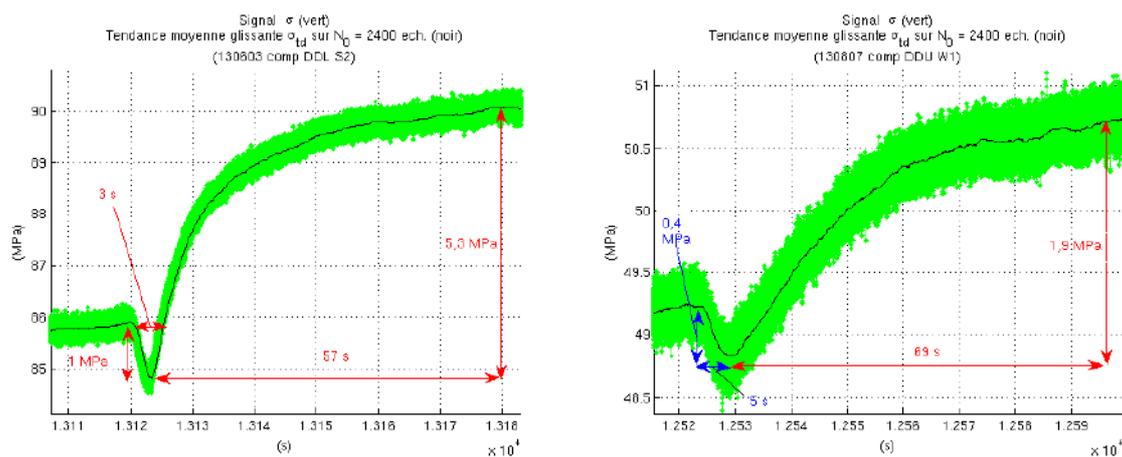


Figure 6.10-1 : Phénomènes de friction sur les signaux σ et σ_{td} – Essai_1 et 2

Sur les graphes ci-dessus présentant les signaux σ et σ_{td} lors de phénomènes de friction sont également indiquées leurs caractéristiques :

- Durée : ≈ 60 à 70 s
- Amplitude : ≈ 2 à 5 MPa
- Relaxe de friction : ≈ 3 à 5 s

Le phénomène de friction statique peut se résumer en deux phases :

- La force exercée sur un objet est inférieure à la force de friction exercée sur cet objet par le support sur lequel il repose : L'objet demeure immobile.

- La force exercée devient supérieure à la force de friction : L'objet est mis en mouvement.

Nous pouvons observer deux phases sur les signaux présentés ci-dessus :

- Une première phase dite de relâche de friction, durant laquelle la valeur de la contrainte chute car les forces de friction ne sont plus assez fortes pour empêcher le mouvement de l'outil.
- Une deuxième phase où l'outil se trouve à nouveau immobilisé. Le piston peut de nouveau exercer sa contrainte sur l'outil.

Nous pouvons mettre en regard les valeurs de contrainte déterminées et la course du piston que nous avons observé, lors l'étude de ces mêmes phénomènes sur le signal MD.

- Essai_1 : Course du piston : 9,2 μm Amplitude du saut de contrainte : 5,3 MPa.
- Essai_2 : Course du piston : 4,0 μm Amplitude du saut de contrainte : 1,9 MPa.

Sur les tracés suivants sont représentées les moyennes des blocs obtenus après segmentation des signaux σ_0 . La perte de stationnarité à l'ordre 1 est évidente.

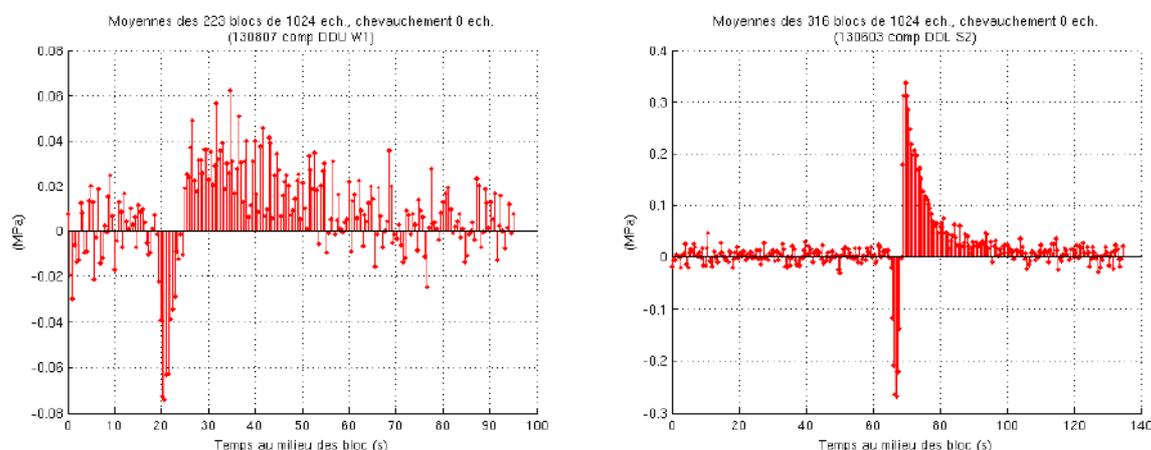


Figure 6.10-2 Perte de stationnarité d'ordre 1 lors de phénomène de friction - Essai_1 et 2

6.11 Etude des signaux issus des jauges disposées sur les Piliers

Il s'agit des signaux de déformation recueillis lors de l'Essai_3 (Tableau 5.2-1). L'objet soumis à compression est un cube d'aluminium. Nous présentons sur la page suivante l'intégralité des signaux de déformation issus des jauges de contrainte disposées sur les quatre piliers de la presse LVP.

Les positions des jauges figurent dans le rapport d'installation de la société HBM, annexe I.

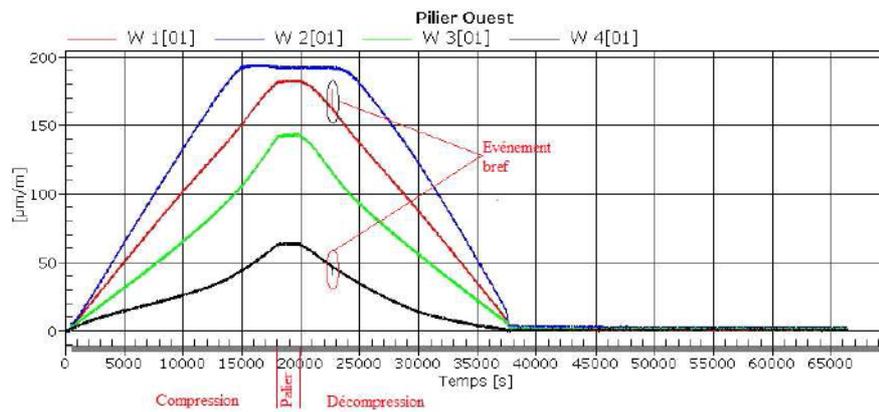


Figure 6.11-1 : Signaux jauges Pilier W - Essai_3

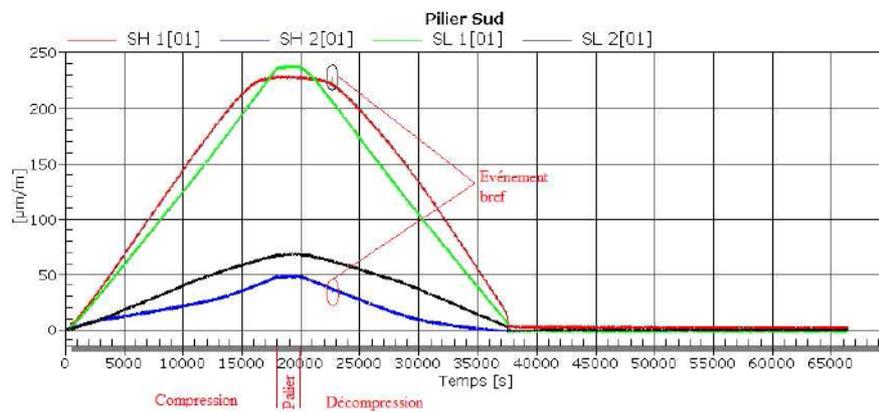


Figure 6.11-2 : Signaux jauges Pilier S - Essai_3

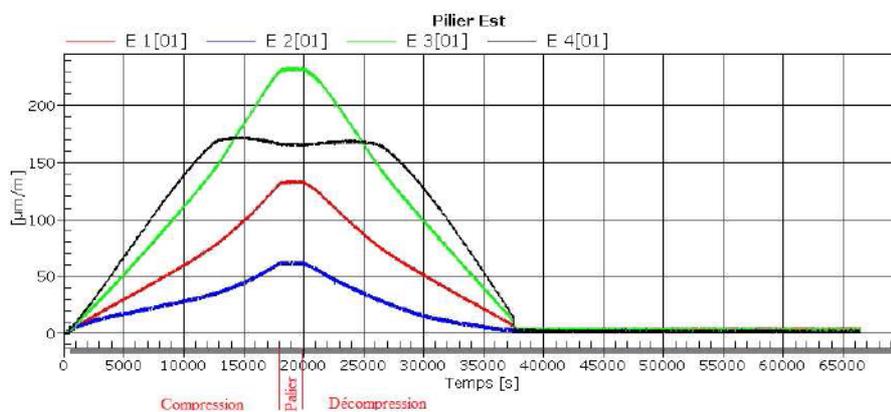


Figure 6.11-3 : Signaux jauges Pilier E - Essai_3

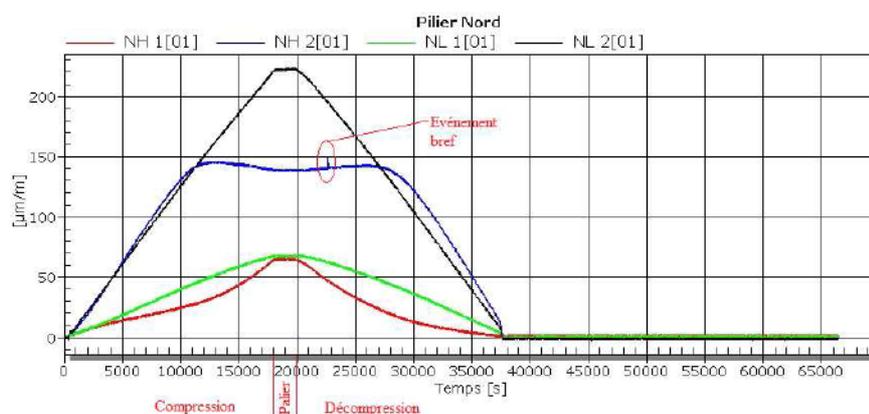


Figure 6.11-4 : Signaux jauges Pilier N - Essai_3

Chacune de ces courbes correspond aux déformations longitudinales des piliers aux points de fixation des jauges. La disposition des jauges sur les piliers a été réalisée de sorte que les jauges fixées en haut des piliers voient des déformations positives lorsque celles-ci sont dirigées vers le haut et, réciproquement, les jauges fixées en bas des piliers voient des déformations positives lorsqu'elles sont dirigées vers le bas.

Réalisons une première analyse visuelle de ces courbes :

- Nous pouvons immédiatement constater que toutes les déformations sont toutes positives.
- Nous pouvons également noter que les valeurs maximales des déformations enregistrées sur certaines jauges (W2, E4, NH2) n'apparaissent pas durant la phase de palier mais avant et après celle-ci.

6.11.1 Rapprochement des signaux de déformation au signal MP

Le signal de pression hydraulique, MP, correspondant à l'Essai_3, est présenté ci-dessous.

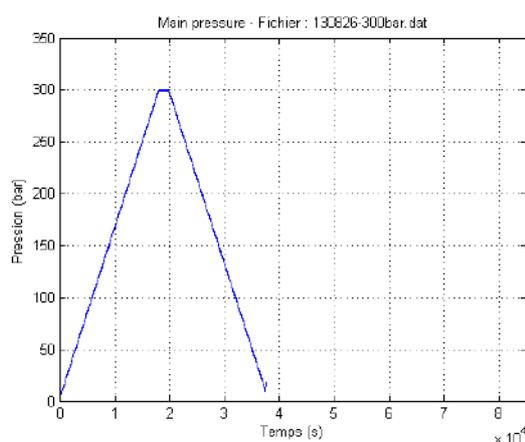


Figure 6.11-5 : Signal de pression hydraulique MP – Essai_3

Nous avons repérés sur les graphiques des signaux de déformation (Figure 6.11-1 à Figure 6.11-4), les trois phases d'essai décrites au chapitre 5 :

- Compression : Durée 5 h (18000 s), temps nécessaire pour atteindre une pression hydraulique de 300 bar à un taux de 1 bar /minute.
- Palier : Durée 30 min.
- Décompression : Débutant à l'instant 19795 s et d'une durée 5h à un taux de 1 bar / min.

6.11.2 Rapprochement des signaux de déformation au signal MD

Le signal de déplacement de la partie supérieure de l'outil sous la poussée du piston principal durant l'Essai_3 figure ci-dessous :

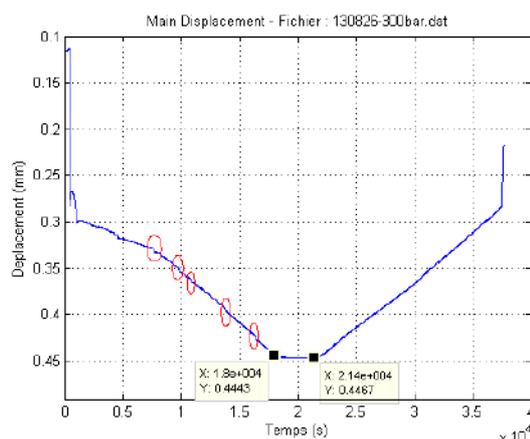


Figure 6.11-6 : Signal de déplacement du piston principal MD – Essai_3

Les courbes de déformation présentent des profils semblables au signal MD. Nous avons repéré sur le tracé de MD, des phénomènes de friction. Ceux-ci ne se retrouvent pas sur les signaux de déformation issus des jauge de contrainte fixées sur les piliers. Nous pouvons remarquer que le piston ne remonte pas immédiatement après la fin du palier, à l'instant 19795 s, mais environ à l'instant 21400 s soit près de 27 minutes plus tard

6.11.3 Remarques sur l'évolution des signaux de déformation

Comme dans le cas des signaux de déformation issus des rosettes situées sur l'outil D-DIA, aucune pilier ne présente, à équipement de jauges identiques, les mêmes valeurs maximales de déformation ni les mêmes profils. Cela peut laisser pressentir que les piliers ne se comportent pas de manière identique.

6.11.4 Observation d'événements brefs

Sur cet essai nous avons repéré un événement bref en début de décompression. Durant la phase de compression et en début de phase de décompression. Il ne présente pas la même amplitude sur tous les signaux et peut même absent sur certains.

C'est ainsi sur le signal W1 (Figure 6.11-1) que cet événement présente la plus forte amplitude. Nous avons réalisé un agrandissement de ce signal présenté ci-après :

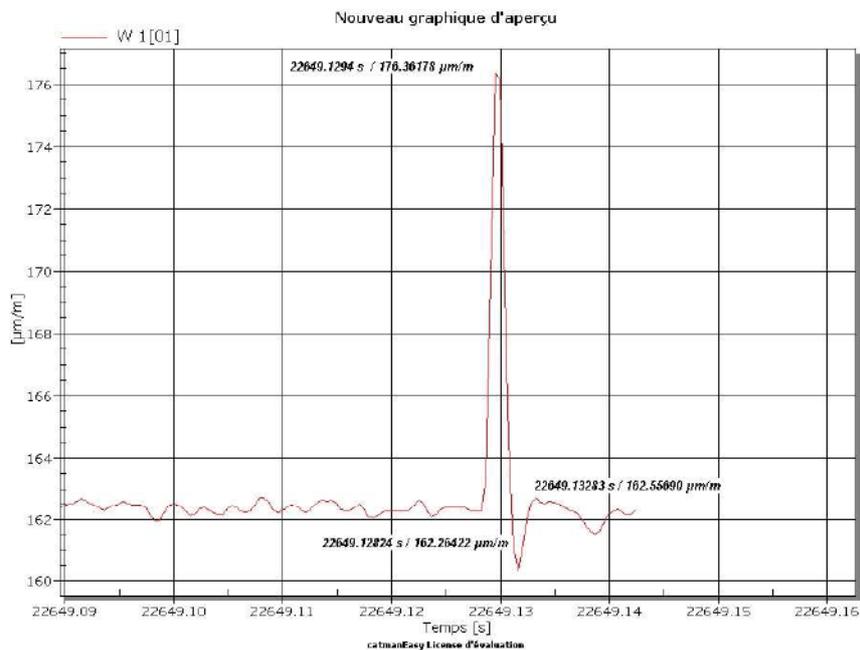


Figure 6.11-7 : Événement bref sur jauge 1 du pilier ouest (W1) – Essai_1

Nous pouvons déduire, d'après ce graphe, les valeurs caractéristiques de cet événement :

- Amplitude : 14 µm / m
- Durée : 4,6 ms

S'agissant de jauge de contrainte, les déformations mesurées sont les déformations selon l'axe longitudinal de des grilles de mesure. Contrairement aux signaux de déformation issus des rosettes disposées sur l'outil, aucune transformation mathématique n'est nécessaire. Elles sont directement exploitables. Etant fixées sur les piliers selon une direction verticale nous les noterons ε_z .

La contrainte correspondante, σ_z , est obtenue tout aussi directement par la loi de Hooke.

$$\sigma_z = E \varepsilon_z \quad (6.11-1)$$

Avec :

- $E = 210 \text{ GPa}$

La valeur crête de cet événement correspond à une contrainte de :

$$\sigma_z = E\varepsilon_z = 210.10^9 \times 14.10^{-6} = 2,94 \text{ MPa} \quad (6.11-2)$$

Ces caractéristiques ainsi que la forme de ce transitoire ressemblent à ceux déterminés lors de notre étude des événements brefs présents sur les signaux issus des rosettes disposées sur l'outil.

6.12 Détermination des déformations et des contraintes

Comme lors de l'étude des signaux de déformation issus des rosettes, nous avons réalisé un état des déformations et des contraintes en quatre instants uniformément au cours de la phase de compression :

- 4500 s (25%)
- 9000 s (50%)
- 13500 s (75%)
- 17990 s (100%)

Les valeurs et leur écart type sont donnés dans le tableau ci-après. Ces valeurs ont été obtenues par le calcul de moyennes sur $\pm 0,5 \text{ s}$ autour des instants déterminés ci-dessus. Afin de ne pas être biaisés, les écarts types de contrainte et de déformation sont calculés sur les signaux rendus stationnaires au moyen des mêmes traitements que ceux appliqués aux signaux issus des rosettes.

ESSAI_3	t (s)	4500		9000		13500		18990	
	MP (bar)	77,6		151,9		225,7		299,7	
Pilier W1	ε ($\mu\text{m/m}$)	44,7	0,20	91,3	0,21	135,3	0,21	181,1	0,21
	σ (Mpa)	9,4	0,05	19,2	0,04	28,4	0,04	38,0	0,04
Pilier W2	ε ($\mu\text{m/m}$)	56,9	0,24	119,2	0,24	178,2	0,24	192,6	0,23
	σ (Mpa)	12,0	0,05	25	0,05	37,4	0,05	40,4	0,05
Pilier W3	ε ($\mu\text{m/m}$)	28,0	0,22	57,8	0,23	92,2	0,22	140,9	0,22
	σ (Mpa)	5,9	0,05	12,1	0,05	19,4	0,05	29,6	0,05
Pilier W4	ε ($\mu\text{m/m}$)	13,3	0,20	23,5	0,19	36,7	0,20	62,7	0,19
	σ (Mpa)	2,8	0,04	4,9	0,04	7,7	0,04	13,2	0,04
Pilier SH1	ε ($\mu\text{m/m}$)	59,8	0,23	128,8	0,05	194,4	0,23	227,9	0,23
	σ (Mpa)	12,5	0,05	27	0,24	40,8	0,05	47,9	0,05
Pilier SH2	ε ($\mu\text{m/m}$)	11,3	0,29	19,6	0,31	29,9	0,29	48,0	0,31
	σ (Mpa)	2,4	0,06	4,1	0,07	6,3	0,06	10,1	0,06
Pilier SL1	ε ($\mu\text{m/m}$)	51,8	0,30	111,2	0,35	172,7	0,34	235,7	0,30
	σ (Mpa)	10,9	0,06	23,3	0,07	36,3	0,07	49,5	0,06
Pilier SL2	ε ($\mu\text{m/m}$)	15,4	0,24	35,4	0,25	53,8	0,24	67,2	0,27
	σ (Mpa)	3,2	0,05	7,4	0,05	11,3	0,05	14,1	0,06
Pilier E1	ε ($\mu\text{m/m}$)	26,6	0,32	53,2	0,33	84,4	0,32	131,0	0,33
	σ (Mpa)	5,6	0,07	11,2	0,07	17,7	0,07	27,5	0,07
Pilier E2	ε ($\mu\text{m/m}$)	15,8	0,51	25,8	0,49	37,8	0,49	61,4	0,50
	σ (Mpa)	3,3	0,11	5,4	0,1	7,9	0,10	12,9	0,11
Pilier E3	ε ($\mu\text{m/m}$)	45,4	0,49	98,3	0,49	158,0	0,48	230,0	0,51
	σ (Mpa)	9,5	0,10	20,7	0,1	33,2	0,10	48,3	0,11
Pilier E4	ε ($\mu\text{m/m}$)	59,0	0,32	124,9	0,31	170,5	0,33	166,2	0,33
	σ (Mpa)	12,4	0,07	26,2	0,07	35,8	0,07	34,9	0,07
Pilier NH1	ε ($\mu\text{m/m}$)	13,0	0,21	22,4	0,20	35,9	0,21	64,3	0,21
	σ (Mpa)	2,7	0,04	4,7	0,04	7,5	0,04	13,5	0,04
Pilier NH2	ε ($\mu\text{m/m}$)	54,7	0,22	118,9	0,22	145,2	0,24	138,8	0,22
	σ (Mpa)	11,5	0,05	25,0	0,05	30,5	0,05	29,2	0,05
Pilier NL1	ε ($\mu\text{m/m}$)	16,5	0,22	35,7	0,20	53,6	0,22	67,5	0,21
	σ (Mpa)	3,5	0,05	7,5	0,04	11,3	0,05	14,2	0,04
Pilier NL2	ε ($\mu\text{m/m}$)	53,8	0,21	112,6	0,21	168,4	0,22	221,1	0,20
	σ (Mpa)	11,3	0,04	23,6	0,05	35,4	0,05	46,4	0,04

Tableau 6.12-1 : Etats des signaux ε et σ au cours de la compression - Essai_3

A partir des valeurs des modules de contrainte et de déformation, nous avons tracé les caractéristiques contrainte-pression hydraulique (signal MP) pour chaque pilier et pour chaque jauge de contrainte.

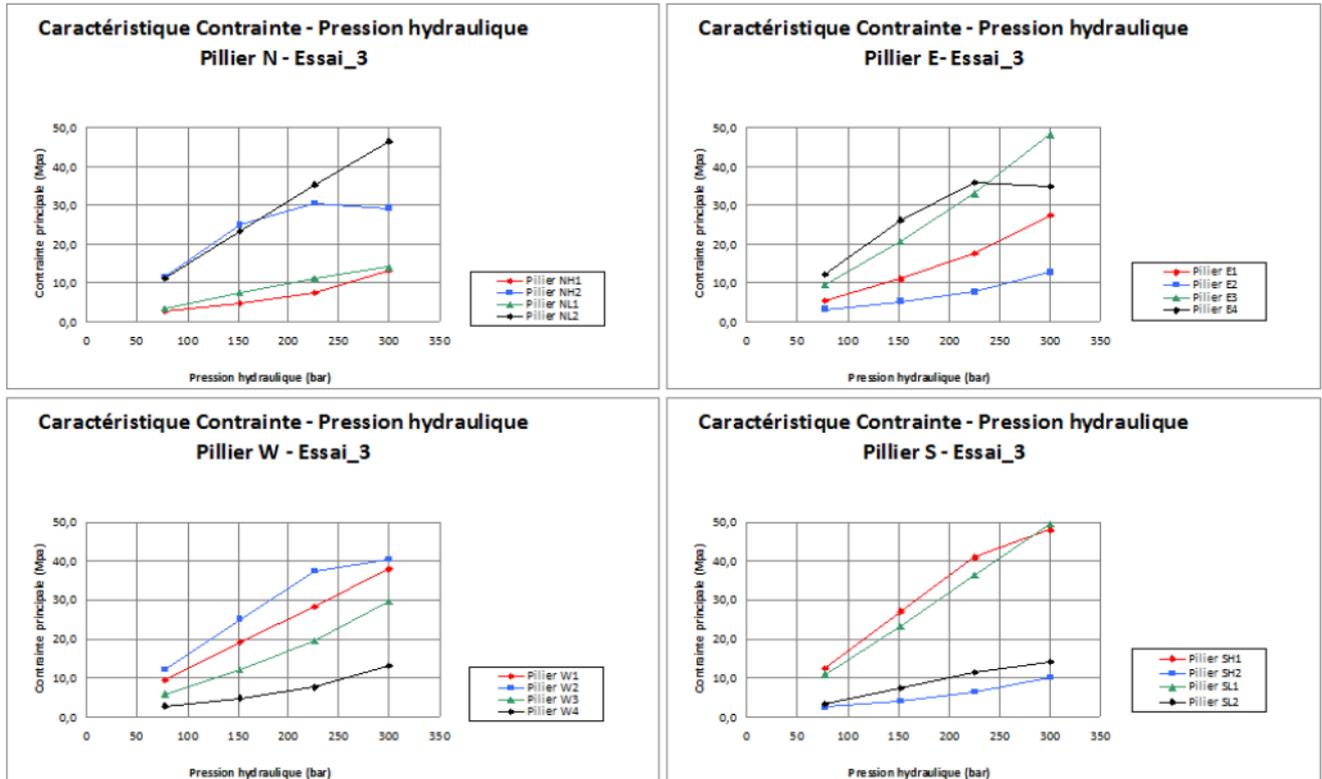


Figure 6.12-1 : Caractéristiques contrainte-pression hydraulique Essai_3

Ces courbes nous permettent de suivre l'évolution des contraintes durant la phase de compression. Ainsi nous pouvons voir que :

- Certaines jauges révèlent que les contraintes varient linéairement avec la pression hydraulique et donc la force appliquée sur l'outil de la presse.
- Comme nous l'avons remarqué visuellement au paragraphe 6.11, les jauges E4 et NH2 présentent un maximum avant la fin de la phase de compression. Concernant la jauge W2 ce maximum est probablement apparu entre les deux derniers instants choisis pour tracé ces caractéristiques.

A l'aide des valeurs du Tableau 6.12-1, nous pouvons représenter, en fausses couleurs, la disparité des valeurs de contraintes atteinte en fin de phase de compression en fonction de l'emplacement des jauges sur les piliers.

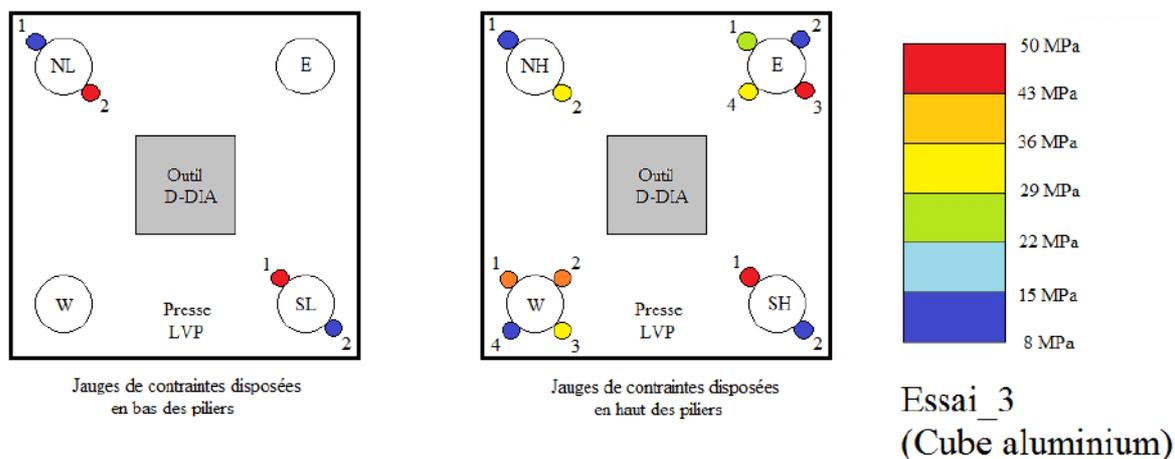


Figure 6.12-2 : Valeurs de contraintes en fin de compression – Essais_3

Nous pouvons faire les observations suivantes :

- Les valeurs sont très différentes d'un pilier à l'autre.
- Les valeurs de contraintes sont maximales sur les génératrices des piliers faisant face au centre de la presse.
- Les valeurs minimales se trouvent sur les génératrices diamétralement opposées.
- Le pilier sud (S) subit les plus fortes contraintes.

Conclusion :

Les jauges W1, W3, E1 et E3 sont soumises à des contraintes complexes qui nous ne seront analysées dans le cadre de cette études.

De toutes ces observations sur les résultats fournis par les jauges comportant un repère 1 ou 2, nous pouvons fournir une hypothèse sur le comportement des piliers durant la phase de compression :

Les piliers subiraient un double phénomène de traction et de flambage.

Traction :

Lors de la compression le piston descend verticalement pour venir appuyer sur l'outil de la presse. Cela entraîne une incurvation, dirigée vers le bas, du centre la table supérieure, ainsi qu'un soulèvement de ses quatre coins. Les parties supérieures des piliers étant fixées aux quatre angles de la table, ils subissent une force de traction dirigée vers le haut tandis que les extrémités inférieures, sont eux soumis à une force de réaction, exercée par le poids de la table inférieure, et dirigée vers le bas.

Les jauges ont été placées de telle sortes que les déformations vues par les jauges, ε_t , dues à cette traction des piliers, soient toutes positives, en partie haute comme en partie basse des piliers.

Flambage :

Le phénomène de flambage est illustré sur la figure ci-après.

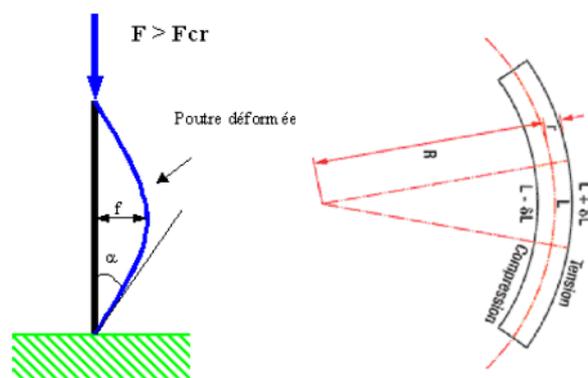


Figure 6.12-3 : Phénomène de flambage et déformations

Dans notre cas, le rayon de courbure serait situé à l'extérieur de la presse sur un axe passant par le centre de la presse et l'axe vertical du piler. Ainsi, l'incurvation des piliers serait dirigée vers le centre de la presse.

Les déformations ε_f dues au flambage seraient alors positives sur les génératrices des piliers faisant face au centre de la presse (1) et négatives sur les génératrices diamétralement opposées (2).

Ainsi en partant de l'hypothèse que $\varepsilon_t > \varepsilon_f$, les jauges situées sur les génératrices (1) verraient la contrainte totale σ_{1z} :

$$\sigma_{1z} = E\varepsilon_{1z} = E(\varepsilon_t + \varepsilon_f) \geq 0 \quad (6.12-1)$$

Les jauges situées sur la génératrice (2) la contrainte totale σ_{2z} :

$$\sigma_{2z} = E\varepsilon_{2z} = E(\varepsilon_t - \varepsilon_f) \geq 0 \quad (6.12-2)$$

Ce phénomène conjugué de traction et de flambage est conforme aux simulations par éléments finis réalisées par Yves Dabin et dont nous donnons, ci-dessous, les résultats obtenus sur un pilier.

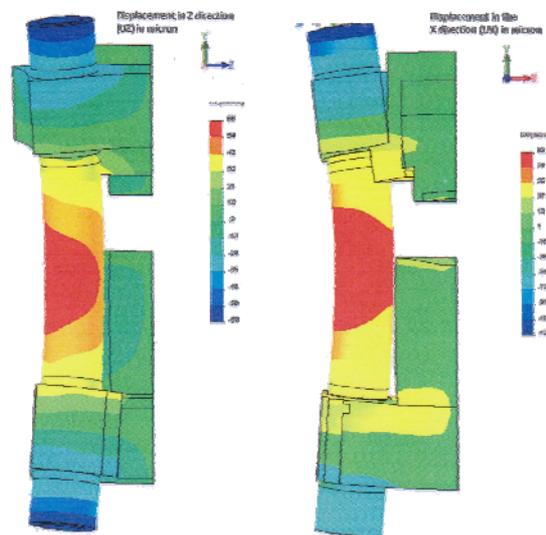


Figure 6.12-4 : Simulation par éléments finis de la déformation d'un pilier

Les disparités des niveaux de contraintes relevées en fin compression sur les piliers suivent la même tendance que les résultats obtenus sur les mesures de contraintes au niveau de l'outil :

Les contraintes les plus élevées sont relevées sur les piliers ouest (W) et sud (S) et sur les rosettes W1 et S2 disposées entre ceux-ci, les piliers nord (N) et est (E) encadrant les rosettes N2 et E1 subissent eux les contraintes les plus faibles.

Ces résultats démontrant que la presse ne possède pas un comportement symétrique.

7 Conclusion

Par l'analyse des signaux fournis par l'automate, cette étude nous a permis de mieux cerner le fonctionnement de la presse LVP. Ainsi l'étude du signal mesure de pression hydraulique du vérin MP commandant la descente du piston principal, nous a appris d'une part que la consigne utilisateur est retranscrite par un signal de pression hydraulique en échelon d'amplitude 0,5 bar et de durée 15 à 18 s. D'autre part, que les corrections de géométrie effectuées par l'utilisateur, modifient cette consigne, générant sur le signal MP des événements d'une dizaine de secondes et d'une amplitude de l'ordre de 2 bar.

Sur le signal MD de mesure de déplacement de l'outil supérieur nous avons observé des phénomènes de frictions.

Par l'étude des signaux de déformation délivrés par l'instrumentation, nous avons pu confirmer que pour une pression hydraulique de 300 bar (864 tf ou 8,6 MN) l'outil demeurerait dans sa zone de déformation élastique.

Nous avons observé comment évoluait la structure de la presse en fonctionnement par l'analyse des déformations des piliers.

Ces résultats ont également révélé que les contraintes ne sont pas distribuées de façon symétrique sur l'outil et les piliers.

Nous avons pu voir que les phénomènes de frictions présents sur le signal MD, se retrouvent sur les signaux de déformation de l'outil.

Enfin, des événements brefs de l'ordre de 4 ms et de 2 MPa ont pu être détectés sur l'outil et les piliers. Lorsqu'ils surviennent, ils ne sont pas distribués uniformément sur la structure de la presse mais apparaissent localisés en certains points de la structure et peuvent être invisibles en d'autres points. Nous avons suggéré une méthode de détection des ces événements transitoires dans le cadre d'une application en temps réel de surveillance de l'état de déformation de la presse.

Les travaux envisageables pour le futur sont nombreux :

Le volume des données nous a empêchés de généraliser nos traitements à tous les capteurs et à tous les tests que nous avons effectués. De même, les tests ont été réalisés à une pression hydraulique maximale de 300 bar. La force développée par le piston est alors de 864 tf soit 43% de la valeur maximale permise de 2000 tf.

Durant nos tests aucun faisceau X ne venait éclairer l'échantillon. Il serait intéressant de vérifier si cela peut venir perturber nos résultats.

Lors de l'un de nos essais, l'échantillon était porté à 1500 °C durant la phase de palier, et des températures atteignant plus de 32 °C, ont été relevées à proximité de certaines des rosettes équipant l'outil. Aucune analyse n'a pu être réalisée, faute de temps, afin de déceler une éventuelle influence sur les mesures de déformation.

La technique de filtrage utilisée pour éliminer les perturbations dues au réseau 50 Hz pourrait être améliorée.

L'augmentation du nombre de voies d'acquisition offrirait la possibilité de détecter la présence d'événements brefs et de vérifier s'ils sont localisés.

La synchronisation des deux sources de signal permettrait le traitement combiné des signaux. Dans le cas d'un traitement temps réel, nous pourrions alors tracer une caractéristique pression hydraulique - contrainte comme nous celles que nous avons obtenues par post traitement.

La réalisation de cette étude m'a demandé d'acquérir des connaissances dans les domaines de la rhéologie et du comportement de matériau afin de pouvoir échanger avec les scientifiques utilisateurs de la presse et de comprendre les phénomènes à l'œuvre lors des essais réalisés sur la presse.

Au niveau personnel, j'ai pu développer mes compétences en traitement de signal et les renforcer par leur mise en pratique consistant en l'écriture de la totalité des codes des traitements réalisés sur les signaux recueillis. Découvrant ainsi les difficultés de passer de la théorie aux réalités physiques.

J'ai également du apprendre à synthétiser les informations provenant de divers interlocuteurs : experts, scientifiques, utilisateurs. Il m'a fallu pour cela, acquérir un minimum de savoir dans leurs domaines de compétences respectifs afin d'exploiter au mieux leurs informations.

Enfin, j'ai appris à développer une certaine rigueur dans l'analyse des résultats d'essai ou d'expérience.

8 Abréviations

CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
D-DIA	<i>Double_DIAMant</i>
DSP	Densité Spectrale de Puissance
ENOB	<i>(Effective Number Of Bit)</i> Résolution effective en bits
FFT	<i>(Fast Fourier Transform)</i> Transformée de fourier rapide
LVDT	<i>(Linear Variable Differential Transformer)</i> Capteur électrique passif inductif de déplacements linéaires
LVP	<i>(Large Volume Press)</i> Presse "grand volume"
RIF	filtre numérique à Réponse Impulsionnelle Finie
RII	filtre numérique à Réponse Impulsionnelle Infinie
SG	<i>(Strain Gauge)</i> jauge de contrainte
SGR	<i>(Strain Gauge Rosette)</i> rosette de jauges de contrainte
SLIT	Système Linéaire Invariant dans le Temps
SNR	<i>(Signal to Noise Ratio)</i> Rapport signal sur bruit
TF	Transformée de Fourier
TFD	Transformée de Fourier Discrète
TFN	Transformée de Fourier Numérique
TL	Transformée de Laplace
TZ	Transformée en z

9 Bibliographie

[1] ASCH G., 1999 (5^e éd.). Les capteurs en instrumentation industrielle. DUNOD, Eds, 833 p.

BASS J., 1977 (5^e éd.). Cours de Mathématiques tome 1, fascicule 1. Masson, Eds, 428p.

BINET G., 2013. Traitement numérique du signal signaux et systèmes discrets. Ellipses, Eds, 252 p.

[2] HOFFMANN K. An introducing to stress analysis and transducer design using strain gauges, www.HBM.com, Eds (19/11/2012), 261 p.

INGEL V. K., PROAKIS J.G., 2000. Digital signal processing using Matlab ®. Brooks / Cole Thomson Learning, Eds, 418 p.

IONA C., MANSOUR A., QINQUIS A., RADOI E., 2007 (2^e éd.). Le traitement de signal sous Matlab ®. Hermes-science / Lavoisier, Eds, 446 p.

LACOUME J.L., MAX J., 1996 (5^e éd.). Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Masson, Eds, (Tome 1), 355 p.

MACOSKO C. W., 1994. Rheology principles, measurements, and applications. Wiley-VCH, Eds, 550 p.

TROADEC J.P., 2004. Principes de conversions analogique-numérique et numérique-analogique. DUNOD, Eds, 216 p.

Etude et réalisation d'une instrumentation en vue de l'analyse du comportement d'une presse haute pression grand volume

Denis Khalifa

Grenoble, le 24 juin 2014

Résumé

....

Afin de reproduire les conditions régnant dans le manteau terrestre, les scientifiques utilisent couramment des presses dites « haute pression grand volume ». Une presse de ce type est utilisée au sein de la ligne de lumière ID06 de l'European Synchrotron Radiation Facility de Grenoble. Celle-ci a été instrumentée en vue de suivre sa déformation en fonctionnement. La chaîne d'acquisition des signaux mise en place est basée sur des jauges de contrainte. Nous avons procédé aux traitements des signaux provenant de cette instrumentation ainsi que de ceux issus de l'automate de gestion de la pression hydraulique des vérins et des déplacements de l'outil. L'analyse de ces signaux nous a permis de constater que la structure demeure dans sa zone de déformation élastique et de mettre en évidence la présence d'événements transitoires.

....

Mots-clés : contrainte, jauge de contrainte, convertisseur sigma-delta, pont de Wheatstone, filtrage numérique, conditionneur, ligne de lumière, presse grand volume.

Abstract

....

In order to reproduce deep-earth conditions corresponding to those found within the earth's mantle, scientists often use so-called "large volume high pressure" presses. One such press is used on the ID06 beamline of the European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble, France. It has been equipped with a control system that monitors deformation of the press during operation. The corresponding data acquisition system is based on strain gauges. The data signals emanating from this instrumentation were processed together with data from the automated control system for tool displacements and hydraulic pressure of actuators. The analysis of these signals showed us that the overall mechanical structure remains within its elastic deformation zone, and highlighted the presence of transient events.

....

Keywords : strain, strain gauge, delta-sigma converter, Wheatstone bridge, digital filtering, conditioner, beamline, large volume press.