

THÈSE

Présentée à

L'Université des Sciences et Technologies de LILLE

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Spécialité

Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Loïc VILAIN



**CONCEPTION ET EVALUATION D'UN SYSTÈME DE
SURVEILLANCE. APPLICATION AU SERRAGE HYDRAULIQUE**

Soutenue le 1er avril 1998 devant la commission d'examen

Président : C. SUEUR Professeur à l'Ecole Centrale de Lille

Rapporteurs : J. RAGOT, Professeur au CRAN de Nancy
J-C. TRIGEASSOU, Professeur à l'ESIP de Poitiers

Examineurs : I.V. NIKIFOROV, Professeur au LMSS de Troyes
M. MALHOMME, Ingénieur à SOLLAC Dunkerque
M. STAROSWIECKI, Professeur à l'EUDIL de Lille
F. KRATZ, Maître de Conférence HdR au CRAN de Nancy
J-P. CASSAR, Professeur à l'IAAL de Lille (directeur de thèse)
B. PETIT, Ingénieur à l'IRSID de Metz (co-directeur de thèse)

REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) sous la direction de Monsieur Jean-Philippe CASSAR, Professeur à l'Institut Agricole et Alimentaire de Lille en collaboration avec Monsieur Bernard PETIT, adjoint technique de l'Institut de Recherche de la Sidérurgie Française à Metz (IRSID - Groupe USINOR). Je tiens à leur témoigner toute ma reconnaissance pour le suivi et l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui ont participé au jury de cette thèse :

Messieurs J. RAGOT, Professeur au CRAN de Nancy et J-C. TRIGEASSOU, Professeur à l'ESIP de Poitiers, pour avoir accepté de participer à des réunions de travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.

Monsieur C. SUEUR Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, qui me fait l'honneur de présider le jury.

Messieurs M. STAROSWIECKI, Professeur à l'EUDIL de Lille, M. MALHOMME, Ingénieur à SOLLAC Dunkerque, F. KRATZ, Maître de Conférence HdR au CRAN de Nancy et I.V. NIKIFOROV, Professeur au LMSS de Troyes, pour l'intérêt qu'ils portent en acceptant de participer au jury.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres de l'équipe ASPIC du LAIL, pour l'entraide et la bonne ambiance de travail qu'ils m'ont apportées, les membres de l'AREMI, du département génie électrique de l'IUT A, les stagiaires de l'EUDIL, ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé et soutenu durant la réalisation de cette thèse.

A Isabelle,

A ma famille,

A mes amis.

<i>Présentation générale</i>	4
Chapitre 1 : Présentation du serrage hydraulique	6
I. Principe du laminage des bandes d'acier à chaud	6
II Le modèle du serrage hydraulique.	10
III Les données disponibles	11
Chapitre 2 : Conception du système de surveillance.	13
I Cahier des charges de la surveillance	13
I.1 Définitions	13
I.2 Instrumentation	14
I.3 Cahier des charges du système de surveillance	16
I.3.1 Objectifs généraux	16
I.3.2 Définition pratique du cahier des charges	17
II Principes de la surveillance	17
Le système de surveillance	17
II.1 La génération des résidus	17
II.2 Procédure de décision	18
III Analyse Structurelle	20
III.1 Théorie de l'analyse structurelle	20
III.1.1 L'analyse structurelle	20
III.1.1.1 Principes généraux de l'analyse structurelle	20
III.1.1.2 Modèle	20
III.1.1.3 Représentation structurelle du modèle	21
III.1.1.4 Analyse de la structure	22
III.1.2 Calcul des résidus	24
III.1.2.1 Introduction d'un modèle analytique	24
III.1.2.2 Contraintes sur les couplages	24
III.1.2.3 Sensibilités des résidus	25
III.2 Application au serrage hydraulique	26
III.2.1 Génération des résidus	26
III.2.1.1 Utilisation du logiciel D3	26
III.2.1.2 Contraintes sur le modèle	26
III.2.2 Analyse structurelle du système	26
III.2.2.1 Analyse des résidus pour l'instrumentation initiale	26
III.2.2.2 Génération des résidus pour l'instrumentation complémentaire.	27
IV Procédure de décision par reconnaissance logique	29
IV.1 Procédure de décision	29
IV.1.1 Evaluation d'un résidu	29
IV.1.2 Signatures de défaillances	30
IV.1.3 Localisation	31
IV.1.4 Structuration des résidus	31
IV.2 Application au serrage hydraulique	31
IV.2.1 Distances entre signatures des défaillances capteurs	31
IV.2.2 Surveillance des paramètres	32
V Conclusion	33
Chapitre 3 : Modèles pour la surveillance du serrage hydraulique	34
I Modèle de la cage du serrage hydraulique	34
I.1 Génération des résidus	34
I.1.1 Calculs des résidus pour l'instrumentation initiale	35
I.1.2. Analyse des résidus	35
I.2 Evolution du modèle cage	36
I.2.1 Principe	36

1.2.2 Identification d'un modèle ARX	38
1.2.1.1 Modèle ARX	38
1.2.1.2 Critère des moindres carrés	39
1.2.1.3 Moindres carrés généralisés	39
1.2.3 Influence d'une constante dans l'identification	40
1.2.4 Passage du continu au discret	41
1.2.5 Filtrages des données	42
I.3 Identification des paramètres du modèle cage du serrage hydraulique	43
I.3.1 Principe	43
I.3.2 Résultats	43
I.3.3 Etude des gains statiques par régression	47
II Modèle des bruits	49
II.1 Test graphique - Droite de HENRY	49
II.2 Calage statistique des résidus	50
II.2.1 Structures des résidus	50
II.2.2 Droites de répartition des statistiques	50
III Modèle et simulation des défaillances	52
IV Cahier des charges	53
IV.1 Objectif	53
IV.2 Principe	53
IV.3 Résultats	55
IV.4 Conclusion	56
Chapitre 4 : Calculs et sensibilités des résidus	58
I Calculs des dérivées	58
I.1 Principe	58
I.2 Calcul numérique des dérivées	58
I.2.1 Dérivée d'Euler	58
I.2.2 Calcul de la dérivée par approximation polynomiale	59
I.2.3 Approximation polynomiale par la méthode des moindres carrés	60
I.2.4 Comparaison des différentes approches	60
II Etudes théoriques des sensibilités aux défaillances	63
II.1 Introduction	63
II.2 Sensibilités structurelles	64
II.3 Sensibilités des systèmes bouclés	65
II.4 Sensibilités statiques	66
II.5 Sensibilités statiques au point de fonctionnement	67
II.6 Sensibilités statiques déduites des non-linéarités	68
II.7 Conclusion	69
III Etude pratique des sensibilités aux défaillances	69
III.1 Principe	69
III.2 Comparaison	70
IV Robustesse	72
V. Conclusion	73
Chapitre 5 : Décision	74
I Algorithmes de décision	74
I.1. Détection d'un saut de moyenne	75
I.1.1. Moyenne connue avant et après rupture.	75
I.1.2 Moyenne inconnue après rupture.	77
I.2 Détection de rupture spectrale	79
I.2.1 Inspection d'une statistique	80
I.2.2 Comparaison de modèles	81
II Applications	83

II.1 Recherche de limites de détection	83
II.1.1 Limites de détection par le test du saut réduit	83
II.1.1.1 Intérêt	83
II.1.1.2 Principe	83
II.1.1.3 Résultats	84
II.1.1.4 Conclusion	88
II.1.2 Limite de détection par le test de Page-Hinkley	88
II.1.2.1 Objectif	88
II.1.2.2 Principe	89
II.1.2.3 Résultats	92
II.1.2.4 Conclusion	95
II.1.3 Comparaison	95
II.1.4 Conclusion	96
II.2 Détection et localisation dans les conditions du cahier des charges	96
II.2.1 Objectif	96
II.2.2 Principe	97
II.2.3 Résultats	97
II.3 Détection de saut de variance pour les défaillances du cahier des charges	102
II.3.1 Test de Fischer	102
II.3.2 Test de Brandt	103
II.4 Conclusion	106
III Localisation	107
III.1 Détection et localisation des sauts de moyennes	107
III.2 Détection et localisation des sauts de moyennes et variances	109
IV Robustesse du système de surveillance	110
IV.1 Performances du système de surveillance en présence des paramètres incertains	110
IV.1.1 Limites de détection par le test du saut réduit.	110
IV.1.2 Limites de détection par le test de Page-Hinkley	112
IV.1.3 Détection et localisation robustes	115
IV.2 Robustesse des tests dans les conditions industrielles	116
IV.2.1 Augmentation de l'amplitude minimale détectable	116
IV.2.2 Augmentation des seuils de détection	118
IV.2.3 Estimation de la moyenne de référence μ_0 .	119
IV.2.4 Conclusion	120
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	124

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

Présentation générale

L'application de la surveillance à un processus industriel devient de plus en plus un sujet d'étude, que ce soit pour des procédés déjà en place ou pour la conception de nouveaux procédés. A ce jour, beaucoup de travaux n'utilisent des données réelles que pour illustrer une théorie sur un point précis. D'autres reprennent un modèle physique et l'utilisent en simulation. Globalement, deux tiers des applications de la surveillance s'appuient sur des simulations [ISER 96]. Peu de travaux en fait font l'étude complète de la surveillance, de la génération d'indicateurs de défaut, à l'implantation industrielle. La raison en est que le passage de la théorie à la pratique nécessite la résolution de problèmes spécifiques qui sont autant d'étapes supplémentaires à la mise en oeuvre. Beaucoup d'hypothèses nécessaires aux méthodes mises en oeuvre s'avèrent difficile à vérifier et la plupart des systèmes sont en réalité non-linéaires, ce qui peut mettre en défaut dans la pratique certaines techniques de surveillance.

Dans le cas du laminage, l'automatisation a entraîné une hausse de la qualité du produit final. Cependant, la productivité est limitée par le taux de disponibilité du système, lié aux défaillances de ce système complexe. L'un des éléments sensibles aux défaillances est le serrage hydraulique, actionneur clef intervenant en fin de chaîne de fabrication. L'implantation de la surveillance en ligne de ce procédé industriel a pour objectif d'augmenter le taux de disponibilité de cet actionneur, de réduire sa durée de dysfonctionnement, et d'améliorer l'efficacité et la pertinence des actions de maintenance prédictive.

Cette thèse, issue d'une coopération entre l'équipe ASPIC (Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes) du LAIL (Laboratoire d'Automatique et Informatique industrielle de Lille) et les membres de la thématique diagnostic de l'IRSID (Institut de Recherche de la Sidérurgie française - Groupe USINOR) traite de la conception et de l'évaluation des performances du système de surveillance du serrage hydraulique. Parmi ces performances, la robustesse aux variations des entrées est évaluée à partir des données réelles en fonctionnement normal. L'évaluation des performances en présence de défaillances passe par la simulation car on ne dispose pas du système physique, et de plus il n'est pas possible de créer les défaillances sur ce procédé industriel.

L'IRSID a développé préalablement un modèle précis d'actionneur du serrage hydraulique d'une cage de laminoir. De nombreux essais sur site ont montré qu'il était bien calé sur la réalité.

Le document se décompose en 5 chapitres suivis d'une conclusion. L'application industrielle étant au coeur de cette thèse, le premier chapitre est consacré à la description du serrage hydraulique et de ses fonctionnalités. Nous présentons les données mises à disposition par l'IRSID, et leurs modes d'acquisition.

Dans le deuxième chapitre, le cahier des charges définit les objectifs initiaux à atteindre par le système de surveillance. Nous rappelons les principes de la surveillance, et présentons la théorie de l'analyse structurelle, méthode retenue pour l'étape de génération des résidus de la conception du système de surveillance du procédé industriel.

Nous introduisons dans le troisième chapitre les différents modèles utilisés pour la surveillance. Pour obtenir un système de surveillance plus robuste, nous avons défini un modèle plus précis de la cage, comportement mécanique du serrage hydraulique. Les paramètres de ce nouveau modèle ont dû être identifiés. L'introduction de bruits adaptés dans

la simulation a permis d'obtenir un comportement du modèle en simulation proche du comportement du procédé sur site. Nous décrivons également le modèle des défaillances utilisées dans le simulateur. Enfin, à l'aide du simulateur calé, le cahier des charges est quantifié numériquement, à partir de l'étude de l'influence des défaillances sur le système.

En étude préliminaire à la détection et localisation des défaillances, nous évaluons les résidus et cherchons à déterminer dans le quatrième chapitre, leurs sensibilités aux défaillances. Le calcul des résidus fait apparaître la dérivation par rapport au temps de signaux mesurés. Le calcul numérique de ces dérivées doit être soigné afin de réduire le bruit numérique. Ensuite, nous détaillons l'étude de la sensibilité de la moyenne des résidus aux défaillances, en tenant compte de la boucle de régulation, des non-linéarités et des divers points de fonctionnement du système. La simulation des défaillances permet d'effectuer une comparaison entre les résultats théoriques et pratiques.

Le cinquième chapitre, a pour objectif l'évaluation sur la base de simulation des performances qui pourront être attendues du système de surveillance. Les procédures de détections de défaillances sont tout d'abord présentées et comparées, puis certaines d'entre elles sont appliquées au serrage hydraulique. Nous cherchons par ces méthodes à quantifier les valeurs des amplitudes de défaillances minimales détectables. Les performances du système de surveillance pour les défaillances définies par le cahier des charges sont ensuite évaluées. Les résultats sont comparés aux résultats théoriques du chapitre 4 et permettent de conclure sur les capacités du système de surveillance à détecter et localiser les défaillances du cahier des charges. Cependant, les imprécisions des paramètres identifiés au chapitre 3, nuisent aux performances du système de surveillance. Aussi, nous réévaluons ces performances en n'utilisant que les indicateurs de défauts suffisamment robustes par rapport à ces paramètres imprécis.

Nous concluons sur l'ensemble de l'étude et présentons les perspectives qu'elle suscite.

Chapitre 1 : Présentation du serrage hydraulique

Dans ce premier chapitre, nous allons rappeler le principe général et les objectifs du laminage. Ensuite, nous décrirons les fonctions du serrage hydraulique. Enfin, nous présenterons le modèle du serrage hydraulique qui servira de référence tout au long de l'étude. Nous détaillerons la fonction de chacune des sous parties du modèle, puis les données fournies par l'IRSID obtenues par l'enregistrement du laminage de plusieurs bandes d'acier à chaud sur le site de SOLLAC - Dunkerque.

1. Principe du laminage des bandes d'acier à chaud

a. Généralités

Le laminage consiste à écraser entre deux cylindres de travail en rotation inverse, une bande de tôle métallique. Le but de cette opération est d'amener la tôle, dans les meilleures conditions de productivité, à une épaisseur constante et la plus proche possible de la consigne, en lui conférant un certain nombre de caractéristiques géométriques (profils travers, formes d'extrémités,...) et métallurgiques, variables selon l'utilisation ultérieure chez le client.

b. Présentation du train à bandes de Sollac-Dunkerque (figure I.1)

D'une longueur de 541 mètres, le train de Sollac-Dunkerque dont la production annuelle est d'environ 4.5 millions de tonnes, est divisé en quatre secteurs ayant chacun leur fonction propre :

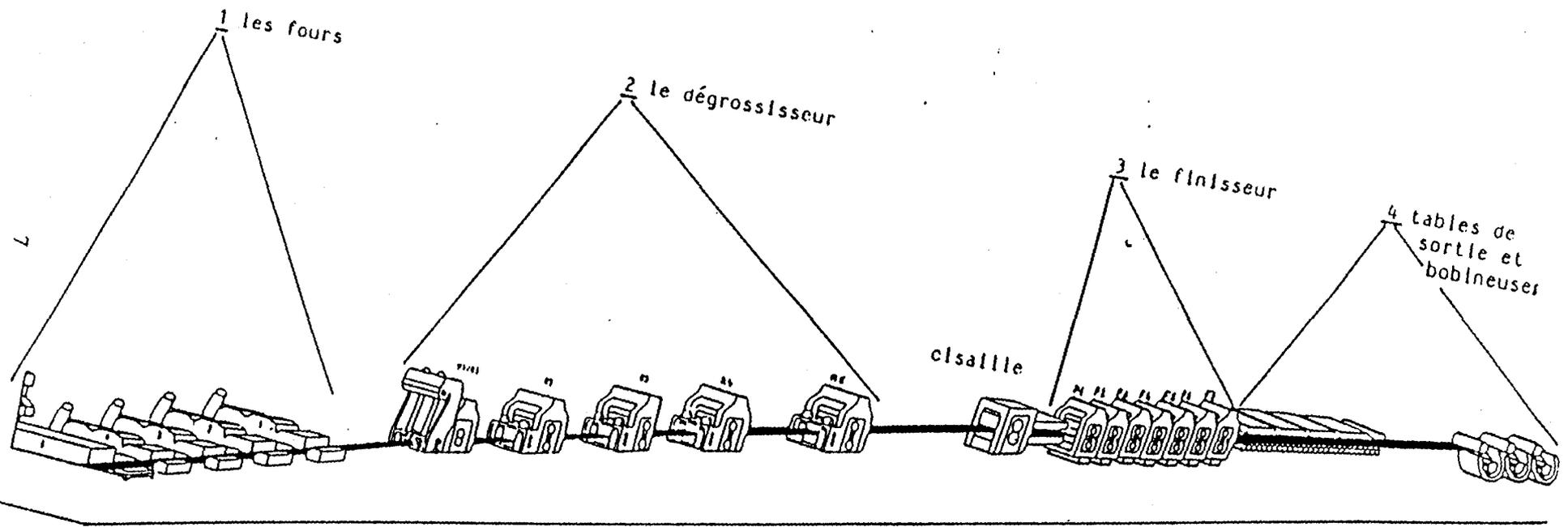
- Les fours, qui chauffent la tôle pour permettre la "laminabilité" du produit.
- Le dégrossisseur, dont la fonction est d'assurer une partie de la réduction totale d'épaisseur en passant d'une brame (tôle qui entre dans le train à bande) de 200 à 250 mm à une ébauche de 30 à 50 mm d'épaisseur, et d'effectuer la mise à largeur du produit à l'aide de cylindres verticaux (cage edger ou cage verticale réversible).
- Le train finisseur, qui permet d'obtenir l'épaisseur, ainsi que l'état de surface final de la tôle. La finition de cette tôle d'acier est réalisée par sept cages "quarto" en tandem.
- Les tables de sortie et les bobineuses, où la température moyenne de la tôle passe de 900 à 500 °C; la bande, longue de près de 1 km, vient s'enrouler sur le mandrin de l'une des trois bobineuses, devenant ainsi une bobine de 2m de diamètre, pesant 15 à 20 tonnes, appelée "coil".

c. Le train finisseur

Le but du train finisseur est de réduire l'épaisseur du produit jusqu'à la valeur de consigne tout en conservant sa largeur constante. La réduction totale de l'épaisseur est la conséquence de la réduction successive effectuée par chaque cage, celle-ci étant obtenue par réglage de l'écartement des cylindres de laminage.

La cage quarto du train finisseur est constituée de quatre cylindres équipés à leurs extrémités d'empoises permettant leur rotation dans un palier à film d'huile ou à roulements, tenues dans une structure rigide composée des montants ou colonnes et des traverses de la cage.

La bande est laminée sous l'action de deux cylindres de travail, entraînés en rotation par un moteur à courant continu. Les deux autres cylindres de diamètre plus important, appelés cylindres de soutien, limitent la flexion des cylindres de travail sous l'effort de laminage.

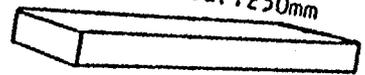


CAPACITE : 4.8 MT/AN

**MISE EN SERVICE
DES NOUVELLES INSTALLATIONS**

- AWC, jougs de profil : 1983
- Serrage hydraulique PS 6 P7 : Août 1984
- Four à longeron : Octobre 1984
- Calculateur finisseur : Aout 1986
- Cage verticale réversible : Aout 1986
- Jougs de planité : Aout 1986
- Déplacement latéral (cylindres F4 & F7) : 1er Septembre 1988

**produit en sortie
de four!**
brame: 1200°
longueur: 9,2m
largeur: 1940-940mm
épaisseur: 250mm



produit fini!
bobine: 200-730°
largeur: 1940-600mm
épaisseur: 1,2-16mm

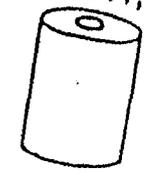


Figure I.1. Schéma du train à bande de Sollac-Dunkerque

Les sept cages de laminoir sont équipées d'actionneurs de serrage à vis électromécanique situés en haut de la cage (deux par cage), et les trois dernières cages disposent d'actionneurs hydrauliques supplémentaires, appelés pots de serrage, positionnés en bas de cage sous les empoises de soutien inférieures. En régime de fonctionnement nominal, les vis de serrage contribuent au positionnement a priori de l'écartement des cylindres de travail pour l'obtention de l'épaisseur désirée, alors que les pots de serrage sont les actionneurs de la régulation de position en cours de laminage.

d. Performances du laminage

L'un des objectifs essentiels du lamineur est d'obtenir, dans les meilleures conditions de productivité un produit dont l'épaisseur est aussi voisine que possible de l'épaisseur désirée. Afin de satisfaire à cet objectif, la régulation d'épaisseur doit assurer:

- une épaisseur constante de la tête à la queue de bande
- l'égalité de cette épaisseur avec la consigne.

Globalement, les performances épaisseur actuelle pour les bandes d'acier à chaud dans la gamme 2 mm - 2,5 mm sur le train finisseur de Sollac-Dunkerque, sont les suivantes:

- 98 % de la longueur totale de la bande lorsqu'on considère l'épaisseur en sortie contenue dans une fourchette de ± 50 microns.
- 89 % dans une fourchette de ± 25 microns.

Cependant, le taux de bon fonctionnement du serrage hydraulique, directement impliqué dans l'obtention des performances épaisseur finale et dans le taux de productivité, doit constamment être amélioré et consolidé afin d'obtenir un procédé sûr et fiable.

e. Contrôle de l'épaisseur

Plusieurs types de perturbations peuvent influencer l'épaisseur de sortie (variations de la dimension du produit initial, variation de la composition et de la température de l'acier, déformation élastique de la cage, faux-rond des cylindres de soutien et/ ou de travail,...). En conséquence, le contrôle de l'épaisseur est réalisé par 3 régulations imbriquées (figure I.2 et I.3) :

- la régulation lente de l'épaisseur de la tôle (correction moniteur)
- le contrôle rapide de l'épaisseur à partir de la mesure de l'effort de laminage (correction AGC [Automatic Gage Control])
- la régulation de niveau 0 de la position des vérins hydrauliques (serrage hydraulique)

La correction moniteur compare en permanence l'épaisseur réelle de la bande en sortie train (mesure par jauge à rayons X) à l'épaisseur de consigne et génère la correction d'épaisseur à réaliser par les dernières cages du train finisseur, afin de corriger les dérives en épaisseur. Cette correction (Smon) qui en résulte est répartie sur les différentes cages au prorata des réductions imposées, le nombre de cages impliquées pouvant varier selon l'épaisseur laminée.

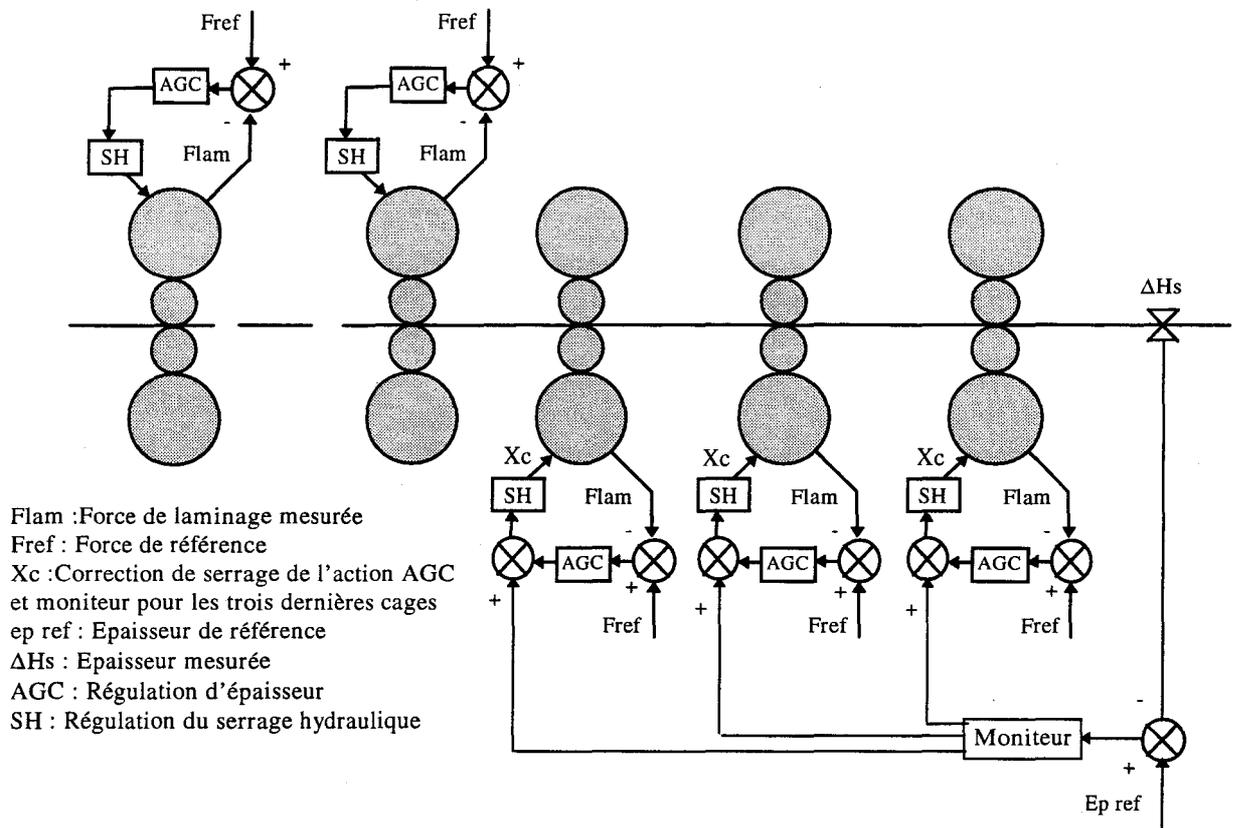


Figure I.2 : Schéma général de la régulation d'épaisseur au train finisseur.

La correction AGC s'effectue indépendamment pour chaque cage. Son but est la compensation de l'effet de cé dage de la cage afin de maintenir constante l'épaisseur en sortie de cage pour un point de fonctionnement donné. La correction de serrage S_{agc} tient compte de l'écart entre l'effort de laminage mesuré et une force dite de référence. Selon le cas, cette force de référence est calculée par un modèle (force absolue) ou issue de la mesure de l'effort de laminage en tête de bande (force de lock-on). L'action de la correction AGC agit en continu après quelques secondes ou fractions de secondes de laminage.

La consigne d'écartement des cylindres appliquée au système de serrage hydraulique (X_c), est la somme des deux corrections moniteur et AGC (cf. figure I.3) :

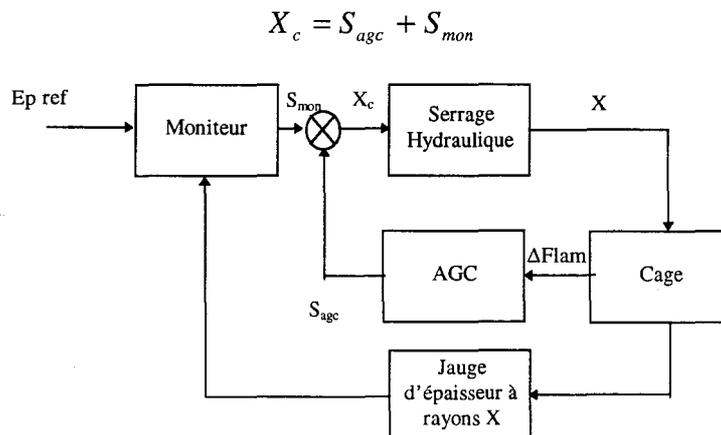


Figure I.3 : Schéma de commande du serrage de la dernière cage.

II Le modèle du serrage hydraulique.

Des essais préliminaires ont été réalisés par l'IRSID sur la dernière cage du train à bandes de Sollac-Dunkerque. Un modèle précis a ainsi été établi, et les essais ont permis de caler ce modèle sur le système réel. Des simulations ont été effectuées afin de déterminer les valeurs des paramètres qui donnent des résultats conformes aux mesures et d'étudier leur influence sur le comportement de l'organe de serrage [BAUE 92].

Le schéma bloc général et le schéma bloc détaillé sont donnés figures I.4. et I.5., le récapitulatif des équations ainsi que la description des variables et des paramètres avec leur valeur nominale sont donnés en annexe 1.

Le modèle de serrage hydraulique est décomposé en 6 modules dont nous allons préciser la fonction :

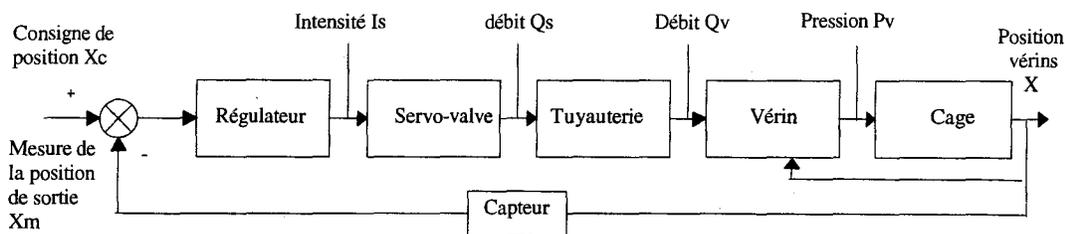


Figure I.4 : Schéma bloc général du modèle du système de serrage hydraulique.

- Le régulateur qui transforme linéairement par le gain du régulateur (K_r) le signal d'écart en courant de commande de la servo-valve I_s . Ce courant ne peut être supérieur à un seuil $I_{s_{max}}$.

- La servo-valve est commandée par le courant I_s . Elle fournit l'huile au vérin avec un débit de sortie Q_s . Ce débit est positif ou négatif suivant le sens de serrage ainsi que le coefficient d'ouverture du débit Q_n . En serrage, la servo-valve est alimentée par la pression d'alimentation P_a . Elle est modélisée par un système du deuxième ordre de pulsation propre ω_0 et de coefficient d'amortissement ξ , puis par un bloc non-linéaire qui détermine le débit de sortie en fonction du sens de serrage.

- La tuyauterie d'une longueur (L) de 6 mètres relie la servo-valve au vérin. Elle est alimentée par un débit Q_s et fournit un débit de sortie Q_v (entrée vérin). Elle est également modélisée par un système du deuxième ordre.

- Le vérin applique une pression P_v sur l'empilement des cylindres inférieurs chargés d'écraser la tôle. La pression exercée dépend du débit d'entrée du vérin Q_v et de la variation de volume dans les vérins. La force F_v exercée par les cylindres sur la tôle est la force totale des deux vérins.

- Le bloc cage modélise la déformation de la cage soumise à l'ensemble des efforts, y compris les forces d'inertie et les forces dissipatives de frottement. L'effort de laminage vu par la tôle (F_{lam}) est proportionnel à la variation de l'écart entre l'épaisseur de la tôle et la position des vérins, par l'intermédiaire d'un coefficient appelé module de cédage de la cage M_{ced} (cf. figure I.5). La force de contre-flexion F_{worb} , qui est une entrée du système, s'applique sur chacun des cylindres de travail de la cage pour compenser la flexion de ces mêmes cylindres sous l'effet de l'effort de laminage directement exercé par la tôle. Pempi représente la force résultante de la masse totale de l'empilement des cylindres inférieurs de la cage. La mesure précise de l'épaisseur ΔH_s , faite par la jauge à rayons X située à 5,5 m en sortie de la dernière cage finisseuse, constitue une entrée supplémentaire au niveau de la cage.

- La variation de position des vérins X, relativement à une position fixe de référence est mesurée par un capteur de position logé dans les vérins. Elle représente la sortie régulée du système de serrage hydraulique.

Enfin, le schéma bloc intègre la modélisation d'un débit de fuite de la tuyauterie Q_f et d'un débit de fuite sur le vérin (défaut d'étanchéité entre le piston et la chemise du vérin) à travers le coefficient de débit de fuite K_1 . Ces paramètres étant nuls en fonctionnement nominal, leur présence dans le schéma bloc ne fait qu'illustrer leur influence en cas de défaillance.

III Les données disponibles

Un enregistrement complet des entrées et sorties lors du laminage en dernière cage finisseuse F7 pour quatre bandes de métal différentes a été réalisé. Le laminage de ces bandes est supposé s'être déroulé dans des conditions normales de fonctionnement, sans défaillance du processus ou des capteurs. Pour chaque bande, 8 mesures sont disponibles :

Symbole	Dénomination	Unité
Vit	Vitesse périphérique des cylindres de travail cage F7	m/min
Fworb	Force de contre-flexion	Tonne-force
Fv	Force de laminage développée par les vérins	Tonne-force
Som	Position moyenne des pots de serrage	mm
Sagc	Correction de serrage AGC	mm
Is	Courant de la servo-valve	mA
ΔH_s	Variation d'épaisseur de laminage	micron
Smon	Correction de serrage moniteur	mm

Tableau I.1 : Liste des mesures disponibles.

L'allure de ces 8 signaux est rapportée en annexe 2 pour la bande n°4. Les données ont été acquises avec un pas d'échantillonnage constant de 10 ms après application d'un filtre anti-repliement vérifiant la condition de Shannon.

La vitesse de rotation des cylindres de la cage F7 (Vit) n'apparaît pas sur le schéma bloc détaillé (figure I.5). Elle est utile dans un premier temps pour calculer le retard avec lequel est obtenue la mesure de l'épaisseur ΔH_s par jauge à rayons X.

La force hydraulique développée au niveau de la cage est la force totale des deux vérins sur l'empilement des cylindres inférieurs. La pression exercée par un vérin élémentaire est liée à la force F_v par :

$$P_v = \frac{F_v}{2A}$$

où A est la section du vérin en m^2 . Dans la suite du rapport, on parlera toujours de la mesure de la variable P_v , bien que celle-ci ne soit pas directement disponible.

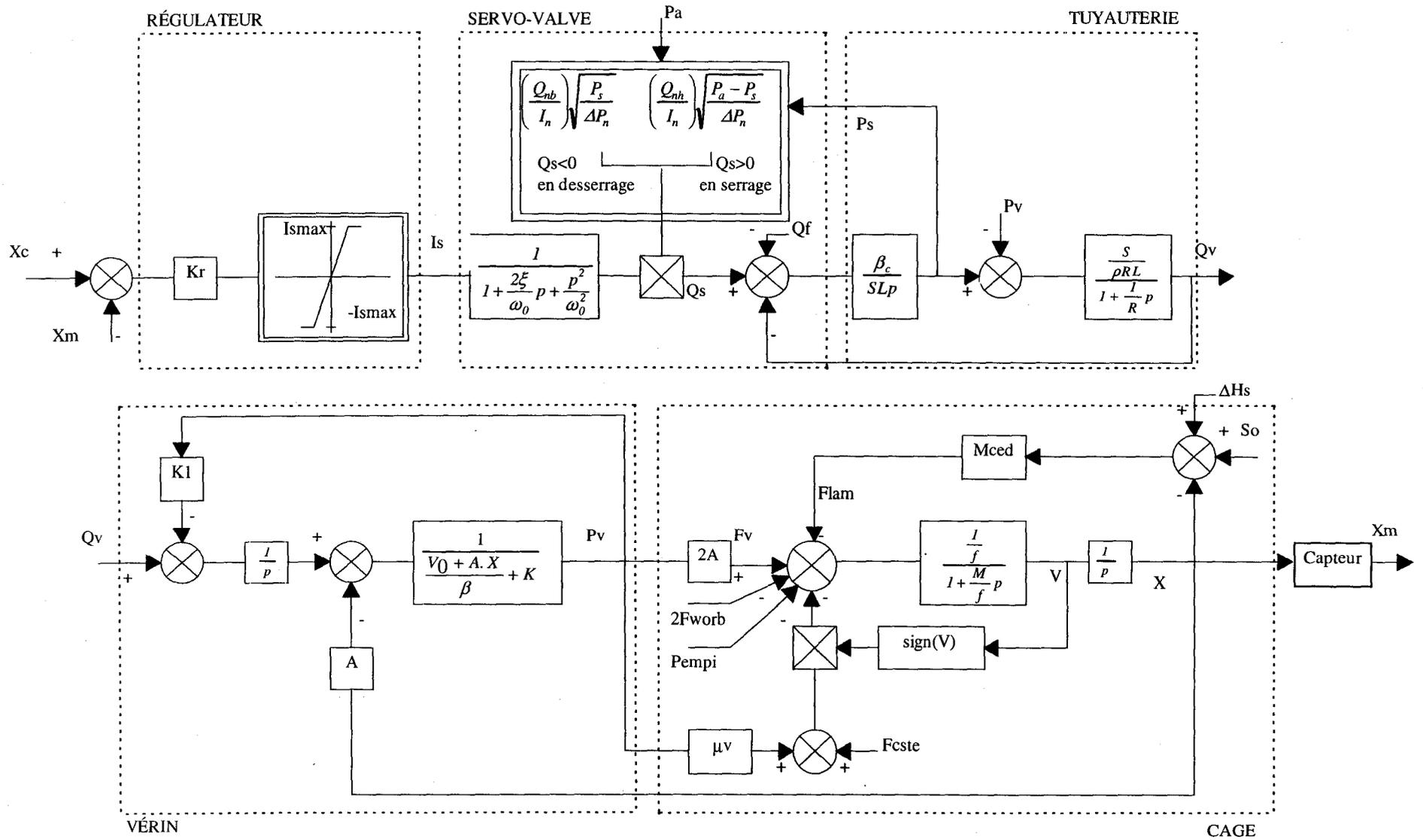


Figure I.5 : Schéma bloc détaillé du serrage hydraulique.

Chapitre 2 : Conception du système de surveillance.

Après avoir présenté le système, il faut maintenant définir les objectifs recherchés pour sa surveillance et les moyens mis en oeuvre pour y arriver. Dans une première partie, nous allons présenter les principes qui nous ont permis de définir le cahier des charges du système de surveillance. Le cahier des charges sera notre référence pour l'évaluation des performances du système de surveillance qui sera présenté au chapitre 5. Sa mise en oeuvre pratique sera abordée dans le chapitre 3. Dans une deuxième partie, nous allons rappeler les principes de la surveillance. Les différentes étapes de la surveillance seront définies, et nous présenterons quelques méthodes de génération de résidus. Nous retiendrons l'une d'elles, l'analyse structurelle, qui sera développée et détaillée dans la troisième partie. Les résultats de son application au serrage hydraulique fournit les ensembles de relations de redondance analytique qui seront étudiés dans la suite du document. La quatrième partie introduit une procédure de localisation des défaillances fondée sur une reconnaissance logique. Elle permet une première évaluation des performances que pourra atteindre un système de surveillance fondé sur un ensemble de relations de surveillance donné.

I Cahier des charges de la surveillance

Les objectifs à atteindre sont rassemblés dans le cahier des charges qui précise quelles sont les causes de défaillances qui doivent être prises en compte. Ces causes peuvent être définies à partir de connaissances du système, obtenues auprès d'utilisateurs ou de concepteurs du procédé.

Nous rappellerons dans un premier temps quelques définitions d'une défaillance et des différents types de défaillance. Ensuite, nous fixerons les objectifs du cahier des charges en définissant les défaillances pouvant intervenir pour chacun des modules du système de serrage hydraulique. Les moyens disponibles pour atteindre ces objectifs dépendront du nombre de capteurs. Le choix de l'instrumentation est alors important et sera discuté en troisième partie. Enfin, nous préciserons les objectifs à fixer par le cahier des charges ainsi que le principe de la détermination pratique de ce dernier.

I.1 Définitions

La défaillance d'un système est une modification des caractéristiques qui provoque un dysfonctionnement du processus. Un système est dit en fonctionnement normal si son comportement appartient à un ensemble de comportements nominaux pour lequel il a été conçu. Lorsqu'il en sort, le système est dit en fonctionnement défaillant ou anormal. Par exemple, le fait qu'un capteur soit dérégulé peut conduire la fonction de régulation à ne plus pouvoir tenir les spécifications de précision. Une panne suppose l'arrêt de fonctionnement du système.

Une perturbation est une action extérieure non contrôlée agissant sur le système.

On recense trois types de défaillance [SPRÖ 92] :

- Les défaillances processus.

Ce type de défaillance est dû aux éléments du système. Ceux-ci sont sujets à des vieillissements, à des évolutions de comportement ou à des ruptures.

- Les défaillances actionneurs.

L'actionneur module la puissance fournie par une source en fonction d'un signal de commande. Ce signal est élaboré par un opérateur (mécanisme en boucle ouverte) pour les plus simples par une loi de commande en boucle fermée pour les plus complexes [STAR 94].

L'énergie fournie au système permet les transformations de son état. Il constitue donc un élément important du système dont la fonctionnalité est de permettre les actions du procédé. Une défaillance de celui-ci empêche alors le système d'atteindre ses objectifs. L'actionneur est aussi un système physique; il peut donc subir les mêmes types de défaillance que celles décrites précédemment.

- Les défaillances capteurs.

Le capteur a pour mission de fournir une image d'une grandeur physique. Lors de la conception du capteur, on s'efforce d'établir une relation linéaire entre les variations de la grandeur d'entrée (valeur vraie) et de la grandeur de sortie (valeur mesurée). En réalité, des erreurs dues aux imperfections de la chaîne de mesure viennent s'ajouter à la valeur mesurée.

Le capteur se caractérise [GEHI 94] par des critères de sûreté de fonctionnement (fiabilité, maintenabilité), des critères d'utilisation (sensibilité, étendue de mesure) et des critères métrologiques (fidélité, justesse, précision).

Les défaillances capteurs se distinguent par trois catégories d'erreurs de mesures :

- * Les erreurs aléatoires, d'amplitudes aléatoires, sont liées aux limites de la mesure (bruits de fond, perturbations électromagnétiques).

- * L'erreur systématique introduit, pour une valeur donnée de la grandeur à mesurer, un décalage entre la valeur vraie et la valeur mesurée. Elle est soit constante (biais), soit à variation lente par rapport à la durée de mesure (dérive), soit fonction de la mesure (erreur d'échelle).

- * L'erreur accidentelle a une apparition, un signe et une amplitude considérés comme aléatoires. Elle se distingue de l'erreur systématique par son aspect temporaire. Elle est liée à une défaillance matérielle ou humaine momentanée.

Le cahier des charges est élaboré à partir de la définition du fonctionnement normal du système : il permet de séparer l'ensemble des défaillances que l'on désire surveiller des autres influences. On établit ainsi deux groupes distincts :

- Les défaillances auxquelles on veut être sensible
- Les autres influences parmi lesquelles on peut citer :
 - les défaillances auxquelles on ne s'intéresse pas
 - les perturbations
 - les erreurs de modélisation.

Le système de surveillance doit être sensible aux défaillances du premier groupe et robuste vis-à-vis des défaillances du second. Cependant, dans certains cas, il n'est pas possible d'obtenir un découplage parfait des perturbations. Leurs effets doivent alors être minimisés de sorte à ne pas produire de variation suffisante pour être considérée comme une défaillance.

I.2 Instrumentation

La conception du système de surveillance va dépendre du nombre de mesures disponibles et de la position des capteurs. Il n'est pas question ici de faire une étude du placement de capteurs, déjà étudié dans d'autres travaux, voir par exemple [CARP 96], qui fait une analyse du placement optimal de capteurs à partir de l'analyse structurelle, ou [LUON 96] qui présente une large bibliographie des méthodes du placement de capteurs. Nous étudierons la conception du système de surveillance pour deux instrumentations différentes : une instrumentation utilisant les capteurs déjà implantés industriellement et une instrumentation complémentaire réaliste utilisant des capteurs supplémentaires.

Quatre mesures sont disponibles sur le site :

- la position de serrage Xm, utilisée pour la régulation.

- la pression d'alimentation P_a , inconnue, mais fixée à une valeur nominale de référence constante

- la pression vérin P_v
- le courant servo-valve I_s .

On ne dispose pas de la mesure directe de P_a (pression d'alimentation). La valeur moyenne de fonctionnement de cette pression est cependant connue. Aussi, elle sera remplacée par sa valeur nominale, bruitée si nécessaire par la suite (cf. chapitre 4). La pression d'alimentation P_a ne sera donc pas considérée comme une défaillance réelle.

Cette instrumentation qui est en fait l'instrumentation réelle du serrage hydraulique sera appelée '*instrumentation initiale*'.

Cependant, et ceci afin d'étudier l'amélioration potentielle des performances du système de surveillance, nous mènerons une étude en parallèle à partir de variables supplémentaires qu'il serait possible de mesurer. Ces variables doivent avoir une signification physique pour être mesurables. Il faut effectuer un choix parmi les variables physiques non mesurées qui apparaissent dans le schéma-bloc du système (figure I.5). Les variables restantes sont les suivantes :

- P_s : la pression en sortie de la servo-valve
- Q_s : le débit en sortie de la servo-valve
- Q_v : le débit d'entrée du vérin
- V : la vitesse de déplacement des vérins.

Le choix des variables supplémentaires à mesurer doit limiter au maximum le nombre total de capteurs et de plus, l'implantation doit être réalisable.

Parmi ces variables restantes, le débit vérin Q_v est très important puisqu'il permet d'obtenir une mesure supplémentaire entre le courant de commande I_s et la pression des vérins P_v , et ainsi de découpler la partie vérin - cage de la partie servo-valve - tuyauterie. P_s et Q_s n'étant séparés que par une fonction de transfert, l'une des variables permet d'estimer facilement l'autre et mesurer ces deux variables simultanément n'apporterait pas beaucoup plus d'informations que d'en mesurer une seule des deux. On choisit donc de conserver la mesure de la pression P_s pour l'étude de la conception du système de surveillance avec une instrumentation complémentaire car une pression est plus facilement mesurable qu'un débit. De plus, certains auteurs ont montré qu'il était possible de placer un capteur mesurant la pression servo-valve P_s [KOBU 92]. Enfin, la vitesse de déplacement des vérins V est facilement estimable à partir de la mesure de la variation de position des vérins X . On ne retiendra donc pas cette mesure complémentaire.

Pour concevoir le système de surveillance, 6 mesures au total sont retenues :

- la position de serrage X_m
- la pression d'alimentation P_a
- la pression vérin P_v
- le débit vérin Q_v
- le courant servo-valve I_s
- la pression-valve P_s .

Cette instrumentation sera appelée '*instrumentation complémentaire*'.

I.3 Cahier des charges du système de surveillance

I.3.1 Objectifs généraux

Le système de surveillance doit être capable de détecter les défaillances et de les localiser par module (servo-valve, vérin, cage, tuyauterie, régulateur). Pour chacun de ces modules, on identifie plusieurs causes de défaillances associées à la variation d'un paramètre physique du système. Ces paramètres ont une influence sur la réponse temporelle ou sur le gain statique du système. L'idéal serait que le système de surveillance puisse localiser parfaitement toutes les causes de défaillances retenues.

Les défaillances associées à la variation d'un paramètre sont :

- le régulateur : dérèglement du coefficient du régulateur ou erreur du calculateur (K_r)
- la servo-valve : encrassement des filtres et usure des orifices (coefficients de débit nominaux en serrage et en desserrage Q_{nb} et Q_{nh}), changement des caractéristiques électromécaniques (dynamiques) de la servo-valve (paramètres du deuxième ordre ξ et ω_0)
- la tuyauterie : fuite (débit volumique Q_f), pollution de l'huile : modification de sa viscosité (coefficient de pertes de charge R), gaz dans l'huile, changement de compressibilité (coefficient de compressibilité de l'huile dans la tuyauterie β)
Remarque : le coefficient de compressibilité β intervient à deux niveaux dans le schéma-bloc complet du serrage hydraulique, dans le module vérin et dans le module tuyauterie (voir annexe 1).
- le vérin et la cage : étanchéité du vérin (coefficient de fuite du vérin K_i), dégradation de la surface d'usure de l'empilement et/ou du vérin (frottement sec f et force de collage F_c), dégradation propre au vérin (frottement visqueux μ_v lié à la pression vérin).

A ces défaillances, nous ajoutons les défaillances capteurs :

- la mesure de position des vérins de serrage X
- la mesure de la pression vérin P_v
- la mesure du courant servo-valve I_s .

Par contre, nous émettons l'hypothèse que les entrées mesurées du système ne peuvent être la cause d'une défaillance (cf. Tableau I.1) :

- la correction AGC S_{agc}
- la correction moniteur S_{mon}
- la force de contre-flexion F_{worb}
- la vitesse de rotation des cylindres V_{it}
- la pression d'alimentation P_a
- la mesure d'épaisseur ΔH_s par jauge à rayons X .

Une variation de la valeur de certains paramètres force le système à sortir de son fonctionnement nominal. Le problème consiste à définir quelles sont les limites du fonctionnement nominal. Aussi il faut disposer de variables représentatives de l'état de fonctionnement du système. Le cahier des charges permet de fixer la valeur numérique de chacune des défaillances permettant de délimiter l'état de fonctionnement nominal de l'état de fonctionnement défaillant.

Ce cahier des charges sera quantifié dans le chapitre 3, après le calage du modèle par rapport au système réel, à partir de critères quantitatifs précis.

1.3.2 Définition pratique du cahier des charges

Nous nous limitons uniquement aux variables mesurées ou mesurables comme variables représentatives puisque leur valeur est accessible. Ces variables ont une signification physique et leurs variations ont différentes conséquences sur le système :

- la variation de position des vérins X est directement liée à l'épaisseur de la tôle et sa modification entraîne une dégradation de la qualité du produit.
- le courant de commande de la servo-valve I_s est lié par le gain régulateur K_r à l'erreur de régulation du système. Son dysfonctionnement influe également sur la qualité du produit final.
- les pressions servo-valve P_s et vérin P_v ainsi que le débit vérin Q_v sont des variables internes du serrage hydraulique et leur variation brutale ou importante entraînera une dégradation à terme des organes du serrage hydraulique (usure prématurée, blocages, fuites, ...).

Le fonctionnement de référence du système est défini par des critères sur la réponse temporelle du système à un échelon. Afin de pouvoir évaluer les critères, il faut disposer d'un ensemble de mesures de références. De plus, les conditions de mesures doivent être parfaitement reproductibles. Le laminage d'une bande n'est pas une action reproductible, puisque les sorties du système, ainsi que la commande, vont dépendre de la durée du laminage, des dimensions de la tôle laminée, de sa température, de sa composition, de son homogénéité, etc... autant de conditions qu'il est difficile de reproduire. Les études pour le fonctionnement nominal du serrage hydraulique sont alors réalisées sans tôle, les cylindres de travail étant en contact. Cette configuration est appelée 'à roule'. Le système en l'absence de tout bruit est sollicité par une consigne de type échelon. Ensuite les réponses temporelles des variables caractéristiques du système sont analysées en définissant plusieurs critères décrivant le fonctionnement de référence : amplitudes, dépassements, temps de réponse, rapport des dépassements successifs, erreur statique. On estimera qu'une variation d'un paramètre entraînant une variation minimale de 10 % d'un de ces critères est suffisante pour définir la valeur d'une défaillance pour la définition du cahier des charges.

Etant impossible de réaliser les essais à roule industriellement, en introduisant les défaillances une à une sur le système, nous utiliserons un simulateur calé sur le procédé. Ce dernier et la quantification du cahier des charges seront présentés dans le chapitre 3.

II Principes de la surveillance

Dans cette partie, nous allons décrire quelques notions sur la surveillance de processus. Nous décrirons d'abord les modules propres à la surveillance.

Le système de surveillance

La conception du système de surveillance se décompose classiquement en deux étapes indépendantes : la génération des résidus et la procédure de décision.

II.1 La génération des résidus

Les méthodes de base de la détection de défaillance utilisant un modèle reposent sur la comparaison, exprimée par la valeur d'un résidu, entre le fonctionnement normal du système sur le site et celui d'un modèle décrivant ce fonctionnement normal. Les valeurs des résidus doivent refléter l'effet des défaillances. Elles doivent être proches de zéro en l'absence de

défaillance et différentes de zéro dans le cas contraire. Le calcul des résidus utilise les informations disponibles, issues des capteurs ou d'entrées connues du système.

Les procédures de décision utilisent les valeurs des résidus, en prenant en compte leurs aspects non déterministes (dus aux bruits de mesure, procédé et aux erreurs de modélisation), pour décider s'il y a ou non défaillance (détection) et indiquer éventuellement l'origine de la défaillance (localisation).

Parmi les différentes méthodes de génération de résidus, on peut citer :

- l'utilisation des filtres de Kalman [WILL 76a]
- l'utilisation de l'estimation des paramètres [ISER 84][GERT 88][DELM 96]
- l'espace de parité
 - pour les modèles linéaires, dans le cas statique [POTT 77]
 - pour les modèles linéaires, dans le cas dynamique [CHOW 84]
 - pour les systèmes quelconques : analyse structurelle [DECL 91], [CASS 97]
 - pour les systèmes polynomiaux : théorie de l'élimination [COMT 97] [GUER 97]
- l'utilisation des observateurs linéaire [PATT 89b] ou non linéaire [DING 89].

La limitation de la plupart des approches proposées provient de la modélisation de départ : celles-ci supposent le système linéaire invariant. Beaucoup de systèmes ne répondent pas à cette hypothèse. Les observateurs peuvent prendre en compte des systèmes non-linéaires continus dérivables [DING 89], mais cela ne couvre pas encore l'étendue des systèmes existants. Cette limitation et particulièrement l'existence des comportements 'à seuil', a motivé le choix de l'analyse structurelle pour la surveillance du serrage hydraulique.

II.2 Procédure de décision

La phase de décision effectue un choix parmi les différentes hypothèses de fonctionnement. Elle permet de décider, à partir des valeurs temporelles des résidus, si le système est déclaré défaillant ou non, et de localiser l'élément défaillant.

Les méthodes de décision

Il existe trois grands types de stratégie de décision :

- les méthodes snapshot ou à un coup, qui testent de manières indépendantes les résidus à chaque instant. Dans cette classe, on distingue les méthodes de tests des résidus pris individuellement et comparés à des seuils et les méthodes géométriques appliquées de façon globale au vecteur d'indication de défauts. Ces dernières sont basées sur des critères géométriques d'appartenance à des régions. Le problème est de décider l'appartenance du vecteur de résidus à une de ces régions.

- les méthodes de tests classiques, qui correspondent à des tests statistiques dérivés de la théorie appliqués aux indicateurs de défauts. Les tests optimaux pour différents critères conduisent à des tests classiques sur le rapport de vraisemblance dont le calcul inclut des modèles probabilistes des observations (lemme de Wald, lemme de Neyman-Pierson). Ils considèrent un ensemble de taille fixe d'observations et il faut décider à l'issue de ces mesures l'hypothèse la plus probable. La mise en oeuvre de cette méthode suppose l'hypothèse d'indépendance des indicateurs de défauts.

- les tests séquentiels diffèrent des précédents dans le sens où le nombre d'observations peut augmenter à chaque instant. Pour ces test, on préfère reporter la décision plutôt que de prendre une décision erronée. Ceci introduit un domaine supplémentaire par rapport aux test

précédents qui correspond à une région de non décision [BASS 93]. Ces tests séquentiels s'appliquent aussi sur le rapport de vraisemblance et généralement de façon cumulative (méthode de la somme cumulée). Ces méthodes paraissent plus robustes que les tests classiques. Comme ces derniers, elles exigent toutefois pour la mise en oeuvre l'indépendance des indicateurs de défauts.

La détection

La détection à l'aide de ces méthodes réside dans le choix entre l'hypothèse du fonctionnement normal et celle du fonctionnement défaillant. La détection de défaillance se présente donc comme la résolution d'un problème de décision à deux hypothèses.

Toutefois de mauvaises décisions peuvent se produire : les fausses alarmes peuvent avoir pour conséquence des arrêts inutiles de la production qui entraîneront une baisse de productivité. De plus, un système qui déclenche inutilement n'a pas plus la confiance de l'opérateur. Celui-ci risque de ne plus prendre en compte des alarmes même lorsqu'elles sont justifiées. Une non détection ou une détection trop tardive peut avoir des conséquences fâcheuses sur le processus physique, son environnement ainsi que sur les opérateurs. Les test de détection doivent donc si possible tenir compte de ces critères afin d'améliorer la fiabilité du système de surveillance.

La localisation

Après avoir détecté un fonctionnement anormal, le système de surveillance doit être capable de localiser l'élément défectueux (capteur, actionneur, processus), d'évaluer son importance et de chercher sa cause éventuelle. Par ailleurs, une localisation incorrecte peut mener à des actions inadaptées par rapport à l'état réel du système ou à sous-estimer une situation potentiellement dangereuse.

Dans le cas de systèmes physiques complexes ou peu instrumentés, il ne sera pas toujours possible de localiser précisément chaque élément défaillant et la localisation peut se contenter alors d'indiquer le sous-système dans lequel se manifeste la défaillance. Le problème de la localisation se pose donc en terme de choix entre les différentes hypothèses de défaillances. Elle fait donc appel aux méthodes préalablement citées.

Le diagnostic

Le diagnostic de la défaillance est une opération classique qui caractérise la défaillance par type et degré de sévérité. En fonction des règles préétablies, les symptômes de la défaillance vont permettre de trouver le type et la cause de la défaillance. Il est cependant utile de noter que le diagnostic peut dépendre du niveau de connaissance physique que l'on a du système [STAR 94].

III Analyse Structurelle

Les méthodes de génération de résidus sont pour la plupart adaptées aux systèmes linéaires. Le système de serrage hydraulique comporte plusieurs non-linéarités. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'utiliser l'analyse structurelle, qui a été développée dans le laboratoire, pour étudier la surveillance du serrage hydraulique. Nous allons détailler la théorie de l'analyse structurelle, avant de l'utiliser pour l'appliquer au cas du serrage hydraulique.

III.1 Théorie de l'analyse structurelle

III.1.1 L'analyse structurelle

III.1.1.1 Principes généraux de l'analyse structurelle

L'utilisation de l'analyse structurelle permet de concevoir un système de surveillance sans la connaissance des équations analytiques du modèle a priori. Les seules informations conservées sont l'existence des contraintes qui lient les variables entre elles. L'analyse structurelle permet donc de traiter des modèles de natures diverses (linéaire / non linéaire, statique / dynamique, qualitatif / quantitatif, ...).

A partir de la structure du système, on définit quelles sont les relations de redondance analytique qui peuvent être mises en oeuvre pour réaliser la surveillance. Pour obtenir celles-ci, il faut pouvoir éliminer les variables inconnues du système. L'approche structurelle constitue un guide pour la résolution des systèmes. Elle ne prend alors en compte que la structure des relations par rapport aux variables inconnues. La structure est représentée par des éléments binaires qui indiquent l'appartenance ou non d'une variable à une relation et qui rendent plus facile le traitement de systèmes complexes.

III.1.1.2 Modèle

Le modèle doit permettre de prédire le comportement du système afin de pouvoir comparer les comportements réels et attendus. Ainsi, il est possible de détecter un dysfonctionnement dans le cas d'une différence entre ces deux comportements.

Le modèle d'un système est décrit par un ensemble de relations entre les variables. Ces relations sont appelées les relations de contraintes analytiques. Elles s'expriment de la manière générale suivante:

$$f(x, y, z) = 0$$

où f est une contrainte du système et x, y, z sont des variables connues ou inconnues du système.

Remarque: dans cette étape, aucune hypothèse n'est faite sur la possibilité de calcul de chacune des variables par cette relation, car son expression analytique n'est pas considérée pour l'instant.

On dispose d'informations sur certaines variables du procédé, soit parce que des variables sont générées par le système de contrôle commande, soit parce qu'elles sont mesurées.

Les relations de connaissances établissent le lien entre les valeurs disponibles (variables connues) et les variables réelles du procédé (variables inconnues).

Remarque: s'il devient nécessaire d'avoir de nouvelles relations pour augmenter les performances du système de surveillance, celles-ci ne peuvent être obtenues que par l'ajout de capteurs sur le système, car on ne peut pas obtenir de relations de contraintes analytiques supplémentaires du processus.

III.1.1.3 Représentation structurelle du modèle

Comme l'analyse structurelle ne conserve que la structure du modèle, on peut alors représenter le processus par un ensemble de blocs interconnectés [STAR 89].

A chacun de ces blocs correspond un ensemble de contraintes de différentes natures, liant des variables connues ou inconnues.

On appelle F l'ensemble des m relations de contraintes analytiques du système:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\} \quad \text{Card}(F) = m$$

On appelle X l'ensemble des n variables inconnues du système, C l'ensemble des p variables connues du système et Z l'ensemble des variables du système:

$$X = \{x_2, x_1, \dots, x_n\} \quad \text{Card}(X) = n$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\} \quad \text{Card}(C) = p$$

$$Z = X \cup C \quad \text{Card}(Z) = n + p$$

Le modèle structurel est défini par une application binaire s :

$$s : F \times Z \rightarrow \{0, 1\}$$

$$(f_i, z_j) \rightarrow s(f_i, z_j)$$

où $s(f_i, z_j) = 1$ si et seulement si z_j apparaît dans la relation f_i

$s(f_i, z_j) = 0$ sinon.

L'ensemble des couples (f_i, x_j) tels que $s(f_i, x_j) = 1$ est appelé structure du système.

A partir de cette modélisation, la structure d'un sous-ensemble de relations est définie par :

$$Q : P(F) \rightarrow P(Z)$$

$$F_k \rightarrow Q(F_k) = \{z_j \mid \exists f_i \in F_k \text{ tel que } s(f_i, z_j) = 1\}$$

$P(F)$, $P(Z)$ sont les ensembles des parties de F et de Z . ($F_k \subset P(F)$)

$Q(F_k)$ est l'ensemble des variables qui apparaissent dans les relations F_k .

On définit de même :

$$R : P(Z) \rightarrow P(F)$$

$$Z_k \rightarrow R(Z_k) = \{f_i \mid \exists z_j \in Z_k \text{ tel que } s(f_i, z_j) = 1\}$$

On définit un sous-système S_k par le couple $(F_k, Q(Z_k))$.

Dans le but d'obtenir des relations de redondance analytique, on peut représenter le modèle de deux manières différentes mais équivalentes: le graphe biparti qui associe les deux ensembles F et Z constituant le modèle par des liaisons entre ces éléments, et la matrice d'incidence qui conserve uniquement la présence ou l'absence d'une variable dans une relation.

a- Le graphe biparti

Le graphe biparti relie les ensembles du système F et Z par un ensemble d'arcs A_Z qui représente la structure [DECL 91].

On appelle $G(F, Z, A_Z)$ le graphe biparti associé à s par:

$$(f_i, z_j) \in A_Z \Leftrightarrow s(f_i, z_j) = 1$$

et $G(F, X, A_X)$ la restriction du graphe biparti aux variables inconnues X .

b - La matrice d'incidence

La matrice d'incidence est une matrice binaire où les "1" représentent un lien analytique entre une variable et une relation. Les termes de la matrice sont définis par:

$$I_{i,j} = 1 \text{ si } s(f_i, z_j) = 1$$

$$I_{i,j} = 0 \text{ sinon.}$$

La dimension de la matrice d'incidence est donc $m \times (n+p)$.

c- Couplage sur une structure

Un couplage K sur une réduction de la structure à X est un ensemble de couples relation - variable inconnue appartenant à la structure et tel que les projections de K dans F et dans X soient toutes deux injectives [GOND 79][ROY 70].

Soient p_X et p_F les projections dans X et F d'un couple appartenant à la structure. Elles sont définies par :

$$\begin{aligned} p_X : F \times X &\rightarrow X \\ (f_i, x_j) &\rightarrow p_X(f_i, x_j) = x_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_F : F \times X &\rightarrow F \\ (f_i, x_j) &\rightarrow p_F(f_i, x_j) = f_i \end{aligned}$$

Soit K_i le couplage d'un sous-système S_i .

Soient $p_X(K_i)$ et $p_F(K_i)$ les projections du couplage K_i dans X et F .

Soit $Q_X(F_i)$ l'ensemble des variables inconnues qui apparaissent dans la relation F_i .

Un couplage K_i est complet par rapport aux variables sur un sous-système S_i si toutes les variables inconnues $Q_X(F_i)$ sont couplées, ce qui se traduit par :

$$K_i \text{ couplage complet par rapport aux variables} \Leftrightarrow p_X(K_i) = Q_X(F_i)$$

Un couplage K_i est complet par rapport aux relations sur un sous-système S_i si toutes les relations F_i sont couplées, ce qui se traduit par :

$$K_i \text{ couplage complet par rapport aux relations} \Leftrightarrow p_F(K_i) = F_i$$

III.1.1.4 Analyse de la structure

a. Décomposition canonique

Ces définitions permettent de faire apparaître trois catégories appelées composantes canoniques (voir figure II.1) :

- Le sous-système sur-déterminé

Si un couplage K_i n'est complet que par rapport aux variables, le sous-système S_i est dit sur-déterminé:

$$\exists K_i \mid p_X(K_i) = Q_X(F_i) \text{ et } p_F(K_i) \subset F_i \Leftrightarrow (F_i, Q_X(F_i)) \text{ est sur-déterminé.}$$

Cette propriété impose que $\text{card}(F_i) > \text{card}(Q_X(F_i))$: le système possède plus de relations que de variables inconnues.

- Le sous-système juste-déterminé

Si un couplage K_i est complet à la fois par rapport aux variables et par rapport aux relations, le sous-système S_i est dit juste-déterminé :

$\exists K_i \mid p_X(K_i) = Q_X(F_i)$ et $pf(K_i) = F_i \Leftrightarrow (F_i, Q_X(F_i))$ est juste-déterminé. Cette propriété impose que $\text{card}(F_i) = \text{card}(Q_X(F_i))$: le système possède autant de fonctions que de variables inconnues.

- Le sous-système sous-déterminé

Si un couplage K_i n'est complet uniquement que par rapport aux relations, le sous-système S_i est dit sous-déterminé :

$\exists K_i \mid pf(K_i) = F_i$ et $p_X(K_i) \subset Q_X(F_i) \Leftrightarrow (F_i, Q_X(F_i))$ est sous-déterminé.

Cette propriété impose que $\text{card}(F_i) < \text{card}(Q_X(F_i))$: le système possède plus de variables inconnues que de relations.

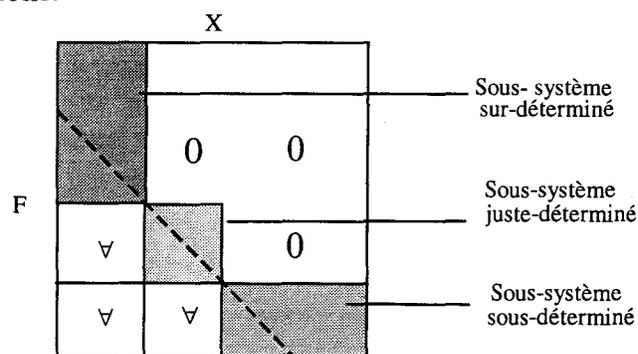


Figure II.1 : Composantes canoniques.

Le couplage introduit une bloc-triangularisation de la matrice d'incidence. Si un bloc élémentaire est de dimension 1×1 , la variable inconnue est directement calculée. Si le bloc est de dimension $n \times n$, il faut résoudre le sous système $n \times n$ pour calculer toutes les variables inconnues [GUER 97].

b. Interprétation des composantes canoniques

* Un sous-système sur-déterminé est caractérisé par un couplage complet par rapport aux variables, mais pas par rapport aux relations. Les variables inconnues peuvent donc être calculées par le sous-ensemble des contraintes et les valeurs des variables connues. Les relations non encore utilisées ne contiennent alors que des variables calculées ou connues, et permettent donc de déduire différents ensembles de relations de redondance.

* Le couplage d'un sous-système juste-déterminé est complet par rapport aux variables aussi bien que par rapport aux relations. La solution de ce système revient à résoudre un système à n équations et n inconnues qui a toujours au moins une solution (structurellement parlant). Mais il n'est plus possible de générer de relations de redondance.

* Dans le cas d'un sous-système sous-déterminé, on dispose de plus de variables que de relations. Il n'est donc pas possible d'évaluer toutes les variables inconnues, et par conséquent d'exploiter ce sous-système pour la surveillance.

III.1.2 Calcul des résidus

III.1.2.1 Introduction d'un modèle analytique

La recherche de relations de redondance analytique se ramène donc à la recherche de sous-systèmes sur-déterminés issus de la décomposition canonique. Afin de créer les séquences de calcul permettant d'obtenir la valeur des résidus (calcul numérique) ou la forme analytique de la relation de redondance (résolution formelle), il devient nécessaire à ce stade de la conception du système de surveillance d'introduire le modèle analytique complet du système.

Relations analytiques

Soit $S_i = (F_i, Q_x(F_i))$ un sous-système sur-déterminé, il peut être décomposé en deux parties:

- la première est un sous-système juste-déterminé qui correspond au couplage K_i complet par rapport aux variables du sous-système:

$$p_x(K_i) = Q_x(F_i)$$

$$pf(K_i) = F_i^-$$

$$\text{avec Card}(Q_x(F_i)) = \text{Card}(F_i^-)$$

où F_i^- est l'ensemble des relations couvertes par le couplage K_i .

- la deuxième partie contient un ensemble de relations supplémentaires non utilisées:

$$F_i^+ = F_i - pf(K_i).$$

Remarque : On fera l'hypothèse que le sous système $(F_i^-, Q_x(F_i))$ comporte une solution analytique.

On peut alors substituer dans chacune des relations de F_i^+ les variables connues en fonction des solutions du sous système $(F_i^-, Q_x(F_i))$. Cette substitution aboutit à une relation ne faisant intervenir que des variables connues: c'est une relation de redondance analytique.

Pour un sous-système sur-déterminé donné, il existe plusieurs façon de le décomposer. Deux cas se présentent alors [CASS 92a]:

1) si $\text{Card}(F_i^+) = 1$, le nombre maximum de sous-systèmes juste-déterminés que l'on peut obtenir est C_m^1 avec $m = \text{Card}(F_i)$. Il reste alors une relation non utilisée qui permet de calculer une seule relation de redondance

2) si $\text{Card}(F_i^+) > 1$, le nombre maximum de sous-systèmes juste-déterminés que l'on peut trouver est de C_m^k , où $k = \text{Card}(F_i) - \text{Card}(Q_x(F_i)) = \text{Card}(F_i^+)$.

Une relation de redondance est déduite d'un sous-système de $m-k+1$ contraintes pour $m-k$ inconnues, donc le nombre maximum de relations déduites d'un tel sous-système sur-déterminé est de C_m^{m-k-1} .

III.1.2.2 Contraintes sur les couplages

Jusqu'à présent, aucune hypothèse n'avait été faite sur la possibilité d'extraire une variable d'une relation. Pourtant, certaines relations ne permettent pas de calculer directement certaines variables, c'est le cas de toutes les fonctions non inversibles (hystérésis, seuil,...). Il est donc

intéressant de prendre en compte ces informations, afin d'établir un système de surveillance capable de générer des relations de redondance analytique réellement évaluables.

On définit alors un modèle structurel de calculabilité par une application r :

$$\begin{aligned} r : F \times X &\rightarrow (0, 1) \\ (f_i, x_j) &\rightarrow r(f_i, x_j) \end{aligned}$$

où $r(f_i, x_j) = 1 \Leftrightarrow x_j$ est calculable par la relation f_i .

L'ensemble des couples (f_i, x_j) tels que $r(f_i, x_j) = 1$ est appelé r -structure du système. Par définition, la r -structure est incluse dans la structure et l'ensemble des couples (f_i, x_j) dans lequel f_i est une relation de connaissance incluse dans la r -structure.

La recherche du couplage complet se fait alors dans la r -structure. Les résidus qui en découlent sont alors calculables.

III.1.2.3 Sensibilités des résidus

Le calcul d'un résidu utilise un certain nombre de variables. Une défaillance sur l'une d'elles fait varier la valeur calculée du résidu et peut aboutir à la détection d'une défaillance. Mais toutes les variables n'interviennent pas de la même manière dans le calcul et n'ont donc pas la même influence sur celui-ci. On peut retrouver cette influence à partir de l'expression analytique du résidu, dont la valeur change proportionnellement au coefficient multiplicateur de la variable qui est en panne. On définit alors une matrice de sensibilités M_s de dimension $q \times n$, avec

$$q = \text{Card}(R) = \text{nombre de résidus}$$

et

$$n = \text{Card}(X) = \text{nombre de défaillances}$$

et de coefficients M_{sij} ($i = 1$ à q et $j = 1$ à n) tels que:

$$M_{sij} = \text{coefficient de la variable } j \text{ dans le résidu } i.$$

Remarque: cette matrice ne peut être définie que si les résidus dépendent linéairement des variables, sinon on ne peut pas trouver de coefficient multiplicatif constant.

III.2 Application au serrage hydraulique

III.2.1 Génération des résidus

III.2.1.1 Utilisation du logiciel D3

Un logiciel appelé D3 (Détection Diagnostic de Défaillance) a été spécialement conçu, par l'équipe ASPIC du LAIL, pour la conception de systèmes de surveillance. Ce logiciel utilise l'analyse structurelle et peut traiter les systèmes comportant un nombre important de relations et de variables, et génère la séquence de calcul des résidus. Le travail de génération manuel des séquences de calcul peut être très long et fastidieux en raison de son aspect combinatoire.

Le logiciel a besoin en entrée uniquement d'un fichier qui contient la structure du modèle : le nom de la relation suivi du nom des variables connues ou inconnues qu'elle fait intervenir. Ensuite, le logiciel donne directement une bloc-triangularisation possible de la matrice d'incidence. Il fournit les séquences de calcul des relations de redondance analytique de base ainsi que les signatures de défaillances des capteurs utilisés. En fournissant les équations du modèle, les valeurs des paramètres et les bornes de fonctionnement nominal du système, le logiciel détermine les seuils de détection des résidus.

Dans cette application, nous n'utilisons uniquement que la partie structurelle du logiciel. Nous reprenons les séquences de calcul des résidus, puis nous calculons les résidus à partir des équations du modèle.

III.2.1.2 Contraintes sur le modèle

Un certain nombre de contraintes a été pris en compte lors de la conception du système de surveillance, afin de respecter les non-linéarités du système physique. Ces contraintes se traduisent par l'impossibilité de certaines variables d'être extraites d'une relation pour respecter la non-inversibilité de la relation. Ces relations sont :

- le seuil de saturation $I_{s_{max}}$ de la tension de la servo-valve I_s ,
- les fonctions de transfert et les intégrations en raison des conditions initiales inconnues,
- le signe de la vitesse de déplacement vérin V qui ne permet pas d'estimer V .

III.2.2 Analyse structurelle du système

Les résultats obtenus en appliquant l'analyse structurelle sur le modèle de serrage hydraulique d'une cage de laminoir sont présentés dans ce paragraphe en commençant d'abord par l'analyse des résidus, puis en évaluant les performances du système de surveillance.

III.2.2.1 Analyse des résidus pour l'instrumentation initiale

En utilisant l'instrumentation disponible, 3 relations de redondance analytique (RRA) de base sont générées (R 1, 2 et 5) représentant chacune un sous-système de base : régulateur, cage et l'ensemble servo-valve - tuyauterie - vérin. Trois autres relations de redondance analytique sont des combinaisons des 3 relations de redondance analytique de base et représentent des sous-systèmes combinaison des sous-systèmes de base.

La structure des résidus en fonction des mesures est la suivante :

	Pa_m	Is_m	Pv_m	X_m
R 1	0	1	0	0
R 2	0	0	1	1
R 3	1	0	1	1
R 4	1	1	0	1
R 5	1	1	1	1
R 6	1	0	0	1

Tableau II.1 : Système de surveillance S1 pour l'instrumentation initiale.

Chacune de ces relations de redondance analytique fait intervenir les équations d'un ou de plusieurs sous-systèmes auxquels elle est associée :

- R 1 : régulateur
- R 2 : cage
- R 3 : régulateur et servo-valve - tuyauterie - vérin
- R 4 : servo-valve - tuyauterie - vérin et cage
- R 5 : servo-valve - tuyauterie - vérin
- R 6 : régulateur, servo-valve - tuyauterie - vérin et cage

Remarque 1 : la relation de redondance analytique 5 utilise toutes les mesures, elle augmente la distance d'une défaillance par rapport au fonctionnement normal, mais pas par rapport à un autre type de défaillance. Elle permet donc la détection, mais n'est pas utile pour la localisation des défaillances capteurs.

Remarque 2 : toutes les signatures des capteurs sont différentes, mais les signatures de la pression alimentation (Pa) et de la pression dans le vérin (Pv) sont totalement incluses dans la signature de la sortie X . Ceci signifie qu'en cas de défaillances multiples, une défaillance de X peut cacher une défaillance simultanée d'un des capteurs de pression.

III.2.2.2 Génération des résidus pour l'instrumentation complémentaire.

L'ajout de capteurs supplémentaires permet de décomposer certains des sous-systèmes en plusieurs sous-systèmes élémentaires. Pour l'instrumentation initiale, le système était décomposé en trois sous-systèmes : régulateur, cage et ensemble servo-valve - tuyauterie - vérin. La mesure de Q_v permet de découpler la partie vérin de la tuyauterie et la mesure de P_s d'isoler la partie tuyauterie de la servo-valve. On dispose ainsi de 5 sous-systèmes, reliés entre eux par des variables physiques mesurées.

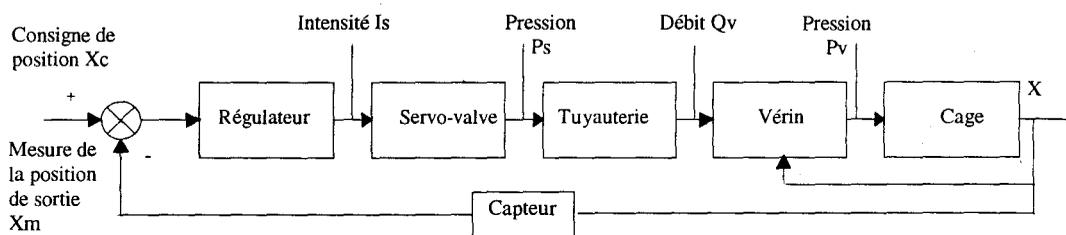


Figure II.2 : Schéma simplifié du serrage hydraulique

On suppose que l'on dispose de 6 mesures. Le système comporte 9 variables inconnues (Pa , Is , Q_v , Pv , Ps , Q_s , X , $Flam$, V) et 14 fonctions: les 8 relations analytiques et les 6 mesures.

Grâce à cette instrumentation, on peut réaliser un couplage qui permet de générer 5 relations de redondance analytique de base, dont les signatures binaires sont données ci-dessous :

	Pa	Is	Qv	Ps	Pv	X
R 1	1	1	1	1	1	0
R 2	0	0	1	1	1	0
R 4	0	1	0	0	0	0
R 5	0	0	1	0	1	1
R 6	0	0	0	0	1	1

Tableau II.2 : Structure du système S2 pour l'instrumentation complémentaire - RRA de base.

Chacune de ces relations de redondance analytique est associée à un sous-système indépendant :

R 1 : servo-valve

R 2 : tuyauterie

R 4 : régulateur

R 5 : vérin

R 6 : cage

Pour obtenir une plus grande capacité de localisation des défaillances, on cherche de nouvelles relations de redondance analytique par de nouveaux couplages. Il est ainsi possible d'obtenir 18 nouvelles relations de redondance analytique combinaisons des 5 premières.

Dans la dernière colonne du tableau se trouve la séquence de calcul de la relation de redondance analytique, indiquée dans l'ordre de calcul, par l'initiale du sous-système concerné : S : Servo-valve, T : Tuyauterie, R : Régulateur, V : Vérin, C : Cage.

	Pa	Is	Qv	Ps	Pv	X	Séquence
R 1	1	1	1	1	0	0	S
R 2	0	0	1	1	1	0	T
R 3	1	0	1	1	0	0	RS
R 4	0	1	0	0	0	0	R
R 5	0	0	1	0	1	1	V
R 6	0	0	0	0	1	1	C
R 7	0	0	1	1	0	1	TV
R 8	0	0	1	1	0	1	TC
R 9	0	0	0	1	0	1	TVC
R 10	0	0	0	1	1	1	VT
R 11	1	1	0	0	1	1	VTS
R 12	1	0	0	1	1	1	VSR
R 13	1	1	0	1	1	1	VS
R 14	1	1	1	0	1	0	TS
R 15	1	0	1	0	1	0	TSR
R 16	1	0	0	0	1	1	VTSR
R 17	1	1	0	0	0	1	VTS
R 18	1	0	0	1	0	1	CVSR
R 19	1	1	0	1	0	1	CVTS
R 20	0	0	1	0	0	1	CV
R 21	1	0	1	0	0	1	CTS
R 22	1	1	1	0	0	1	CTSR
R 23	1	0	0	0	0	1	CVTSR

Tableau II.3 : Structure du système S2 complet pour l'instrumentation complémentaire.

Désormais, aucune signature n'est incluse dans une autre. Toutes les défaillances de capteurs sont donc parfaitement localisables au sens structurel dans le cas d'une défaillance unique.

Remarque : L'instrumentation complémentaire comporte les mêmes capteurs que l'instrumentation initiale complétée par deux nouvelles mesures. Les relations de redondance analytique générées sans ces deux mesures sont les mêmes que les relations générées par l'instrumentation initiale. La correspondance entre les deux ensembles est la suivante :

Instrumentation initiale	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Instrumentation complémentaire	R4	R6	R16	R17	R11	R23

Tableau II.4 : Correspondance entre les relations de redondance analytique pour l'instrumentation initiale et complémentaire.

IV Procédure de décision par reconnaissance logique

Après avoir établi un ensemble de relations de redondance analytique, il s'agit maintenant de les utiliser pour détecter une défaillance et pour la localiser. La procédure de décision doit réaliser ces deux fonctions.

IV.1 Procédure de décision

Dans le cas de la procédure de décision en logique binaire, pour chacun des résidus, deux hypothèses sur le fonctionnement normal du sous-système associé au résidu, sont faites :

- H_0 : l'hypothèse que le sous-système est en fonctionnement normal
- H_1 : l'hypothèse que le sous-système est défaillant

Le rôle de la procédure de décision dans ce cas est de:

- détecter la défaillance, c'est à dire indiquer quelle est celle des deux hypothèses H_0 ou H_1 qui est la plus probable
- localiser la défaillance quand elle a été détectée.

IV.1.1 Evaluation d'un résidu

Lorsqu'il y a une défaillance, le résidu n'est plus proche de zéro. On définit alors un seuil qui détermine la limite entre le fonctionnement normal (H_0) et la défaillance (H_1).

Ce seuil permet seulement de choisir une hypothèse de fonctionnement, H_0 ou H_1 , car il existe toujours une probabilité de détection d'une anomalie en fonctionnement normal (P_{fa} : probabilité de fausse alarme) et une probabilité de non détection (P_{nd}) [COCQ 93].

Supposons connues, par exemple en utilisant des tests statistiques (cf chapitre 4), les densités de probabilité $p(r_i/H_0).P(H_0)$ et $p(r_i/H_1).P(H_1)$ représentant les probabilités que r_i appartienne aux hypothèses H_0/H_1 .

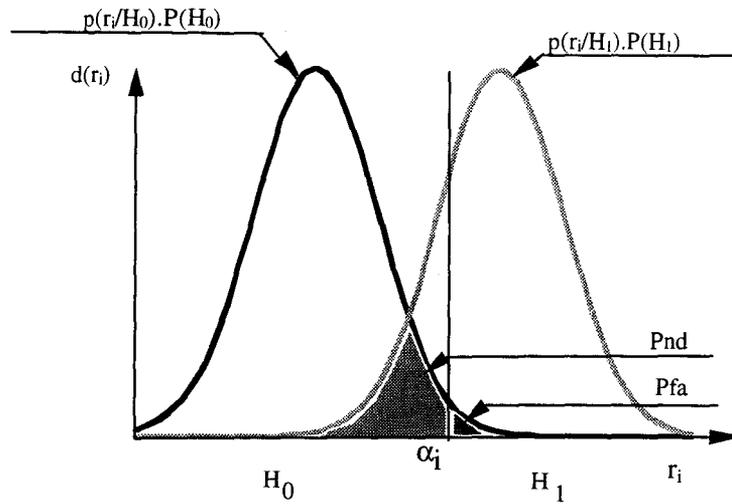


Figure II.3 : Seuil.

Le choix du seuil α_i fait apparaître les probabilités Pfa et Pnd, soit :

$$Pfa = 1 - \int_{-\alpha_i}^{\alpha_i} p(r_i/H_0).P(H_0) dr_i$$

$$Pnd = \int_{-\alpha_i}^{\alpha_i} p(r_i/H_1).P(H_1) dr_i$$

Les valeurs de Pna et Pnd sont donc fixées par un cahier des charges qui permet d'en déduire le seuil α_i . Par exemple, si le résidu r_i a une densité de probabilité correspondant à une loi normale, pour une probabilité de fausse alarme Pfa de 1%, le seuil du résidu i sera donc :

$$\alpha_i = 3.\sigma_{r_i}$$

où σ_{r_i} est l'écart-type du résidu i .

Si $r_i < \alpha_i$ alors on fait l'hypothèse H_0 (fonctionnement normal).

Si $r_i \geq \alpha_i$ alors on fait l'hypothèse H_1 (fonctionnement défaillant).

IV.1.2 Signatures de défaillances

A l'ensemble des causes de défaillances à surveiller (fixé par le cahier des charges) est associé un sous ensemble de l'ensemble des variables connues D , afin de surveiller également les défaillances capteurs.

On définit le modèle structurel sr du système de surveillance par :

$$sr : \quad R \times D \rightarrow \{0, 1\}$$

$$(r_i, d_j) \rightarrow sr(r_i, d_j)$$

où $sr(r_i, d_j) = 1 \Leftrightarrow d_j$ apparaît dans la relation de redondance r_i .

La signature binaire d'une cause de défaillance d_j relative à l'ensemble R [GERT 88] est définie par le vecteur binaire s_j :

$$s_j = [a_{1j} \ a_{2j} \ \dots \ a_{qj}]^T \text{ avec } q = \text{card}(R) \text{ et } a_{ij} = sr(r_i, d_j)$$

Elle indique quelles sont les relations de redondance qui sont perturbées par la défaillance d_j ($a_{ij} = 1$), et celles qui restent vérifiées ($a_{ij} = 0$).

La signature binaire du fonctionnement normal est le vecteur nul (tous les résidus sont proches de 0).

IV.1.3 Localisation

Si on traite individuellement chacun des q résidus pour détecter un changement de valeur, on aboutit à un vecteur binaire de dimension q appelé vecteur de cohérence (V_c) dont les composantes à 1 sont les relations de redondance pour lesquelles une défaillance a été détectée.

Ce vecteur de cohérence est ensuite comparé aux différentes signatures de défaillances et à la signature de fonctionnement normal. Pour effectuer cette comparaison, on peut prendre comme mesure la distance de Hamming (appelée D_j), qui compare les deux vecteurs bit à bit, et est incrémentée de 1 à chaque différence (0-1 ou 1-0).

$$D_j = \|V_c - s_j\|$$

On décide alors, que l'élément de C dont la signature est la plus proche du vecteur de cohérence, est défaillant.

IV.1.4 Structuration des résidus

La capacité de localisation du système de surveillance dépend des signatures. Le système de surveillance est d'autant plus performant que les signatures sont différentes, c'est-à-dire que les points représentant les vecteurs de signatures binaires dans l'espace $\{0,1\}^q$ sont plus éloignés.

Pour calculer cette distance, on choisit de nouveau la distance de Hamming. Cette distance s'interprète en termes de nombre de sommets qui séparent les 2 sommets dans l'hypercube $\{0,1\}^q$ [CASS 92b]. Deux signatures identiques ne peuvent pas servir à différencier deux défaillances, tandis que deux signatures différentes permettent de localiser une défaillance à partir du vecteur de cohérence en choisissant la signature la plus proche, à condition que le vecteur de cohérence ne subisse pas de dégradation, c'est-à-dire que certaines de ses composantes se placent dans une mauvaise hypothèse (due à la fausse alarme et à la non détection). Par conséquent, le nombre de dégradations maximum que l'on peut tolérer est de k si les signatures sont distantes d'au moins $2k+1$ [CASS 94a] dans le cas d'une défaillance simple.

IV.2 Application au serrage hydraulique

IV.2.1 Distances entre signatures des défaillances capteurs

Pour l'instrumentation initiale, les signatures de défaillances permettent de calculer les distances entre chaque signature de défaillance et de chacune de ces signatures avec le fonctionnement nominal (Ok) qui correspond à une signature égale au vecteur nul. Les distances correspondantes sont indiquées dans le tableau suivant :

	Is	Pv	X	Ok
Pa	3	3	1	4
Is		4	4	3
Pv			2	3
X				5

Tableau II.5 : Distance entre signatures de défaillances du système S1.

La distance minimum entre 2 signatures est de 1; on ne peut donc considérer aucune dégradation du vecteur de cohérence (cf. IV.1.4).

Pour le système de 6 capteurs de l'instrumentation complémentaire, on obtient les distances suivantes :

	Is	Qv	Ps	Pv	X	Ok
Pa	8	13	13	12	10	14
Is		13	13	12	15	8
Qv			12	13	16	11
Ps				13	12	11
Pv					13	10
X						17

Tableau II.6 : Distance entre signatures de défaillances du système S2.

3 dégradations maximum sont ainsi tolérables sur la signature de défaillance (distance minimale de 8).

Pour les défaillances capteurs, la dimension du vecteur de cohérence passe de 6 à 23 entre l'instrumentation initiale et l'instrumentation complémentaire. Dans ce dernier cas, il est donc globalement plus robuste vis à vis des fausses alarmes et non détections.

IV.2.2 Surveillance des paramètres

Surveillance des paramètres à l'aide de 4 capteurs : (Pa, X, Pv, Is).

Les paramètres surveillés sont les suivants : β , ξ , ω_o , Qn_h , Qn_b , Qf , f , F_c , μ_v , R , K_r et K_l . Dans le cas où certains paramètres sont associés 2 à 2, on ne fera apparaître qu'un seul des deux, l'autre étant implicite. Ces couples sont : ξ et ω_o les paramètres de la fonction de transfert du deuxième ordre de la servo-valve, Qn_h et Qn_b les coefficients d'orifice du débit de la servo-valve en serrage ou en desserrage, f et μ_v les frottements sec et visqueux du vérin.

Les signatures des paramètres K_r , ξ , Qn , Qf , β , F_c , f , R et K_l sont ajoutées pour le système S1. En plus des quatre capteurs et des 8 relations de contraintes analytiques cela fait 18 fonctions et 15 variables connues.

	Kr	ξ	Qn	Qf	β	F_c	f	R	K_l	Pa	Is	Pv	X
R 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R 2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
R 3	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
R 4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
R 5	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
R 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Tableau II.7 : Structure complète des défaillances liées aux paramètres pour le système S1.

Le nombre de relations de redondance analytique est insuffisant pour isoler toutes les défaillances. Sept types de défaillances ont la même signature : $Pa, \beta, \xi, Qn, Qf, R, K_1$. Si l'un de ces éléments est défaillant, on est incapable de le localiser par rapport aux 6 autres. De même, il existe 10 couples où l'une des signatures est incluse dans l'autre. Ceci est dû au fait que la variation de position des vérins (X) intervient dans le calcul de toutes les relations de redondance analytique.

Pour pouvoir augmenter le nombre de relations de redondance analytique, il faut obligatoirement augmenter le nombre de capteurs. Les performances du système de surveillance vont dépendre du nombre d'indicateurs de défaut disponibles. Plus ce nombre sera grand, plus le nombre d'indicateurs influencés par une défaillance sera important.

Les signatures de défaillances liées aux paramètres et capteurs pour les 23 relations de redondance analytique correspondant à l'instrumentation complémentaire sont illustrées en annexe 3. Avec ce second système plus complet, chacun des paramètres K_1, β et R a une signature distincte des signatures des paramètres Pa, ξ, Qn, Qf .

V Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la surveillance et le principe de l'analyse structurelle. Les capacités de localisation des ensembles de résidus générés ont été obtenues uniquement sur la base de la structure théorique des résidus. Dans la prochaine partie, nous introduirons et définirons les modèles qui serviront à une étude plus approfondie de la surveillance. Sans anticiper sur les résultats obtenus, l'étude de l'instrumentation complémentaire a montré que cette instrumentation permet, par rapport à l'instrumentation initiale, d'isoler structurellement toutes les défaillances capteurs, et de différencier des paramètres dont la signature était confondue avec celle d'autres paramètres pour l'instrumentation initiale.

Chapitre 3 : Modèles pour la surveillance du serrage hydraulique

L'analyse structurelle ne conserve que les liens entre les variables du système. Cependant, afin de faire une évaluation de la surveillance, nous arrivons à l'étape où l'introduction d'un modèle analytique complet du système devient indispensable. La génération des résidus nécessite de connaître dans un premier temps uniquement la structure du système. Les séquences de calcul fournissent l'ordre de substitution des équations. Pour calculer et évaluer les résidus, toutes les équations du système définissant un modèle du processus doivent être introduites. Ce modèle doit reproduire le mieux possible le comportement du système physique réel.

En effet, l'élaboration pratique du cahier des charges nécessite un modèle précis. Le modèle du processus doit se comporter comme le système réel, afin que les réponses temporelles soient représentatives de l'état de fonctionnement du système. De plus, un modèle précis permettra la conception d'un simulateur fidèle au système.

Ce simulateur a pour intérêt de pouvoir simuler toutes les défaillances librement, sans risquer d'endommager le système ou de produire hors spécification. Il est difficile, par exemple, d'imposer individuellement une défaillance de la compressibilité de l'huile. Le simulateur permet de réaliser tout type de défaillance, pour les paramètres désirés, à des instants précis et choisis. Ainsi, toute l'étude du cahier des charges et des performances de la surveillance pourra se faire grâce au simulateur.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les divers modèles utilisés pour la surveillance et la conception du simulateur. Tout d'abord, l'introduction d'un modèle analytique du serrage hydraulique et l'analyse des résidus nous inciteront à préciser une partie de ce modèle, correspondant au comportement simplifié de la cage. Ensuite, ce modèle permettra de concevoir un simulateur du processus. Nous définirons le modèle des bruits et incertitudes du modèle. A partir des résidus évalués avec les sorties du simulateur, nous chercherons à ajouter du bruit sur les sorties afin que ces résidus aient la même distribution statistique que les résidus évalués avec les sorties mesurées. Dans une troisième partie, nous décrirons les modèles des défaillances introduites dans le simulateur, ainsi que les procédures de simulation. Enfin, le simulateur ainsi calé nous permettra de définir pratiquement le cahier des charges à partir des spécifications définies dans le chapitre 2.

1 Modèle de la cage du serrage hydraulique

I.1 Génération des résidus

L'introduction dans le modèle complet du serrage hydraulique des entrées et sorties, et des valeurs nominales des paramètres permettent d'évaluer numériquement les résidus à chaque instant. Il existe deux manières d'évaluer ces résidus, créant ainsi deux ensembles de résidus :

- le premier est obtenu en utilisant les entrées et sorties mesurées sur site lors du laminage des quatre bandes d'acier par l'IRSID. Les résidus sont appelés 'résidus de mesure' et notés RM1 à RM6 pour l'instrumentation initiale (voir chapitre 2, III.2).

- le second est obtenu en utilisant les sorties du simulateur alimenté par les entrées mesurées sur site. Les résidus sont appelés 'résidus de simulation' et sont notés R1 à R6 pour l'instrumentation initiale.

Il n'est pas possible d'obtenir les résidus de mesure de l'instrumentation complémentaire, car on ne dispose pas individuellement des mesures supplémentaires Q_v et P_s .

1.1.1 Calculs des résidus pour l'instrumentation initiale

Pour être exploitable en terme de surveillance, en fonctionnement normal, les résidus obtenus doivent être indépendants de toutes les variables du système. Leur moyenne doit rester proche de zéro, et leur écart-type doit rester constant.

Lorsque l'on calcule numériquement les résidus en utilisant les mesures sur site (instrumentation initiale), on s'aperçoit qu'un résidu (RM2) n'a pas l'aspect attendu (voir figure III.1). En effet, à l'exception de la bande n°1, sa moyenne suit une évolution qui indique que le résidu dépend d'une ou plusieurs variables. L'allure du résidu va donc varier en fonction de l'évolution des variables dont elle dépend. Les procédures de décision vont alors détecter une défaillance dès que ces variables évoluent, ce qui provoquera des fausses alarmes. Aussi, ce résidu n'est pas exploitable en l'état pour la surveillance.

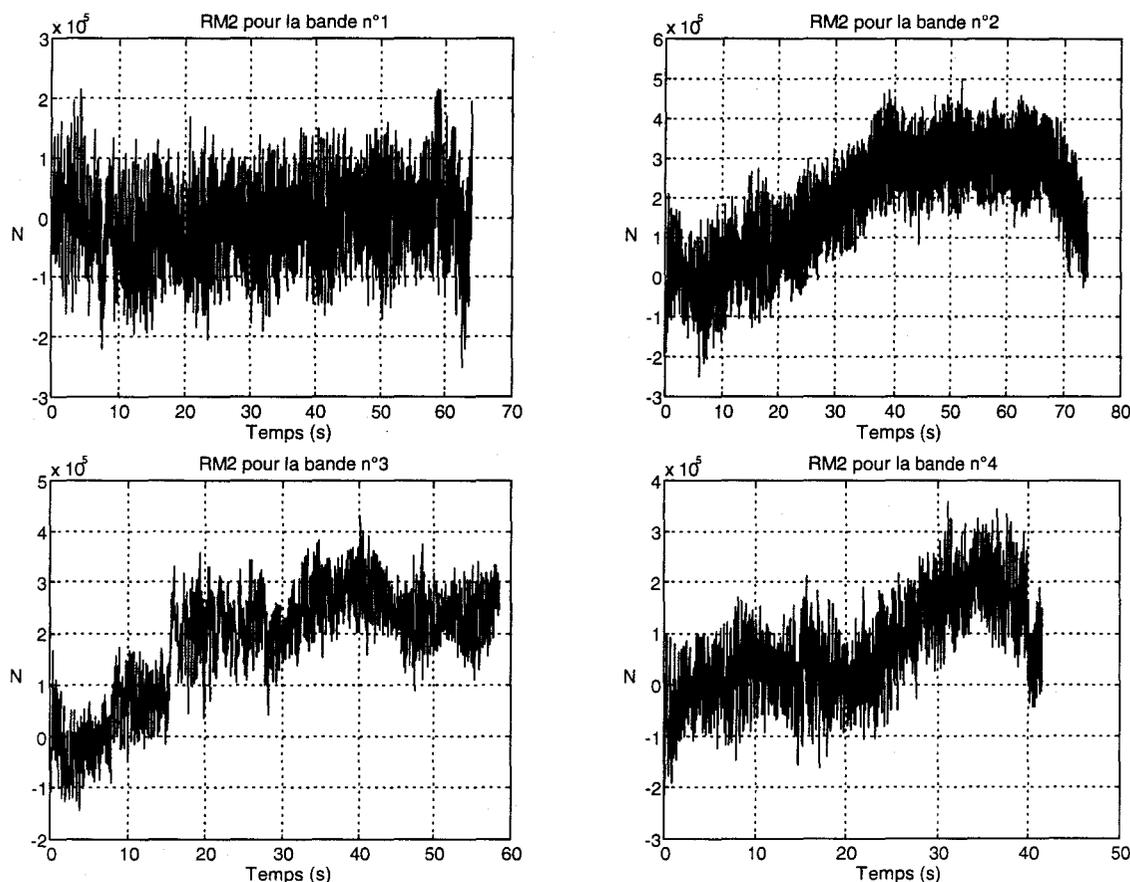


Figure III.1 : Allures des résidus RM2 pour les quatre bandes d'acier laminées.

1.1.2. Analyse des résidus

Le résidu RM2 utilise la relation cage. Son expression analytique est la suivante :

$$2A.P_v - M_{ced} . [\Delta H_s + X + S_0] - 2.F_{worb} - P_v . \mu_v . sg(V) - F_{cste} . sg(V) - f.V - M . \gamma - P_{empi} = 0$$

où P_v , ΔH_s , X et F_{worb} sont des entrées connues, V est la dérivée de X , γ est la dérivée seconde de X .

Les paramètres de cette relation ne sont pas tous connus avec certitude. Ainsi, le paramètre de frottement sec f est difficile à estimer pratiquement, et la valeur dont on dispose peut être sensiblement différente de la valeur réelle lors des acquisitions au cours du laminage de la bande métallique considérée. Cependant, une variation de ce paramètre ne permet pas d'expliquer la variation de la valeur moyenne du résidu, puisqu'il intervient en facteur de la dérivée première de la sortie. Son influence portera donc uniquement sur l'écart-type du résidu.

Ces imprécisions sont compensées dans le comportement du système régulé globalement. C'est pourquoi le modèle entrée/ sortie du système régulé peut être satisfaisant sans que les modèles particuliers le soient.

I.2 Evolution du modèle cage

L'analyse du résidu calculé à partir du modèle de la cage et des mesures disponibles montre que cette partie du modèle du serrage hydraulique comporte encore des imprécisions trop importantes pour pouvoir être utilisée pour la surveillance.

Dans cette partie nous nous proposons à partir des mesures disponibles d'améliorer la précision du modèle cage. Nous montrerons comment ce dernier a du être modifié dans sa structure en prenant en compte divers phénomènes physiques secondaires. Nous utiliserons des méthodes d'identification paramétrique dont les aspects théoriques seront présentés. L'identification de cette partie du modèle du serrage hydraulique utilise les acquis de l'étude théorique et fournit un modèle dont le résidu est présenté et analysé.

I.2.1 Principe

On cherche à réécrire la relation RM2 afin de faire apparaître une fonction de transfert comportant les paramètres indéterminés.

Il semble cependant que l'allure du résidu RM2 (voir figure III.2 pour la bande n°4) peut être expliquée par la déformation que subit l'empilement des cylindres de la cage lors du passage de la bande métallique entre les cylindres. Cette déformation dépend non seulement de l'effort de laminage exercé par la tôle sur les cylindres de travail mais aussi des forces de contre-flexion (utilisées pour compenser les variations de bombé de la tôle et corriger les défauts de planéité) ainsi que de la vitesse de rotation des cylindres (effet du film d'huile des paliers des cylindres de soutien).

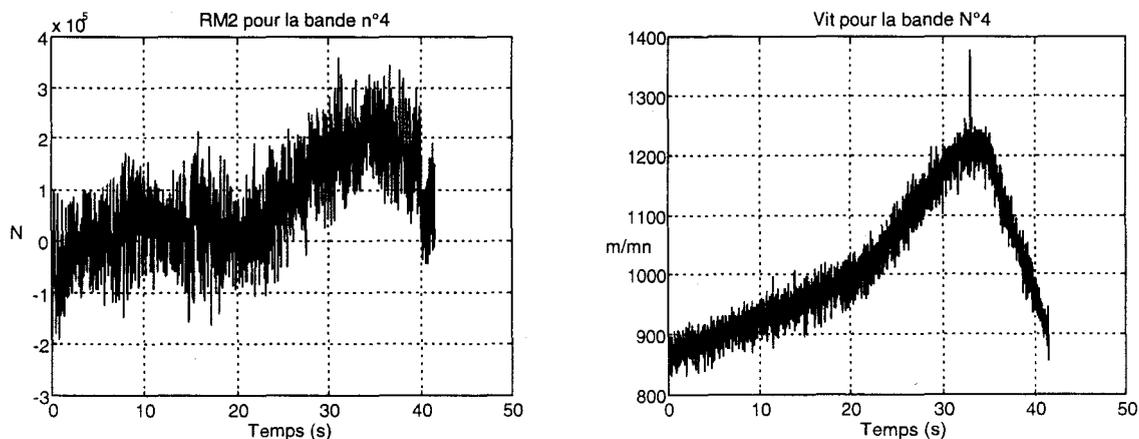


Figure III.2 : Comparaison des allures du résidu RM2 et de la vitesse de rotation des cylindres pour la bande n°4.

On écrit en fait que le cé dage (Δ_{cd}) de la cage est une fonction de la force de laminage Flam, de la vitesse de rotation (Vit) des cylindres ainsi que de la force de contre-flexion Fworb. On introduit alors deux nouvelles inconnues Mced2 et Mced3 représentant le gain d'influence de ces variables :

$$\Delta_{cd} = \Delta H_s + X = \frac{Flam - Flam_p}{Mced} + \frac{1}{Mced2} 2.(Fworb - Fworb_p) + \frac{1}{Mced3} .(Vit - Vit_p)$$

L'indice p correspond aux valeurs du point de fonctionnement cage en tête de tôle, avant action de la régulation d'épaisseur AGC. Ces valeurs sont obtenues par exploitation des premiers points stabilisés de l'enregistrement, juste après l'impact bande dans la cage.

Soit :

$$Flam = Mced . [\Delta H_s + X] - 2 . \frac{Mced}{Mced2} . (Fworb - Fworb_p) - \frac{Mced}{Mced3} . (Vit - Vit_p) + Flam_p$$

$$Flam = Mced . [\Delta H_s + X] + Mced . S'_0$$

avec

$$S'_0 = -2 . \frac{1}{Mced2} . (Fworb - Fworb_p) - \frac{1}{Mced3} . (Vit - Vit_p) + \frac{Flam_p}{Mced}$$

On réécrit donc la relation RM2 sous la forme:

$$2A . Pv - Mced . [\Delta H_s + X] - 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) . Fworb + \frac{Mced}{Mced3} Vit - Pv . \mu_v . sg(V) - Fcste . sg(V) - f . V - M . \gamma - Pempi - Mced . S_0 = 0$$

$$\text{où } S_0 = -2 . \frac{1}{Mced2} Fworb_p - \frac{1}{Mced3} . Vit_p - \frac{Flam_p}{Mced}$$

est constant durant le laminage d'une bande.

On obtient alors la relation suivante définie entre 1 sortie (X) et 4 entrées (2.Fworb, Pv, Vit, ΔH_s), avec les constantes S_0 et Pempi :

$$X = \frac{2 . A}{Mced + f . p + M . p^2} . Pv + \left(\frac{Mced}{Mced2} - 1 \right) . \frac{1}{Mced + f . p + M . p^2} (2 . Fworb + Pempi) + \frac{Mced}{Mced3} Vit - \frac{Mced}{Mced + f . p + M . p^2} . (\Delta H_s + S_0)$$

Que l'on peut encore écrire :

$$X = G(p) . \left(2 . A . Pv + (2 . Fworb + Pempi) . \left(\frac{Mced}{Mced2} - 1 \right) - Mced (\Delta H_s + S_0) + \frac{Mced}{Mced3} Vit \right)$$

où

$$G(p) = \frac{1}{Mced + f . p + M . p^2}$$

Cette fonction de transfert a été extraite de la fonction de transfert complète du système. Le système étant bouclé, on sait que les méthodes traditionnelles de l'identification ne s'appliquent pas dans ce cas, car la sortie est corrélée avec l'entrée. Des méthodes d'identification en boucle fermée ont été développées ces dernières années [VDH 95] [GEVE 95], mais se limitent pour l'instant aux systèmes linéaires. La matrice de sensibilité du serrage hydraulique n'est pas déductible puisque le système est non-linéaire en boucle fermée. On ne dispose donc que de méthodes d'identification en boucle ouverte.

Pour compléter le calage du modèle lié à RM2, on cherche donc à déterminer par identification les paramètres de la relation cage en utilisant les mesures. A partir de l'écriture en fonction de transfert [4 entrées/ 1 sortie] présentée auparavant, on utilise un modèle de type ARX en considérant le système en boucle ouverte.

1.2.2 Identification d'un modèle ARX

1.2.1.1 Modèle ARX

La fonction de transfert entre une entrée u et une sortie y s'écrit pour un système échantillonné, en utilisant l'opérateur de retard q^{-1} :

$$y(t) = G(q)u(t) = \frac{N(q)}{D(q)}u(t)$$

où D et N sont des polynômes en q :

$$D(q) = 1 + \sum_{i=1}^{nd} d_i q^{-i} \text{ et } N(q) = \sum_{i=1}^{nn} n_i q^{-i}$$

L'identification est réalisée entre les signaux d'entrée et de sortie en utilisant un modèle de type ARX (Auto Régressive with eXternal input) et le critère des moindres carrés :

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (1)$$

où

$$A(q) = 1 + \sum_{i=1}^{na} a_i q^{-i} \text{ et } B(q) = \sum_{i=1}^{nb} b_i q^{-i}$$

et $e(t)$ est un bruit blanc.

Soit :

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t)$$

En écrivant :

$$z(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-na) \quad u(t-nk) \quad \dots \quad u(t-nk-nb+1)]^T$$

et

$$\theta = [a_1 \quad \dots \quad a_{na} \quad b_1 \quad \dots \quad b_{nb}]^T$$

on obtient la prédiction de la sortie à l'instant t :

$$\hat{y}(t/\theta) = z^T(t)\theta$$

La recherche du meilleur modèle revient alors à la détermination du paramètre θ [LJUN 87].

La qualité du modèle obtenu sera quantifiée par un critère appelé erreur de prédiction :

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t/\theta)$$

où $\hat{y}(t/\theta)$ désigne la prédiction à l'instant t pour le modèle donné en supposant les mesures antérieures connues.

On cherche donc à minimiser ce critère. Par souci de généralité, supposons que l'erreur de prédiction soit filtrée par un filtre stable $L(q)$:

$$\varepsilon_F(t, \theta) = L(q)\varepsilon(t, \theta)$$

On définit la norme :

$$V_N(\theta, z) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ell(\varepsilon_F(t, \theta))$$

où ℓ est une fonction scalaire positive. La fonction V_N est une fonction à valeurs scalaires positives du vecteur des paramètres du modèle θ .

L'estimation $\hat{\theta}$ de θ est alors définie par la minimisation de la fonction $V_N(\theta, z)$:

$$\hat{\theta} = \arg \min V_N(\theta, z)$$

Cette façon d'estimer θ est utilisée par plusieurs techniques bien connues et fréquemment utilisées. Cet ensemble de techniques est appelé méthodes d'erreurs de prédictions généralisées [LJUN 87]. Des méthodes particulières sont obtenues par un choix particulier de la fonction ℓ et du filtre $L(q)$.

Un choix particulier de la norme ℓ est la norme quadratique :

$$\ell(\varepsilon) = \frac{1}{2} \varepsilon^2$$

1.2.1.2 Critère des moindres carrés

La régression linéaire utilise l'estimateur défini précédemment :

$$\hat{y}(t|\theta) = z^T(t)\theta$$

L'erreur de prédiction avec $L(q) = 1$, devient :

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - z^T(t)\theta$$

La fonction $V_N(\theta, z)$ est définie en utilisant la norme quadratique :

$$V_N(\theta, z) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} [y(t) - z^T(t)\theta]^2$$

Cette fonction est alors appelée critère des moindres carrés pour la régression linéaire précédente. La propriété de ce critère est qu'il est quadratique en θ . Ainsi, il peut être minimisé analytiquement, dans le cas où l'inverse suivante existe, et la solution est unique :

$$\hat{\theta} = \arg \min V_N(\theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t)z^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t)y(t)$$

où $\hat{\theta}$ est l'estimateur des moindres carrés.

1.2.1.3 Moindres carrés généralisés

Le principal inconvénient de la méthode des moindres carrés réside dans le non respect de la propriété asymptotique de consistance. Si l'erreur de prédiction n'est pas un bruit blanc, l'estimation des moindres carrés ne converge pas vers le vecteur de paramètres vrais. Pour pallier ce problème, il est utile d'introduire un modèle du bruit sous la forme :

$$v'(t) = K(z^{-1})e(t)$$

où e est un bruit blanc et K est un filtre linéaire.

Le modèle devient :

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + K(q)e(t)$$

Pour obtenir une erreur d'équation égale à un bruit blanc, il faut filtrer le modèle par l'inverse de K :

$$A(q)y_f(t) = B(q)u_f(t) + e(t)$$

où

$$y_f = K^{-1}(q)y(t)$$

et

$$u_f = K^{-1}(q)u(t)$$

Puisque e est blanc, la méthode des moindres carrés peut être appliquée au modèle précédent. Finalement, la méthode des moindres carrés généralisés revient à appliquer la méthode des moindres carrés simples à un ensemble de données filtrées. La difficulté réside dans le choix du filtre, c'est à dire du modèle du bruit.

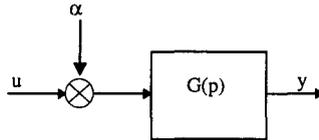
Ce filtre qui décorrèle le bruit des mesures est rarement connu. L'idée initialement proposée par Clarke [CLAR 67] est d'estimer également les paramètres du filtre de manière récursive et de faire converger ces paramètres estimés vers les paramètres du filtre réel. Cela revient à sur-dimensionner le vecteur des paramètres du modèle pour estimer en ligne le modèle du bruit.

1.2.3 Influence d'une constante dans l'identification

La plupart des signaux qu'il faut traiter comportent des perturbations de basses fréquences, des offsets ou des moyennes non nulles. Si l'on ne prend pas en compte cette information, l'identification sera biaisée.

Ajout d'une entrée constante sur le système

Si le signal d'entrée est représentatif du signal à une constante près, il est alors possible de représenter le système réel de la manière suivante :



Disposant des mesures de u et y , la non prise en compte de la constante dans le modèle introduit un biais sur les estimations paramétriques. Deux cas peuvent se présenter : la constante est connue ou non.

- Cas où la constante est connue

Elimination par ajout sur l'entrée non constante

Le cas le plus simple est le cas où la constante est connue. Il suffit de l'ajouter directement à la mesure du signal d'entrée avant l'identification. Le modèle ARX est alors de la forme :

$$A(q)y(t) = B(q)(u(t) + \alpha) + e(t)$$

L'identification se fait en entrant le vecteur d'entrée ainsi corrigé :

$$z = [y(t), u(t) + \alpha]$$

- Cas où la constante n'est pas connue

Elimination par filtrage passe-haut

Dans la plupart des cas, les constantes à identifier ne sont pas connues. En effectuant un filtrage passe-haut, on élimine les composantes lentes du système donc l'effet de la constante sur la sortie du système. Cependant, si le système possède des modes lents, l'identification peut être biaisée par ce filtrage. Le choix de la fréquence de coupure du filtre est alors essentiel pour éliminer l'influence de la constante sans filtrer les modes lents, éventuellement en choisissant un ordre du filtre élevé. Ce choix suppose la connaissance a priori du système et donc des paramètres à identifier. Cette connaissance n'est pas toujours accessible.

Identification de la constante

On peut prendre en compte la constante en rajoutant un paramètre à identifier α multiplicatif d'une entrée w supposée constante.

$$A(q).y(t) = B(q).u(t) + \alpha.w(t) + e(t)$$

$$z = [y(t), u(t), w(t)]$$

où w est un signal constant de valeur connue à chaque instant, que l'on peut prendre égale à 1 par normalisation.

On rajoute alors le paramètre α dans le vecteur θ et une entrée constante dans la matrice z .

On écrit alors :

$$z^T(t) = [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-na) \quad u(t-nk) \quad \dots \quad u(t-nk-nb+1) \quad 1]$$

et

$$\theta^T = [a_1 \quad \dots \quad a_{na} \quad b_1 \quad \dots \quad b_{nb} \quad \alpha]$$

Elimination par moyennage des signaux

L'objectif est d'éliminer la constante en réalisant l'estimation autour d'un point de fonctionnement particulier qui est obtenu par moyennage des signaux :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u(t)$$

Cette estimation ne peut être faite que hors ligne puisque l'on retire aux signaux leur moyenne temporelle sur toute la longueur du vecteur.

L'identification est ensuite réalisée avec les signaux y^* et u^* définis par :

$$y^*(t) = y(t) - \bar{y}$$

$$u^*(t) = u(t) - \bar{u}$$

Le modèle ARX s'écrit alors :

$$A(q).y^*(t) = B(q).u^*(t) + e(t)$$

et la matrice des entrées :

$$z^T(t) = [y^*(t), u^*(t)]$$

1.2.4 Passage du continu au discret

L'identification est réalisée à partir des données échantillonnées avec une période T . Pour retrouver les paramètres physiques, il faut effectuer le passage du cas discret au cas continu, puis retrouver les paramètres physiques en fonction des paramètres de la fonction de transfert continue [BORN 90].

La fonction de transfert que l'on cherche à identifier est en continu :

$$G(p) = \frac{K}{p^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0} p + 1}$$

La transformée en z est réalisée avec un échantillonneur suivi d'un bloqueur d'ordre 0 :

$$B_0(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}$$

donc :

$$G(p)B_0(p) = (1 - e^{-Tp}) \frac{1}{p} \frac{K}{p^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0} p + 1} = (1 - e^{-Tp}) \frac{1}{p} \frac{\frac{K}{ab}}{(1+ap)(1+bp)}$$

où

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{ab}}; \quad \xi = \frac{a+b}{2\sqrt{ab}};$$

a et b sont les constantes de temps de la fonction de transfert du deuxième ordre en continu.

On décompose en éléments simples :

$$\frac{1}{p(1+ap)(1+bp)} = K \left(\frac{1}{p} + \frac{B}{1+ap} + \frac{C}{1+bp} \right) \text{ avec } B = \frac{a^2}{b-a}; \text{ et } C = \frac{b^2}{a-b}$$

La transformée en z donne :

$$Z(G(p), B_0(p)) = K \cdot (1-z^{-1}) \cdot \left(Z\left(\frac{1}{p}\right) + Z\left(\frac{B}{1+ap}\right) + Z\left(\frac{C}{1+bp}\right) \right) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1+a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

avec

$$b_2 = K \cdot \left(D_1 D_2 - \frac{a D_2 - b D_1}{a-b} \right); \quad b_1 = K \cdot \left(\frac{a(1-D_1) - b(1-D_2)}{a-b} \right);$$

$$a_1 = -D_2 - D_1; \quad a_2 = D_2 D_1$$

et

$$D_1 = e^{-\frac{T}{a}}; D_2 = e^{-\frac{T}{b}}$$

où T est la période d'échantillonnage, a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont les paramètres structuraux en échantillonné.

On identifie K, a et b en fonction des paramètres échantillonnés :

$$K = \frac{b_2 + b_1}{1 + a_2 + a_1}; \quad a = \frac{-T}{\ln D_1}; \quad b = \frac{-T}{\ln(-D_1 - a_1)} \text{ avec } D_1 \text{ solution de } x^2 + a_1 x + a_2 = 0$$

Lorsque l'on aura identifié les paramètres structuraux, les paramètres physiques ω_0 , ξ et K seront déduits des équations précédentes.

Influence du pas d'échantillonnage

Le pas d'échantillonnage doit être de l'ordre de 10 à 100 fois supérieur à la fréquence de coupure du système afin d'obtenir une identification correcte. Des essais en faisant varier le pas d'échantillonnage montre que l'estimation des paramètres devient imprécise pour un pas d'échantillonnage trop élevé.

1.2.5 Filtrages des données

1) Intérêt

Les données expérimentales relevées sur le serrage hydraulique sont naturellement bruitées. Le bruit provient de l'incertitude sur les capteurs ainsi que de perturbations diverses et de phénomènes non modélisés. Ces bruits introduisent des signaux comportant toutes les fréquences jusque la fréquence de Shannon. Toutes les fréquences supérieures à celles portées par le signal utile d'entrée sont superflues pour l'identification et peuvent donc être filtrées.

2) Principe

On réalise un filtrage parallèle $L(q)$ de l'entrée et de la sortie avant de réaliser l'identification avec les signaux filtrés.

$$y_f(t) = L(q)y(t) \quad x_f(t) = L(q)x(t)$$

$$L(q)A(q)y(t) = L(q)B(q)x(t) + L(q)e(t)$$

$$A(q)y_f(t) = B(q)x_f(t) + L(q)e(t)$$

La fréquence de coupure du filtre sera choisie pour ne conserver que les fréquences contenues dans le signal de sortie et qui ne sont pas filtrées par le système. Un filtrage parallèle permet alors de conserver la fonction de transfert entre l'entrée et la sortie.

L'ordre du filtre doit être choisi assez grand pour éliminer rapidement les fréquences au delà de la bande passante souhaitée. En conséquence, le préfiltrage des données du serrage hydraulique sera effectué par un filtre de Butterworth du quatrième ordre suffisant pour réaliser une identification correcte (cf. [SCHE 94]), appliquée à la relation cage.

I.3 Identification des paramètres du modèle cage du serrage hydraulique

I.3.1 Principe

Les paramètres A (section du vérin) et P_{empi} (masse d'empilement) sont supposés parfaitement connus, les paramètres à identifier restent donc : Mced, Mced2, Mced3, f, M et S_0 . On estime également le gain entre X et ΔH_s (nommé gdh) théoriquement égal à 1 en valeur absolue.

$$y(t) = X, x(t) = [Pv, 2. Fworb, \Delta H_s, Vit]$$

L'identification est réalisée à partir des données échantillonnées toutes les 10 ms. Les entrées du serrage hydraulique sont a priori suffisamment dynamiques pour exciter tous les modes du système. Les paramètres structuraux continus peuvent ensuite être calculés ainsi que les paramètres de la fonction de transfert recherchée (cf. paragraphe 1.2.4).

I.3.2 Résultats

On réalise trois essais différents (cf. Tableau III.1) pour chaque bande :

- dans le premier essai, on prend les signaux non filtrés pour l'identification, auxquels on ajoute la valeur des constantes P_{empi} et S_0 . Cette méthode nécessite de connaître la valeur de ces paramètres. Si P_{empi} est une constante et sa valeur est connue, S_0 en revanche dépend des conditions de laminage. Sa valeur est déduite à partir de la valeur moyenne des signaux en début de bande, avant la régulation AGC.

- le deuxième essai reprend la même procédure, mais tous les signaux sont filtrés par un filtre de Butterworth du quatrième ordre avec une fréquence de coupure $f_c = 17$ Hz, qui fournit les résultats dont les incertitudes sont les plus petites.

- dans le troisième essai, une entrée supplémentaire constante est ajoutée à $x(t)$ pour estimer sa valeur. Tous les signaux sont également filtrés comme précédemment.

Dans le tableau III.1, la colonne de gauche indique la valeur identifiée du paramètre et la colonne de droite indique l'écart-type de l'incertitude du paramètre.

Bande n°1	Signaux + Cstes (4 entrées)		Signaux+cstes filtrés (4 entrées)		Signaux filtrés (5 entrées)	
	Mced (TF/mm)	393,14	62,00	398,62	45,62	407,60
f (Ns/m)	3,30E+08	8,80E+07	3,56E+08	7,19E+07	3,69E+08	6,94E+07
M (kg)	2,59E+06	6,11E+05	7,64E+06	1,30E+06	7,38E+06	1,17E+06
Mced2 (TF/mm)	-1850,06	4387,80	1168,25	864,94	103,69	48,10
Mced3 (/s)	8,58E+05	2,00E+06	-1,52E+05	7,12E+04	-9,37E+04	2,68E+04
gain ΔHs/X	-0,9251	0,1550	-0,9821	0,1189	-0,9950	0,1106
So initial (m)	1,25E-03		1,24E-03		1,21E-03	
σ (RM2) (N)	6,10E+04		6,24E+04		6,83E+04	
m(RM2) (N)	-1,98E+05				4,21E+02	
So identifié (m)					1,62E-03	4,46E-04

Bande n°2	Signaux + Cstes (4 entrées)		Signaux+cstes filtrés (4 entrées)		Signaux filtrés (5 entrées)	
	Mced (TF/mm)	509,72	65,81	508,30	31,90	539,47
f (Ns/m)	2,07E+08	4,65E+07	2,05E+08	2,51E+07	2,36E+08	2,97E+07
M (kg)	1,47E+06	2,84E+05	4,38E+06	4,10E+05	4,64E+06	4,54E+05
Mced2 (TF/mm)	677,15	107,52	695,88	66,56	2590,00	1548,00
Mced3 (/s)	-1,22E+05	1,63E+04	-1,20E+05	8,13E+03	-1,01E+05	6,63E+03
gain ΔHs/X	-0,9014	0,1174	-0,8958	0,0578	-0,9232	0,0592
So initial (m)	1,02E-03		1,03E-03		1,02E-03	
σ (RM2) (N)	6,45E+04		6,39E+04		7,18E+04	
m(RM2) (N)	-1,30E+06		-1,32E+06		-9,65E+03	
So identifié (m)					8,77E-04	2,35E-04

Bande n°3	Signaux + Cstes (4 entrées)		Signaux+cstes filtrés (4 entrées)		Signaux filtrés (5 entrées)	
	Mced (TF/mm)	332,20	54,39	345,68	55,70	288,58
f (Ns/m)	4,22E+08	1,16E+08	6,82E+08	1,81E+08	1,24E+09	4,32E+08
M (kg)	1,89E+06	4,64E+05	8,39E+06	2,01E+06	1,10E+07	3,57E+06
Mced2 (TF/mm)	3926,08	13620,00	10220,33	93890,00	-11,57	7,45
Mced3 (/s)	-5,82E+04	9,94E+03	-6,57E+04	1,18E+04	-2,49E+04	4,70E+03
gain ΔHs/X	-0,9725	0,1609	-0,9338	0,1528	-1,2937	0,2636
So initial (m)	8,04E-04		7,68E-04		8,04E-04	
σ (RM2) (N)	5,93E+04		6,53E+04		1,28E+05	
m(RM2) (N)	-1,25E+05		-1,75E+05		1,41E+04	
So identifié (m)					-4,59E-03	1,26E-03

Bande n°4	Signaux + Cstes (4 entrées)		Signaux+cstes filtrés (4 entrées)		Signaux filtrés (5 entrées)	
	Mced (TF/mm)	433,85	106,36	433,09	42,80	445,99
f (Ns/m)	3,29E+08	1,37E+08	1,58E+08	3,01E+07	1,59E+08	2,98E+07
M (kg)	1,70E+06	6,20E+05	4,39E+06	6,37E+05	4,44E+06	6,36E+05
Mced2 (TF/mm)	537,23	181,11	569,61	90,91	512,98	82,63
Mced3 (/s)	-8,02E+04	2,05E+04	-7,77E+04	8,44E+03	-7,03E+04	7,42E+03
gain ΔHs/X	-1,0224	0,2539	-1,0037	0,1029	-1,1166	0,1097
So initial (m)	1,08E-03		1,08E-03		1,05E-03	
σ (RM2) (N)	6,58E+04		6,52E+04		6,84E+04	
m(RM2) (N)	-5,35E+05		-5,91E+05		-3,10E+03	
So identifié (m)					1,01E-03	3,06E-04

Tableau III.1 : Résultats de l'identification des paramètres du modèle de la cage.

Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus par identification ARX pour chacune des quatre bandes, sont rassemblés dans le tableau III.1.

Les gains Mced ont un ordre de grandeur qui varie très peu d'un essai à l'autre pour la même bande. Les résultats sont cependant plus précis lorsque les signaux sont filtrés.

Le gain ΔHs/X est un bon critère de qualité de l'estimation puisque sa valeur est théoriquement connue. Ainsi, plus sa valeur est proche de -1 avec une incertitude faible, plus l'estimation semble correcte. Dans le tableau de résultats, la valeur de ce gain se rapproche

toujours de -1. Le troisième essai est le meilleur pour l'estimation de ce gain pour la bande n°1.

Les valeurs de f et de M , sont toujours obtenues positives ce qui stabilise la fonction de transfert estimée. Leurs valeurs sont cependant sensiblement variables d'une bande à l'autre ou d'un essai à l'autre. Cette variabilité est illustrée par les niveaux relativement élevés des intervalles de confiance associés. On note aussi des incertitudes parfois très élevées sur les modules M_{ced2} et M_{ced3} .

Le résidu RM2 obtenu avec tous les paramètres identifiés pour le troisième essai a été tracé pour la bande n°4 :

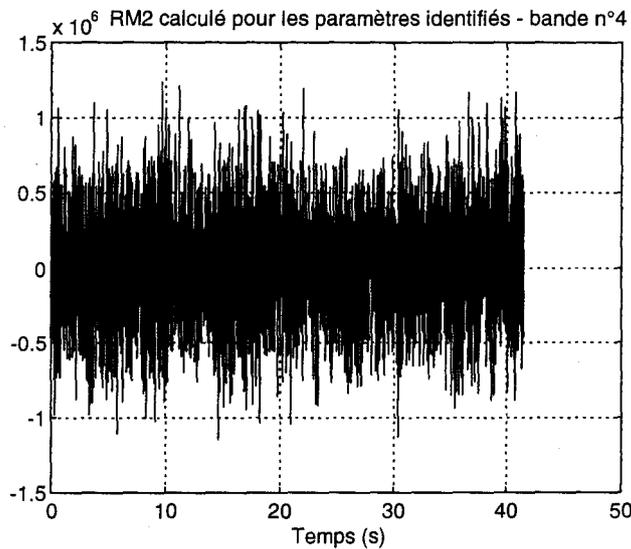


Figure III.3 : Résidu RM2 tracé avec tous les paramètres identifiés.

L'écart-type de ce résidu vaut $\sigma = 3.6572 \cdot 10^5$ N, (contre environ $1 \cdot 10^5$ N avant identification) et sa moyenne $m = 1,72 \cdot 10^4$ N.

Les valeurs identifiées mais imprécises des paramètres f et M sont la cause principale de cet écart-type important.

Remarque : les écarts-types et moyennes du tableau III.1 sont obtenus en calculant les résidus RM2 avec les valeurs de f et M supposées a priori ($f = 3 \cdot 10^6$ Ns/m, $M = 8 \cdot 10^4$ kg) et les autres paramètres aux valeurs identifiées.

Analyse fréquentielle de $G(p)$.

La fonction de transfert que l'on cherche à identifier est de la forme générale suivante :

$$G(p) = \frac{1}{M_{ced} + f \cdot p + M \cdot p^2}$$

Les coefficients du dénominateur sont supposés tous positifs, $G(p)$ étant stable par nature.

La fonction de transfert à identifier peut être étudiée dans le domaine fréquentiel. Le lieu de Bode de la fonction de transfert est tracé avec les valeurs nominales supposées a priori des paramètres au dénominateur ($f = 3 \cdot 10^6$ Ns/m, $M = 8 \cdot 10^4$ kg $M_{ced} = 392$ TF/mm).

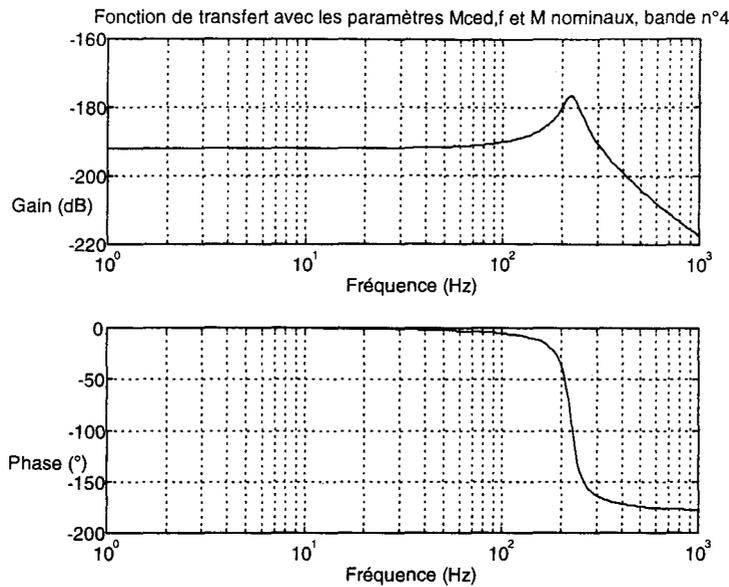


Figure III.4 : Lieu de Bode de la fonction de transfert à identifier.

On s'aperçoit que la fréquence de résonance est de l'ordre de 200 Hz. En rappelant par ailleurs que les signaux dont nous disposons sont échantillonnés avec un pas de 10 ms, (soit 100 Hz), d'après le théorème de Shannon, il n'est donc possible d'observer correctement les phénomènes fréquentiels que jusque 50 Hz. En conséquence, il ne sera donc possible de définir avec précision que les paramètres intervenant sur les gains statiques, ce que confirme l'analyse du tableau III.1, sachant que par ailleurs les imprécisions importantes sur les modules M_{ced2} et M_{ced3} pour les bandes 1 et 3 sont associées à des dynamiques insuffisantes des entrées correspondantes (F_{worb} et V_{it}). La fonction de transfert correspondantes, pour les valeurs identifiées des paramètres ($f = 1,6 \cdot 10^8$ Ns/m, $M = 4,44 \cdot 10^6$ kg, $M_{ced} = 446$ TF/mm) est illustrée ci-dessous :

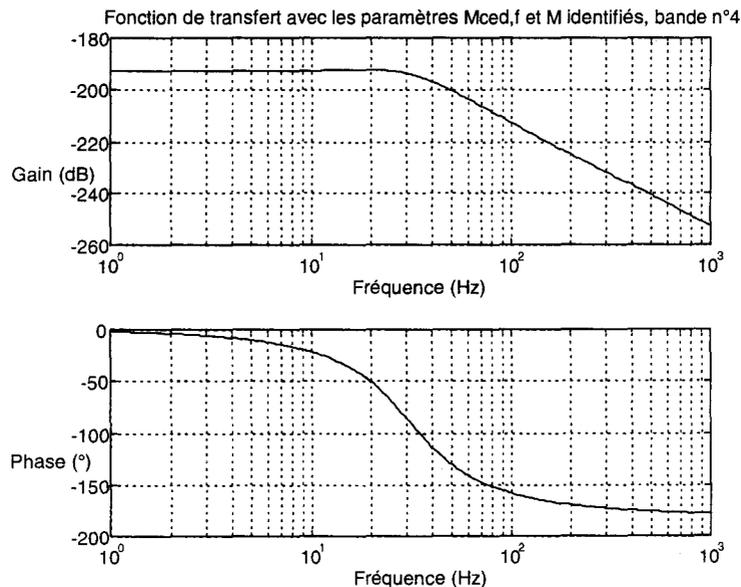


Figure III.5 : Lieu de Bode de la fonction de transfert identifiée.

1.3.3 Etude des gains statiques par régression

L'analyse fréquentielle a montré que les paramètres que l'on cherche à identifier ne peuvent l'être précisément. Aussi, plutôt que d'identifier des paramètres dynamiques, on cherche à identifier des paramètres statiques.

On cherche à déterminer les gains statiques de la fonction de transfert, une sortie et 7 entrées sans filtrage préalable des mesures. Pour cette approche, la détermination des valeurs de f et M repose dans un premier temps sur le calcul des dérivées de X (cf. chapitre 4, 1.2.3), puis on considérera ces dérivées comme des entrées. L'équation devient :

$$X = \frac{2A}{Mced} P_v + \frac{2}{Mced} \cdot \left(\frac{Mced}{Mced2} - 1 \right) F_{\text{worb}} - \Delta H_s + \frac{1}{Mced3} V_{\text{it}} + \frac{-f}{Mced} V + \frac{-M}{Mced} \gamma + \frac{1}{Mced} \alpha$$

que l'on peut réécrire :

$$Y = P.Z$$

où

$$Y = X,$$

$$Z = [P_v, 2.F_{\text{worb}}, \Delta H_s, V_{\text{it}}, V, \gamma, \underline{1}]$$

et

$$P = \frac{1}{Mced} \left[2A \left(\frac{Mced}{Mced2} - 1 \right) \quad -gdh.Mced \quad \frac{Mced}{Mced3} \quad -f \quad -M \quad \alpha \right]$$

$\underline{1}$ est un vecteur unité de longueur identique à X

P est solution de : $Y = P.Z$

La solution est obtenue en cherchant à minimiser la norme euclidienne de l'écart

$$\varepsilon = Y - PZ$$

soit

$$\min \|Y - PZ\|_2$$

qui donne :

$$P = Z^+ Y$$

où Z^+ est une pseudo-inverse calculée sur la totalité des points de mesures qui minimise le critère précédent au sens des moindres carrés.

Dans le problème qu'il faut résoudre ici, l'écart ε correspond au résidu $RM2/Mced$.

Les paramètres recherchés sont extraits du vecteur P , S_0 étant obtenu des valeurs identifiées de α et $Mced$.

	Mced(TF/mm)	gdh	f (Ns/m)	M (kg)	Mced2(TF/mm)	Mced3 (1/s)	So (mm)
Bande n°1	392	-0,9584	-1,7201.10 ⁶	9,6548.10 ⁴	-217	-1199200	0,9683
Bande n°2	504	-0,9139	1,3245.10 ⁶	13,042.10 ⁴	511	-128060	1,2084
Bande n°3	343	-0,9260	-3,8032.10 ³	2,8659.10 ⁴	178	-69726	0,9258
Bande n°4	411	-1,0321	-5,14. 10 ⁶	13,078.10 ⁴	652	-87519	1,1104

Tableau III.2 : Paramètres obtenus par régression.

L'estimation de S_0 est proche de la valeur théorique, surtout pour les bandes 2 et 4. On calcule ensuite avec tous les paramètres obtenus ci-dessus les résidus RM2 pour chaque bande (gdh = -1) :

	σ (RM2) (N)	m (RM2) (N)
Bande n°1	5,99.10 ⁴	1,2120.10 ³
Bande n°2	6,12.10 ⁴	-1,3478.10 ³
Bande n°3	6,25.10 ⁴	-3,3905.10 ³
Bande n°4	5,96.10 ⁴	-0,4709.10 ³

Tableau III.3 : Statistique du résidu RM2 après calage des paramètres.

On constate que le gain gdh est proche de -1 et que l'écart-type du résidu RM2 est faible pour chaque bande. L'estimation des paramètres par régression conduit donc à un minimum d'écart-type satisfaisant.

Les résultats statistiques obtenus sont la plupart du temps assez proches de ceux obtenus par identification ARX (paragraphe I.3.2), et même meilleurs pour les moyennes.

Conclusion

Les valeurs des paramètres f et M sont éloignées de leur valeur a priori, et pour f, les résultats n'ont pas de signification physique pour trois bandes, puisqu'ils sont négatifs. Ces résultats étaient prévisibles en raison de l'analyse fréquentielle de la cage. On choisit donc de conserver les valeurs a priori de ces deux paramètres (soit $f = 3 \cdot 10^6$ Ns/m et $M = 8 \cdot 10^4$ kg). On calcule pour la bande 4 l'écart-type et la moyenne de tous les résidus de mesure en utilisant les valeurs a priori de ces paramètres et les valeurs obtenues par régression linéaire pour les autres paramètres, avec gdh = -1.

Bande n°4	RM1 (A)	RM2 (N)	RM3 (A)	RM4 (A)	RM5 (A)	RM6 (A)
σ (R)	5,65 .10 ⁻⁴	6,53.10 ⁴	1,81.10 ³	1,94.10 ⁻³	1,88.10 ⁻³	1,86.10 ⁻³
m (R)	-2,69.10 ⁻⁴	8,46.10 ³	4,38.10 ⁻⁴	1,76.10 ⁻⁴	1,69.10 ⁻⁴	4,44.10 ⁻⁴

Tableau III.4 : Statistique des résidus après calage pour la bande n°4.

Pour la suite de l'étude, on conservera ces valeurs de paramètres et la statistique de ces résidus. Afin d'évaluer la statistique des résidus, nous avons calculé la statistique des signaux de référence de chacun des résidus (cf. annexe 6a). Pour les résidus R1, R3 à R6, le signal de référence est le courant servo-valve I_s . Pour le résidu R2, le signal de référence est la force développée par le vérin F_v .

Bande 4	Ecart-type	Moyenne	Maximum	Minimum
I_s (A)	9,034.10 ⁻⁴	-5,38.10 ⁻⁵	3,5 10 ⁻³	-3,8.10 ⁻³
2.A.Pv(N)	2,6543.10 ⁵	5,8995.10 ⁶	6,7.10 ⁶	5,3.10 ⁶

Tableau III.5 : Statistique des signaux de référence.

II Modèle des bruits

Le calage des bruits est une étape nécessaire à la validation du modèle utilisé par le simulateur, pour la détermination des performances réalisées au chapitre 5. Le but est de vérifier que les résidus sur lesquels les procédures de décision vont être appliquées suivent une loi statistique connue. Dans un premier temps, il faut analyser la statistique des résidus issus des mesures, puis il faudra simuler les bruits agissant sur le système réel. Dans un deuxième temps, il faudra vérifier que les résidus obtenus à partir des simulations ont la même distribution statistique que les résidus issus des mesures sur le site.

Les bruits rencontrés dans la réalité étant le plus fréquemment gaussiens, c'est la première distribution que l'on cherchera à vérifier.

II.1 Test graphique - Droite de HENRY

Le test utilisé ici est une méthode géométrique qui permet de vérifier graphiquement qu'une variable aléatoire suit une loi normale [SAPO 90]. Le principe consiste à tracer la répartition de la loi normale qui est connue, par les tables, en fonction de la répartition de la variable aléatoire. On calcule dans un premier temps la répartition de la variable aléatoire en fixant un nombre de classes. Il est possible d'utiliser un graphique convenablement gradué (gausso-arithmétique) sur lequel on reporte en abscisse les valeurs de la variable aléatoire et en ordonnée sa répartition. Si la distribution est normale, on obtient une droite (droite de Henry), dont les coordonnées sont liées à la loi normale centrée et réduite par la relation :

$$u_i = \frac{x_i - m}{\sigma}$$

Ainsi, la droite de Henry a pour pente σ et coupe l'axe des abscisses en m .

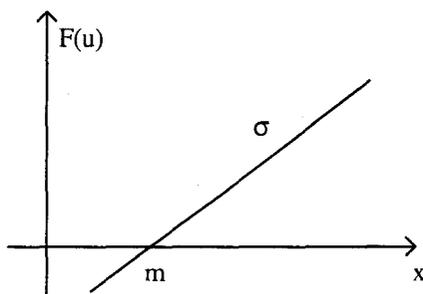


Figure III.6 : Droite de Henry.

Si la variable aléatoire testée est une loi normale centrée réduite, ou, plus généralement, si l'on trace la droite de Henry entre deux variables aléatoires ayant les mêmes paramètres pour la même distribution, alors la droite de Henry est de pente 1 et passe par le point (0,0).

Il est possible aussi de tracer directement la fonction de répartition de la variable centrée réduite, issue des tables, en fonction de la fonction de répartition de la variable aléatoire. Plutôt que de graduer l'axe des abscisses avec les valeurs de la fonction de répartition, on utilise les valeurs correspondantes de la variable aléatoire.

II.2 Calage statistique des résidus

II.2.1 Structures des résidus

Le calage des bruits consiste à obtenir des résidus en simulation qui ont les mêmes caractéristiques que les résidus des mesures. Il convient donc d'ajouter des bruits sur le simulateur initial, en portant attention aux points d'entrées, qui doivent être physiquement justifiables. A partir de la connaissance du système, il est possible de définir les incertitudes sur des paramètres imprécis.

Les incertitudes sont entrées au niveau de l'épaisseur ΔH_s , dans le schéma-bloc. Elles englobent l'effet combiné de l'incertitude sur la mesure de l'épaisseur par la jauge et l'erreur associée à la présence de faux-ronds des cylindres de laminage, caractérisant l'incertitude sur l'ouverture à vide de la cage. Sa structure est identique à celle de f puisque intervenant entre les mesures de P_v et X (cf. tableau III.4 et chapitre 2). De plus, du bruit gaussien est ajouté sur les mesures du système, à savoir les capteurs de mesures des variables X , P_a et I_s .

Le tableau de dépendance des résidus aux bruits est obtenu à partir de la structure des résidus définie dans le chapitre 2.

	I_s	P_a	ΔH_s	X
R1	1	0	0	0
R2	0	0	1	1
R3	0	1	0	1
R4	1	1	1	1
R5	1	1	0	1
R6	0	1	1	1

Tableau III.6 : Structure des bruits ajoutés dans le simulateur.

II.2.2 Droites de répartition des statistiques

Les résidus obtenus en utilisant les mesures ont été calculés à chaque instant à partir de leur forme de calcul, et de l'estimation des dérivées temporelles par lissage polynomial par moindres carrés (cf. chapitre 4, I.2.3). La valeur du résidu n'est jamais strictement nulle. En effet, dans le signal résiduel, il reste les différents bruits propagés et les erreurs de modélisation et de structure (par exemple forme de calcul des dérivées temporelles des signaux). Les erreurs de modélisation ont été réduites au minimum et les résidus obtenus sont proches d'un bruit blanc, puisqu'ils ne dépendent d'aucune variable du système. Il convient de vérifier la statistique de ce bruit et d'en connaître la loi de répartition. Dans un premier temps, l'application du test de la droite de Henry aux 6 résidus issus des mesures montre qu'ils peuvent être assimilés à des bruits gaussiens.

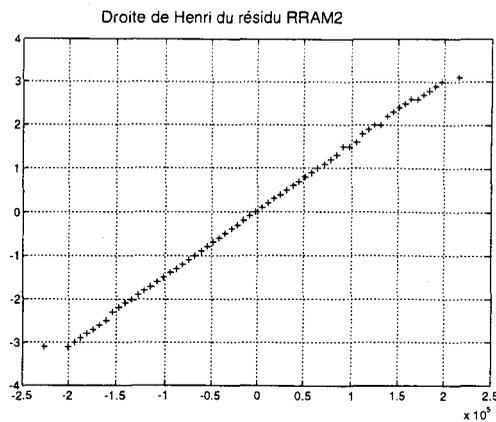


Figure III.7 : Droite de Henry pour le résidu de mesures RM2 bande n°4.

En simulation, les résidus générés doivent conserver la même répartition avec les mêmes caractéristiques que les résidus des mesures. Le calage des bruits a donc été effectué en calant séquentiellement les bruits, d’après le tableau de dépendance ci-dessus. Il faut dans un premier temps ajuster la statistique des résidus qui ne font intervenir qu’un seul bruit inconnu à la fois. Une simulation pour un niveau de bruit fixé permet d’obtenir des résidus dont la statistique a été modifiée en raison de sa dépendance au bruit. Si la statistique des résidus ne correspond pas à celle des résidus de mesure, alors il faut simuler de nouveau le système avec un nouveau niveau de bruit, et ainsi de suite jusqu’à ce que les résidus sélectionnés aient la même statistique que les résidus de mesure équivalents.

Dans une seconde étape, on cale les résidus faisant intervenir 2 bruits dont un est déjà calé, et ainsi de suite.

Le calage des bruits a été réalisé sur le simulateur alimenté avec les signaux correspondant au laminage d’une bande donnée (bande n°4).

- Le bruit ajouté à I_s permet de recalibrer le résidu R1, qui ne fait intervenir aucun autre bruit. Le résidu obtenu sans bruit par simulation est quasiment nul (de l’ordre de 10^{-18}). On rajoute donc sur la mesure du courant simulé, I_{ssim} , un bruit qui a comme écart-type celui du résidu obtenu sur site RM1:

$$I_{sbr} = I_{ssim} + \sigma(RM1) \times e(t)$$

$e(t)$ étant un bruit normal de moyenne nulle et d’écart-type 1. De cette manière, le résidu R1 a pratiquement le même écart-type que le résidu RM1, ainsi que la même moyenne.

Le résidu R1 conserve alors ce bruit d’écart-type $\sigma(RM1)$.

- Le bruit sur P_a est très peu influent sur les résidus. Il faut donner une grande valeur de ΔP_a relativement à P_a pour apercevoir une évolution significative des écarts-types des résidus. On choisit donc de ne pas considérer ce bruit :

$$brpa=0$$

On recalc ensuite les résidus ne faisant intervenir que le bruit sur X_m (R3 et R5). Il faut placer en simulation un bruit sur le capteur X_m d’écart-type $9.5 \mu m$ pour obtenir une courbe de Henry affine entre R3 et RM3 (et de même pour R5/RM5).

$$brxm = 9.5 \mu m$$

- On recale enfin le dernier bruit, introduit au niveau de l'épaisseur, en utilisant les trois derniers résidus (R2, R4 et R6). Le bruit rajouté est de $14 \mu\text{m}$ sur l'épaisseur :

$$b_{rep} = 14 \mu\text{m}$$

Le calage des bruits pour deux bandes laminées est illustré ci-dessous :

	sur Pa	sur Xm	sur ΔH_s
Bande 2	0	$8,8 \mu\text{m}$	$12,2 \mu\text{m}$
Bande 4	0	$9,5 \mu\text{m}$	$14 \mu\text{m}$

Tableau III.7 : Comparaison des niveaux de bruit.

La comparaison des écarts-types et des moyennes entre les résidus de mesure et de simulation nous donne les tableaux suivants :

Bande n°4	R1 (A)	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
σ (R) mesure	$5,65 \cdot 10^{-4}$	$6,53 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$
σ (R) simulation	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$6,51 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$

Tableau III.8 : Comparaison des écarts-types entre les résidus mesurés et simulés.

Bande n°4	R1 (A)	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
m (R) mesure	$-2,69 \cdot 10^{-4}$	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-4}$
m (R) simulation	$-2,20 \cdot 10^{-6}$	$-0,38 \cdot 10^{-4}$	$0,93 \cdot 10^{-4}$	$0,94 \cdot 10^{-4}$	$0,90 \cdot 10^{-4}$	$0,96 \cdot 10^{-4}$

Tableau III.9 : Comparaison des moyennes entre les résidus mesurés et simulés.

Les résidus après le calage des bruits ont des écarts-types et des moyennes proches des résidus simulés et sont ainsi validés. La droite de régression des résidus R2 mesuré et simulé est tracée ci-dessous. Les droites de régression pour les autres résidus sont fournies en annexe 5 pour la bande n°4.

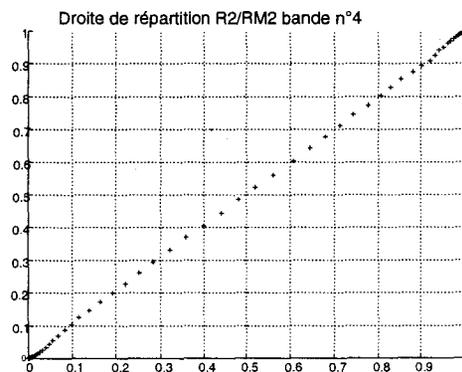


Figure III.8 : Droite de régression entre un résidu de mesure et un résidu de simulation.

III Modèle et simulation des défaillances

Pour définir le cahier des charges ou étudier les performances du système de surveillance, nous utiliserons le simulateur pour introduire des défaillances sur le système. Nous suivrons le protocole suivant pour toutes les simulations de défaillances, sauf indications contraires :

- Le simulateur est alimenté par les entrées mesurées sur le site lors du laminage de la bande n°4 (Correction AGC et moniteur Sagc et Smon, force de contre-flexion Fworb, vitesse de défilement de la bande Vit), auxquels on ajoute, si l'étude le nécessite, les niveaux de bruit définis au paragraphe II.
- Le simulateur fournit les valeurs de la variation de position des vérins (X), la pression vérin (Pv), le courant de commande de la servo-valve (Is), le débit vérin (Qv), et la pression de la servo-valve (Ps).
- Tous les paramètres sont susceptibles de varier positivement ou négativement si leur sens physique le permet. Chaque défaillance est modélisée sous la forme d'un saut ou d'un échelon, c'est à dire que le paramètre défaillant passe à l'instant ρ de sa valeur initiale p_0 à sa valeur de défaillance p .

$$\begin{aligned} p(t) &= p_0 & t < \rho \\ p(t) &= p_0 + \Delta p & t \geq \rho \end{aligned}$$

- Nous étudierons les défaillances capteurs de deux manières différentes : la défaillance sous la forme d'un offset, on ajoute une valeur constante à la variable mesurée : par exemple, $Is_{\text{mesuré}} = Is_{\text{réel}} + Is_{\text{offset}}$, la défaillance sous la forme multiplicative (défaut de linéarité) : la mesure est proportionnelle à la variable mesurée : $Is_{\text{mesuré}} = \alpha \cdot Is_{\text{réel}}$, avec $\alpha \neq 1$.

Il est à noter que les défaillances des capteurs ne nécessitent que la simulation de l'essai nominal, puisque la mesure n'est pas utilisée par le système, à l'exception de la sortie contrôlée du système (X).

IV Cahier des charges

IV.1 Objectif

Actuellement ce n'est qu'en comparant l'épaisseur de sortie à la consigne que l'on peut s'apercevoir d'un dysfonctionnement du processus a posteriori. Or une variation de la valeur de certains paramètres du processus peut être une cause de la dégradation, alors prévisible, de la qualité du produit et des composants du système.

C'est pourquoi on cherche ici à déterminer l'influence précise des valeurs des paramètres du système sur son comportement en analysant les réponses temporelles à une consigne de type échelon en l'absence de tout bruit et avec les cylindres de travail appliqués directement l'un contre l'autre (c'est-à-dire sans simulation du passage de la tôle dans la cage).

A terme, une défaillance étant détectée et localisée, les résultats de ces essais permettront de fixer les seuils de criticité en rapport avec la qualité de fonctionnement de l'actionneur hydraulique et de la qualité désirée au niveau du produit final pour chaque variation de paramètre.

IV.2 Principe

Pour obtenir une simulation déterministe parfaitement reproductible, aucun bruit n'est ajouté. De plus, les entrées du simulateur (Pa, Fworb, Vit,...) sont choisies constantes. Le protocole correspondant à l'essai à rouler sur simulateur consiste à simuler une consigne Xc de type échelon d'amplitude 0,1 mm en phase de montée et descente successivement, pour solliciter le mode de desserrage et de serrage respectivement, d'une durée de 2s qui débute après stabilisation du système. La valeur du paramètre étudié s'écarte de sa valeur nominale sur toute la durée de la simulation (à partir de T=0s) et les réponses temporelles des variables significatives (X, Pv, Ps, Qv, Is, chapitre 2, I.3.2) sont comparées aux réponses temporelles de l'essai nominal, pour lequel tous les paramètres restent à leur valeur nominale.

On réitère l'opération jusqu'à obtenir une variation maximale de 10% par rapport à l'essai nominal sur au moins une des variables significatives retenues pour qualifier le comportement de l'actionneur hydraulique .

Ce seuil de variation acceptable des caractéristiques en comportement de l'actionneur, inférieur ou égal à 10%, sera notre critère de qualité 'produit'. Il nous permet d'établir un cahier des charges plus précis pour notre système de surveillance.

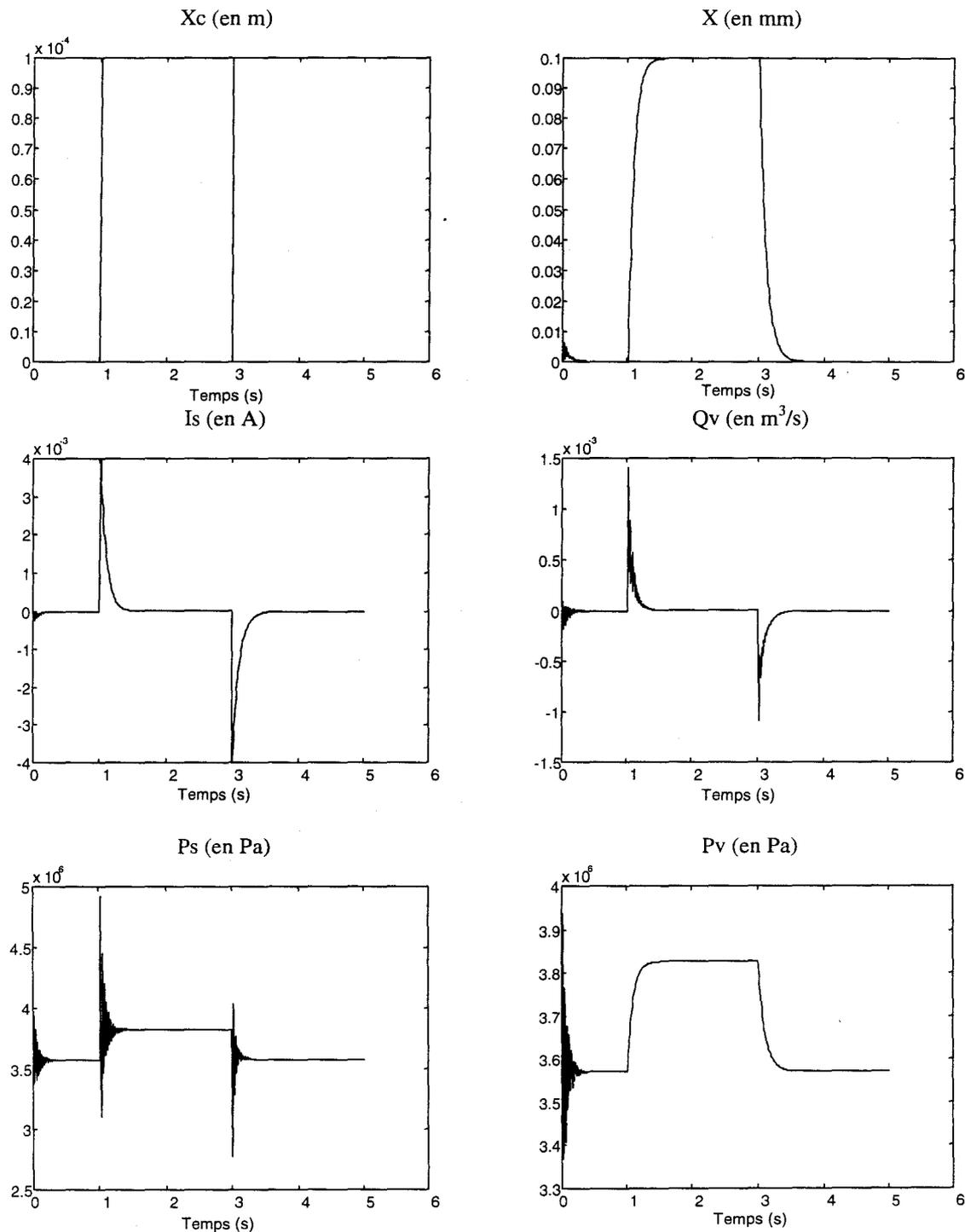


Figure III.8 : Allures des réponses temporelles du système pour l'essai nominal à roule.

Choix des indicateurs retenus :

Le choix des caractéristiques actionneur a été effectué au vu de la forme des réponses temporelles et seules ont été retenues celles dont la variabilité était significative :

- valeurs des pics de Qv (en m³/s)
- valeurs du premier dépassement de Ps (en %),
- temps de réponse à 5% de X, par rapport à la valeur finale stabilisée (en s)
- temps de réponse à 5% de Pv, par rapport à la valeur finale stabilisée (en s)
- valeurs des pics de Is (en A), qui traduisent la variation maximale entre la consigne de pression et la position des vérins en réponse indicielle.

- rapport des deux premiers maximums successifs de Ps, qui traduit le degré d'amortissement de la pression sortie servo-valve, en réponse indicielle.

- erreur statique sur X, (en µm) directement liée à la qualité du produit, car elle exprime, en régime stabilisé, l'écart entre la consigne et la position effective des vérins. Sa valeur est nulle en fonctionnement sans défaillance, et sa variation ne peut être exprimée en pour-cent. Pour la définition du cahier des charges, l'erreur statique ne pourra dépasser 10 µm.

Remarque : Le temps de réponse à 5% de Ps présente naturellement une très grande variabilité et son maintien dans une plage de 10% implique que les autres mesures retenues ne varient plus du tout. Cet indicateur, très limitatif, a donc été écarté.

IV.3 Résultats

Dans le tableau ci dessous les parties grisées correspondent aux indicateurs qui atteignent les premiers 10% de variation par rapport à l'essai nominal.

Paramètre	Maximum des variations par rapport à l'essai nominal en % des :						
	pics de Qv	dépass. de Ps	tps de réponse à 5%		pics de Is	rapp. des 2 premiers max de Ps	erreur statique de X (en µm)
			de X	de Pv			
Qf (m ³ /s)	2,63	3,65	10,03	10,06	9,46	8,06	10,00
Kr- (A/m)	8,24	10,10	9,92	9,96	8,75	1,60	0,00
Kr+ (A/m)	8,12	9,97	9,13	8,37	8,75	2,10	0,00
R- (s ⁻¹)	2,31	1,32	0,32	0,00	0,00	10,00	0,00
R+ (s ⁻¹)	2,21	1,49	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00
f- (N.s/m)	0,05	0,05	0,00	0,40	0,00	0,40	0,00
f+ (N.s/m)	1,75	1,06	0,40	5,58	0,00	9,98	0,00
β- (Pa/s)	1,28	10,10	1,19	1,20	0,00	6,37	0,00
β+ (Pa/s)	2,03	10,10	1,19	0,80	0,00	9,35	0,00
µv+ (Pa/s)	0,16	9,62	0,00	3,25	0,20	0,10	0,00
Fcste+ (N)	0,15	10,10	0,00	3,25	0,20	0,13	0,00
ξ-	5,13	10,10	0,40	0,80	0,00	9,57	0,00
ξ+	4,56	8,70	0,79	0,80	0,00	10,10	0,00
ω ₀ - (rad/s)	3,49	7,90	0,97	0,80	0,00	10,10	0,00
ω ₀ + (rad/s)	3,78	10,10	0,65	1,20	0,00	8,09	0,00
Qnb- (m ³ /s)	7,56	9,9164	9,71	9,74	0,00	1,59	0,00
Qnb+ (m ³ /s)	7,50	9,93	8,74	8,44	0,00	2,16	0,00
Qnh- (m ³ /s)	7,91	9,68	9,52	9,56	0,00	0,08	0,00
Qnh+ (m ³ /s)	8,16	10,00	9,13	8,37	0,00	0,06	0,00
K1+ (m ³ /Pa.s)	4,95	3,87	10,03	10,06	8,97	7,97	10,00

Tableau III.10 : Variations des caractéristiques actionneur.

L'erreur statique sur la position des vérins X n'est concernée que par les défaillances sur les débits d'huile dans l'actionneur au niveau de la servo-valve (paramètre Qf) et du vérin (K_1)

Remarque : Pour la majorité des paramètres analysés, le premier critère qui atteint 10% de variation par rapport à l'essai nominal est soit la valeur des premiers dépassements de P_s soit le rapport de deux premiers maximums successifs de P_s . Les variations des paramètres à surveiller influencent donc très sensiblement P_s en comparaison des autres variables, ce qui laisse présager l'importance d'un capteur de pression en sortie de la servo-valve pour la conception du système de surveillance complémentaire.

Pour Qf , Kr , et Q_{nb}/Q_{nh} les mesures qui atteignent 10% de variation par rapport à l'essai nominal sont plus réparties. Pour les détections de défaillances liées à des variations de ces paramètres, l'importance du capteur sur P_s devrait donc être moins grande.

Paramètre	Valeur nominale	Valeur limite	Variation du paramètre par rapport à sa valeur nominale
Qf (m ³ /s)	0	$8,85 \cdot 10^9$	
$Kr-$ (A/m)	40	36,5	-8,75%
$Kr+$ (A/m)	40	43,5	8,75%
$R-$ (s ⁻¹)	32,21	25,23	-21,67%
$R+$ (s ⁻¹)	32,21	38,99	21,05%
$f-$ (N.s/m)	$3,00 \cdot 10^6$	$5,85 \cdot 10^5$	-80%
$f+$ (N.s/m)	$3,00 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^7$	1933%
$\beta-$ (Pa/s)	$1,56 \cdot 10^9$	$1,170 \cdot 10^9$	-25%
$\beta+$ (Pa/s)	$1,56 \cdot 10^9$	$2,075 \cdot 10^9$	33,01%
$\mu v+$ (Pa/s)	0	0,0057	
F_{cste+} (N)	0	$2,20 \cdot 10^7$	
$\xi-$	0,9	0,74	-17,78%
$\xi+$	0,9	1,063	18,11%
ω_{0-} (rad/s)	410	330	-19,51%
ω_{0+} (rad/s)	410	600	46,34%
Q_{nb-} (m ³ /s)	$3,78 \cdot 10^9$	$3,44 \cdot 10^9$	-8,99%
Q_{nb+} (m ³ /s)	$3,78 \cdot 10^9$	$4,12 \cdot 10^9$	8,99%
Q_{nh-} (m ³ /s)	$2,50 \cdot 10^9$	$2,29 \cdot 10^9$	-8,40%
Q_{nh+} (m ³ /s)	$2,50 \cdot 10^9$	$2,72 \cdot 10^9$	8,80%
$K1+$ (m ³ /Pa.s)	0	$2,2 \cdot 10^{-11}$	

Tableau III.11 : Limites des variations acceptables pour ne pas dépasser 10% de variation des caractéristiques actionneur.

La valeur nominale du paramètre f étant relativement faible, il faut considérablement l'augmenter (+ 1933 %) pour obtenir des variations de 10 % d'un des indicateurs retenus. La valeur en variation négative de ce paramètre est obtenue au dessus de la limite de stabilité du simulateur.

IV.4 Conclusion

Le protocole d'essai particulier décrit précédemment a permis de déterminer un cahier des charges précis de l'actionneur hydraulique concernant les variations acceptables des paramètres à surveiller, en fonction d'un critère de qualité 'produit'.

Cette harmonisation était utile car on constate effectivement que les variations des paramètres à surveiller n'ont pas toutes la même influence au niveau du comportement fonctionnel du procédé.

Ces essais ont montré aussi la grande influence des variations de nombreux paramètres à surveiller sur la pression du fluide en sortie de servo-valve Ps. L'ajout du capteur sur Ps aura donc de grandes chances d'améliorer les possibilités de détection du système de surveillance.

Chapitre 4 : Calculs et sensibilités des résidus

Avant d'appliquer la procédure de décision, nous essayerons d'évaluer l'influence de chacune des défaillances sur les résidus. Cette étude va être entièrement menée à partir des expressions analytiques des résidus et de la simulation du modèle.

Dans une première partie, nous réduisons le bruit introduit sur les résidus par le calcul numérique des dérivées. Ensuite, nous allons étudier théoriquement les sensibilités des résidus aux défaillances à l'aide de leur expression analytique. La simulation nous permettra d'évaluer pratiquement ces sensibilités et d'effectuer une comparaison avec la théorie. A chaque étape de l'analyse, nous présentons l'évolution des signatures des défaillances. Enfin, nous reprenons les résultats de cette comparaison pour les résidus sensibles aux paramètres incertains.

I Calculs des dérivées

I.1 Principe

Les enregistrements industriels sont naturellement bruités sur le site et peuvent conserver des composantes fréquentielles relativement importantes. En conséquence, le calcul numérique des dérivées peut introduire un bruit très important sur les données. Le choix de la méthode de calcul influera sur la statistique des résidus et par conséquent sur les performances finales du système de surveillance.

I.2 Calcul numérique des dérivées

Le calcul de la dérivée a été abordé par [DIOP 95], qui utilise un interpolant de Lagrange pour approximer le signal et une fonction spline pour lisser l'approximation. Une autre méthode pour estimer les dérivées des entrées consiste à utiliser les filtres à variables d'état [PETE 89]. La dérivation est un filtre passe-haut. Elle élimine les composantes continues du signal en amplifiant les composantes à hautes fréquences. L'influence du bruit sur les signaux dérivés devient alors importante. Le calcul numérique de la dérivée doit estimer au mieux la dérivée, tant en amplitude qu'en phase, tout en réduisant l'influence des bruits.

I.2.1 Dérivée d'Euler

La dérivée d'un signal échantillonné la plus simple à calculer est la dérivée d'Euler, qui est en fait la pente définie par deux points consécutifs :

$$\hat{y}'(k.T) \approx \frac{y(k.T) - y(k(T-1))}{T}$$

où T est la période d'échantillonnage.

L'égalité n'est valable que lorsque T est petite, c'est à dire que le système est échantillonné suffisamment rapidement pour conserver toutes les variations du système. De plus, cet estimateur introduit un déphasage entre l'estimation et la dérivée. Pour éviter cet inconvénient, il faut utiliser la formule suivante :

$$\hat{y}'(k.T) \approx \frac{y(k.(T+1)) - y(k(T-1))}{2.T} \quad (1)$$

Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle est imprécise si le pas d'échantillonnage n'est pas suffisant.

1.2.2 Calcul de la dérivée par approximation polynomiale

L'objectif est toujours d'estimer au mieux la dérivée d'un signal. Le principe est de définir une fonction dérivable qui passe par plusieurs points consécutifs du signal dont on veut calculer la dérivée. Ainsi, on est capable de calculer la dérivée en tout point du signal. Le nombre de points n consécutifs est choisi impair ($n = 2m + 1$), afin de calculer la dérivée à un instant donné avec autant de points avant et après, pour éviter de déphaser le signal et sa dérivée. A chaque instant d'échantillonnage, on recherche une fonction qui passe par ce point, les m précédents et les m suivants. La fonction recherchée approximant le signal doit être telle que l'on puisse obtenir l'expression littérale de ses dérivées. Cette fonction sera prise sous la forme d'un polynôme de degré p , ayant $p + 1$ coefficients :

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_{p-1}x^{p-1} + a_px^p$$

La dérivée de ce polynôme est facilement calculable :

$$P'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots + (p-1)a_{p-1}x^{p-2} + pa_px^{p-1}$$

ainsi que sa dérivée seconde :

$$P''(x) = 2a_2 + 6a_3x + \dots + (p-1)(p-2)a_{p-1}x^{p-3} + p(p-1)a_px^{p-2}$$

De façon générale, la dérivée k -ième est :

$$P^k(x) = k!a_k + k!a_{k+1}x + (k!/2)a_{k+2}x^2 + \dots + (k!/(j-k)!)a_jx^{j-k} + \dots + (k!/(p-k)!)a_px^{p-k}$$

On calcule le polynôme aux instants $0, T, \dots, 2mT$: (T étant le temps qui sépare deux mesures consécutives).

$$P(0) = a_0$$

$$P(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots + a_pT^p$$

$$P(2T) = a_0 + 2a_1T + 4a_2T^2 + 8a_3T^3 + \dots + 2^p a_pT^p$$

...

$$P(mT) = a_0 + m a_1 T + m^2 a_2 T^2 + m^3 a_3 T^3 + \dots + m^p a_p T^p$$

...

$$P(2mT) = a_0 + 2m a_1 T + (2m)^2 a_2 T^2 + (2m)^3 a_3 T^3 + \dots + (2m)^p a_p T^p$$

que l'on peut réécrire sous forme matricielle, soit :

$$\underline{p} = \underline{N} \times \underline{a}$$

où \underline{p} sont les valeurs mesurées du signal échantillonné sur une fenêtre glissante $[0, 2mT]$:

$$\underline{p} = (P(0) P(T) P(2T) \dots P(2mT))^T$$

$$\underline{a} = (a_0 a_1 a_2 \dots a_p)^T$$

$$\underline{N} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 1 & T & T^2 & \dots & T^j & \dots & T^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & iT & i^2 T^2 & \dots & i^j T^j & \dots & i^p T^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2mT & (2m)^2 T^2 & \dots & (2m)^j T^j & \dots & (2m)^p T^p \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\underline{N} : (2m + 1; p + 1)$

On dispose de $2m+1$ équations à $p+1$ inconnues qui sont les coefficients du polynôme. L'équation $P(0) = a_0$ permet d'estimer directement le coefficient a_0 .

Si le nombre de points choisi est égal au nombre de coefficients du polynôme, $p+1 = 2m + 1 = n$, alors \mathbf{N} est carrée de rang plein et inversible. Il est possible de déterminer tous les coefficients a_i du polynôme. La solution est donnée par :

$$\underline{\mathbf{a}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{p} \quad (3)$$

On peut alors calculer la dérivée du signal au point mT :

$$P'(mT) = a_1 + 2m^2 a_2 T + 3m^3 a_3 T^2 + \dots + (p-1)m^{p-1} a_{p-1} T^{p-2} + pm^p a_p T^{p-1}$$

soit :

$$P'(mT) = \underline{\mathbf{d}} \underline{\mathbf{a}} = \underline{\mathbf{d}} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{p}$$

$$\underline{\mathbf{d}} = [0 \quad 1 \quad 2m^2 T \quad 3m^3 T^2 \quad \dots \quad (j-1)m^{j-1} T^{j-2} \quad \dots \quad pm^p T^{p-1}]$$

$\underline{\mathbf{d}} : (1, p+1)$

Pour la dérivée seconde :

$$P''(mT) = 2a_2 + 6ma_3 T + \dots + (p-1)(p-2)m^{p-3} a_{p-1} T^{p-3} + p(p-1)m^p a_p T^{p-2}$$

soit :

$$P''(mT) = \underline{\mathbf{s}} \underline{\mathbf{a}} = \underline{\mathbf{s}} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{p}$$

$$\underline{\mathbf{s}} = [0 \quad 0 \quad 2 \quad 6m^3 T \quad \dots \quad (j-1)(j-2)m^{j-1} T^{j-3} \quad \dots \quad p(p-1)m^p a_p T^{p-2}] \quad (4)$$

$\underline{\mathbf{s}} : (1, p+1)$

Cependant, si le signal traité est bruité, cette méthode de dérivation amplifie les bruits car elle est très sensible aux variations rapides du signal, puisque par définition elle passe par tous les points effectivement mesurés sur la fenêtre temporelle considérée.

1.2.3 Approximation polynomiale par la méthode des moindres carrés

Le principe est toujours d'approximer le signal par une fonction polynomiale, mais qui ne passe plus systématiquement par tous les points. Le but est d'obtenir une fonction qui varie beaucoup moins que le signal d'origine. On choisit de conserver un polynôme de degré p et d'en calculer les coefficients expliquant le signal sur n points consécutifs, avec $n > p + 1$. On se rapporte alors au cas précédent, mais \mathbf{N} n'est plus inversible.

Il faut alors calculer une pseudo-inverse \mathbf{N}^+ de la matrice \mathbf{N} obtenue par [BORN 95] :

$$\mathbf{N}^+ = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T$$

$$\underline{\mathbf{a}} = \mathbf{N}^+ \mathbf{p} \quad (5)$$

Puis, toujours selon la même méthode que précédemment, on calcule la dérivée au point milieu :

$$P'(mT) = \underline{\mathbf{d}} \underline{\mathbf{a}} = \underline{\mathbf{d}} \mathbf{N}^+ \mathbf{p} \quad (6)$$

En pratique, on calcule au préalable les matrices $\underline{\mathbf{d}} \mathbf{N}^{-1}$, $\underline{\mathbf{s}} \mathbf{N}^{-1}$, $\underline{\mathbf{d}} \mathbf{N}^+$ et $\underline{\mathbf{s}} \mathbf{N}^+$, à condition de connaître T .

1.2.4 Comparaison des différentes approches

On compare les résultats pour trois filtres dérivateurs différents :

- méthode d'Euler, avec des coefficients $\underline{\mathbf{d}} \mathbf{N}^{-1} = [-0,5 \ 0 \ 0,5]$

- méthode de l'approximation polynomiale passant par tous les points, avec l'ordre du polynôme $p=4$, pour $n = p+1 = 5$ points consécutifs :

$$\underline{dN}^1 = [0.0833 \quad -0.6667 \quad 0 \quad 0.6667 \quad -0.0833]$$

- méthode de l'approximation polynomiale par moindres carrés (M.C.), avec l'ordre du polynôme $p=4$, pour $n = 7$ points consécutifs :

$$\underline{dN}^+ = [0.0873 \quad -0.2659 \quad -0.2302 \quad 0 \quad 0.2302 \quad 0.2659 \quad -0.0873]$$

Analyse fréquentielle :

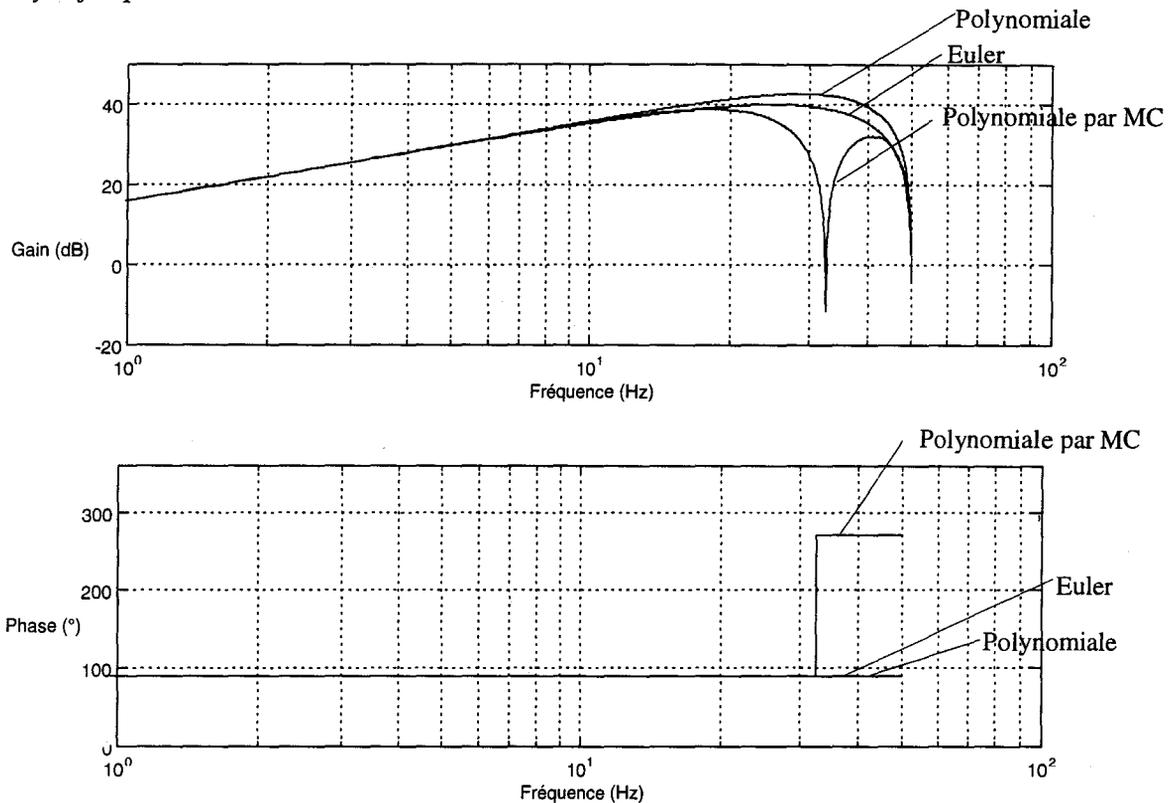


Figure IV.1 : Diagrammes de Bode des estimations de la dérivée.

Les trois méthodes estiment avec un bonne précision l'amplitude de la dérivée jusque 20 Hz. Au dessus de cette fréquence, le calcul de la dérivée par approximation polynomiale par moindres carrés atténuent plus les hautes fréquences que les deux autres méthodes. Par contre, cette méthode introduit un déphasage de 180° après 30 Hz.

Comparaison des résultats :

Pour les résultats en simulation, les niveaux de bruits utilisés sont les suivants (en écarts-types, cf chapitre 3) :

brxm = bruit sur le capteur $X = 8,5 \mu\text{m}$

brep = bruit sur l'épaisseur $\Delta H_s = 13,5 \mu\text{m}$

La moyenne et l'écart-type des résidus simulés et mesurés ont été reportés dans les tableaux ci-dessous.

Les résidus R1 et RM1 n'apparaissent pas car ils ne font pas intervenir de dérivées.

- Dérivée d'Euler :

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
σ (Euler) (résidus mesurés)	$6,99 \cdot 10^4$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$
σ (Euler) (résidus simulés)	$6,79 \cdot 10^4$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	$2,64 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.1 : Ecarts-types des résidus mesurés et simulés pour la méthode d'Euler.

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
m (Euler) (résidus mesurés)	$8,47 \cdot 10^3$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$
m (Euler) (résidus simulés)	$-3,56 \cdot 10^2$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,51 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,51 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.2 : Moyennes des résidus mesurés et simulés pour la méthode d'Euler.

En utilisant la dérivée d'Euler, l'écart-type du résidu RM2 est pratiquement de $7 \cdot 10^4$ N. Pour les autres résidus, RM3 à RM6, les écarts-types sont aux environs de $2,5 \cdot 10^{-3}$ A. En simulation, les résultats sont presque identiques après le calage des bruits.

- Méthode de l'approximation polynomiale passant par tous les points :

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
σ (Polynôme) (résidus mesurés)	$6,12 \cdot 10^4$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$
σ (Polynôme) (résidus simulés)	$5,97 \cdot 10^4$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$5,84 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.3 : Ecarts-types des résidus mesurés et simulés pour la méthode polynomiale.

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
m (Polynôme) (résidus mesurés)	$8,46 \cdot 10^3$	$0,52 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,52 \cdot 10^{-3}$
m (Polynôme) (résidus simulés)	$-3,79 \cdot 10^2$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^{-3} - 0,0028 \cdot 10^{-3}i$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^{-3} - 0,0028 \cdot 10^{-3}i$

Tableau IV.4 : Moyennes des résidus mesurés et simulés pour la méthode polynomiale.

Les écarts-types des résidus RM2 et R2 est amélioré par cette méthode. Pour les autres résidus, l'amélioration est peu visible. On constate également en simulation que certains niveaux de bruit donnent des valeurs complexes aux résidus 4 et 6, augmentant de ce fait leur écart-type. Ce problème n'apparaissait pas avec la première méthode. Il est dû à des valeurs négatives de différences de pressions au niveau de la servo-valve. Ce calcul des dérivées qui amplifie le signal qui sort de la plage de fonctionnement du système est donc une mauvaise approximation.

- Méthode de l'approximation polynomiale par moindres carrés (M.C.).

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
σ (Polynôme par M.C.) (résidus mesurés)	$6,53.10^4$	$1,81.10^{-3}$	$1,94.10^{-3}$	$1,88.10^{-3}$	$1,86.10^{-3}$
σ (Polynôme par M.C.) (résidus simulés)	$6,16.10^4$	$1,52.10^{-3}$	$1,78.10^{-3}$	$1,62.10^{-3}$	$1,69.10^{-3}$

Tableau IV.5 : Ecarts-types des résidus mesurés et simulés pour la méthode polynomiale par moindres carrés.

	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
m (Polynôme par M.C.) (résidus mesurés)	$8,46.10^3$	$4,38.10^4$	$1,76.10^4$	$1,69.10^4$	$4,44.10^4$
m (Polynôme par M.C.) (résidus simulés)	$-3,53.10^2$	$0,79.10^4$	$2,31.10^4$	$0,77.10^4$	$2,65.10^4$

Tableau IV.6 : Moyennes des résidus mesurés et simulés pour la méthode polynomiale par moindres carrés.

La méthode ci-dessus apparaît en fait comme un filtrage du bruit des dérivées calculées, donc des résidus qui les utilisent.

Avec cette méthode, les écarts-types de tous les résidus sont améliorés par rapport à la dérivée d'Euler. Les moyennes sont également satisfaisantes. De plus, il n'y a plus de problèmes concernant les valeurs négatives de différences de pressions au niveau de la servo-valve.

II Etudes théoriques des sensibilités aux défaillances

II.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, les résidus sont caractérisés en fonctionnement normal statistiquement par une moyenne et un écart-type :

$$r = \mu_0 + \varepsilon_0$$

où μ_0 est la moyenne du résidu sur toute la fenêtre d'observation et ε_0 est un bruit normal centré et d'écart-type σ_0 .

Nous décomposons donc l'influence des défaillances sur les résidus en deux types d'influence distincts : influence sur la moyenne et influence sur l'écart-type.

- *Influence sur la moyenne du résidu*

Le résidu passe d'une moyenne μ_0 à une moyenne μ_1 . L'amplitude du saut est $\nu = \mu_1 - \mu_0$.

$r = \mu_0 + \varepsilon_0$ en fonctionnement normal

$r = \mu_0 + \nu + \varepsilon_0$ pour une défaillance influençant la moyenne

- *Influence sur l'écart-type*

L'écart-type du résidu passe de σ_0 à σ_1 .

$r = \mu_0 + \varepsilon_0$ en fonctionnement normal

$r = \mu_0 + \varepsilon_1$ pour une défaillance influençant l'écart-type

ε_1 est un bruit normal centré et d'écart-type σ_1 .

La sensibilité d'une défaillance d_j sur la moyenne d'un résidu est généralement définie pour les systèmes linéaires statiques ou dynamiques en régime permanent en réponse à une défaillance constante, par (cf. chapitre 2) :

$$r_i = \sum_{j=1}^n Ms_{ij} d_j \quad i = 1 \text{ à } q; \quad j = 1 \text{ à } n$$

avec q = nombre de résidus

et n = nombre de défaillances;

Ms_{ij} = sensibilité de la défaillance j sur le résidu i .

D'une manière générale, le résidu dépend du temps t et des entrées ou sorties connues u du système et des défaillances d :

$$r(t, u) = f(t, u(t), d(t))$$

avec $\bar{r}(t, u) = 0$ pour $d(t) = 0 \forall t$

Si le résidu est dérivable par rapport à la défaillance d , la réponse du résidu à une variation de la défaillance s'exprime par :

$$\Delta r(t, u) = \frac{\delta f(t, u(t), d(t))}{\delta d(t)} \Delta d(t)$$

A partir de l'expression analytique des résidus, il est donc possible de définir la sensibilité d'un résidu à une défaillance comme la dérivée partielle du résidu par rapport à cette défaillance :

$$s(t) = \frac{\Delta r(t, u)}{\Delta d(t)} = \frac{\delta f(t, u(t), d(t))}{\delta d(t)} \quad (7)$$

Si le résidu n'est pas linéaire par rapport à la défaillance, il faut calculer la dérivée partielle au point de fonctionnement.

Dans la suite, nous cherchons à déterminer la sensibilité des résidus en valeurs moyennes concernant toutes les défaillances du cahier des charges.

II.2 Sensibilités structurelles

Les sensibilités structurelles sont simplement définies par les signatures des défaillances obtenues par l'analyse structurelle. Ces signatures ont été vues dans le chapitre 2.

	K_r	ξ, ω_0	Q_f	Q_n	β	f	F_c	μ_v	R	K_I	Pa	Is	P_v	X
R 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R 2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
R 3	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
R 4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
R 5	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
R 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Tableau IV.7 : Signatures structurelles des défaillances.

Ces signatures servent de base à l'étude. Elles s'appuient sur une influence des défaillances liées au fait que le résidu est fonction ou non de la défaillance. Elles ne prennent pas en compte la valeur effective de la sensibilité et donc la capacité à détecter l'occurrence de la défaillance.

Les parties suivantes présentent une analyse détaillée des sensibilités.

II.3 Sensibilités des systèmes bouclés

Le système que nous étudions est régulé. Le capteur de sortie du système est rebouclé en entrée du régulateur pour appliquer en commande une fonction de la différence entre la consigne et la sortie. Dans le cas d'un système mono entrée, mono sortie, le schéma d'un système bouclé est le suivant :

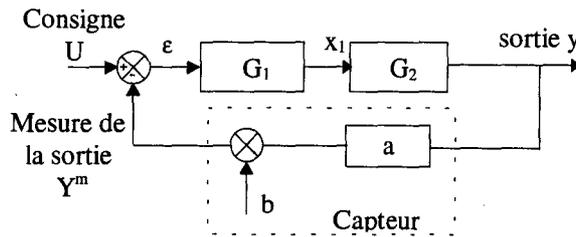


Figure IV.2 : Système bouclé.

La fonction de transfert G_1 représente le régulateur et G_2 le système. b est une erreur additive affectant la mesure du capteur.

Dans le cas d'une défaillance du capteur de sortie, l'estimation de l'erreur du système devient :

$$\varepsilon^* = u - y^m = u - b - y = \varepsilon - b$$

Le régulateur dispose seulement de l'estimation de l'écart ε^* , différence $u - y^m$. Comme le régulateur s'efforce de faire tendre ε^* vers zéro, la sortie réelle tend alors vers $u - b$. Le système converge vers un autre point de fonctionnement correspondant à une consigne $u - b$, et ε tend vers b d'après sa définition. Cette erreur ne peut être détectée par l'utilisateur qui ne dispose que de ε^* , toujours proche de zéro, que ce soit en fonctionnement normal ou en cas de défaillance du capteur de sortie.

Les mesures de l'entrée et de la sortie permettent de générer un résidu basé sur la relation entrée - sortie du système bouclé, dont la forme de calcul est :

$$r_1(s) = Y^m(s) - \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2} U(s)$$

Une défaillance b du capteur de sortie donne une valeur de résidu non nulle :

$$Y^m(s) = Y(s) + b(s) = G_1 G_2 (U(s) - Y^m(s)) + b(s)$$

$$Y^m(s) = \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2} U(s) + \frac{1}{1 + G_1 G_2} b(s)$$

On en déduit la forme d'évaluation du résidu :

$$r_1(s) = Y^m(s) - \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2} U(s) = \frac{1}{1 + G_1 G_2} b(s)$$

Le résidu r_1 est stable puisqu'il a pour fonction de transfert celle du système contrôlé.

La sensibilité de b dans r_1 s'exprime par la fonction de transfert $\frac{1}{1+G_1G_2}$ qui est non nulle.

Cependant, l'erreur de régulation en l'absence de défaillance s'écrit :

$$\varepsilon^*(s) = U(s) - Y^m(s) = \left(1 - \frac{G_1G_2}{1+G_1G_2}\right)U(s) = \frac{1}{1+G_1G_2}U(s)$$

Ainsi, l'influence de b sur le résidu r_1 est la même que l'influence de U sur l'erreur de sortie en fonctionnement non défaillant : minimiser l'erreur ε^* minimise également la sensibilité du résidu r_1 à la défaillance b .

Il est important de noter également, que le résidu qui utilise uniquement la relation régulateur n'est pas non plus sensible à une défaillance du capteur de régulation.

$$r_2(s) = X_1^m(s) - G_1(U(s) - Y^m(s))$$

où

$$Y^m(s) = Y(s) + b(s)$$

Si b_1 représente l'erreur additive affectant la mesure de la variable x_1 (cf. figure IV.2), alors :

$$X_1^m(s) = X_1(s) + b_1(s) = G_1(U(s) - Y^m(s)) + b_1(s)$$

d'où

$$r_2 = G_1(U(s) - Y^m(s)) + b_1(s) - G_1(U(s) - Y^m(s))$$

soit

$$r_2(s) = b_1(s)$$

Sur le serrage hydraulique, la sortie régulée est la variation de position des vérins X . La relation entrée/sortie du système correspond au résidu R_6 de l'instrumentation initiale. La sensibilité de ce résidu à une défaillance du capteur de régulation est minimisée. Enfin, la relation régulateur est le résidu R_1 , qui ne fait intervenir qu'une seule variable mesurée, celle du courant de commande de la servo-valve I_s . Ce résidu est insensible à une défaillance du capteur sur X (cf. Tableau IV.7).

II.4 Sensibilités statiques

Une influence sur la moyenne du résidu indique une sensibilité statique. Cette influence peut être déterminée par le régime statique du résidu. Pour calculer les sensibilités statiques, il faut annuler toutes les dérivées dans l'expression analytique du résidu, puis dériver l'expression ainsi obtenue par rapport au paramètre.

Exemple :

L'expression analytique du résidu R_3 , où p représente l'opérateur de dérivée est en desserrage et sans saturation sur le régulateur :

$$Kr(X_c - X_m) - \frac{\sqrt{\Delta P n_s} \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2\right)}{Q n_s} \left[\frac{Pv \left[K_1 + \left(\frac{SL}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{\rho L^2}{\beta_c} K_1 R \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + K_1 \right) p^2 + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^3 \right] + X \left(Ap + \frac{\rho L^2}{\beta_c} Ap^2 (p + R) \right) + Q_f}{\left[Pv \left[\left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right) + \left(\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \frac{\rho LR}{S} + \frac{\rho L}{S} K_1 \right) p + \frac{\rho L}{S} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^2 \right] + \frac{\rho L}{S} X (ARp + Ap^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] = 0$$

où X_c , X , X_m et P_v sont des fonctions du temps, avec X identique à X_m (entrées et sorties mesurées).

L'expression du résidu statique est obtenue en régime permanent du résidu ($p = 0$) :

$$R3_{statique} : K_r (X_c - X_m) - \frac{(K_1 P_v + Q_f) \sqrt{\Delta P n} \cdot I_n}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho L R}{S} K_1\right)} \cdot Q_{n_b}} = 0$$

L'expression du résidu se trouve ainsi très simplifiée. Plusieurs paramètres n'interviennent plus dans l'expression statique du résidu (ξ , ω_v , β , f , R). A partir de cette expression, une nouvelle structure du résidu apparaît. On en déduit les *signatures statiques des défaillances* :

	K_r	ξ, ω_v	Q_f	Q_n	β	f	F_c	μ_v	R	K_1	P_a	I_s	P_v	X
R 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R 2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
R 3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
R 4	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
R 5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
R 6	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0

Tableau IV.8 : Signatures structurelles statiques des défaillances.

Les sensibilités des paramètres ξ , ω_v , β , f , R sont nulles désormais pour tous les résidus.

Remarque : La sensibilité des résidus R4 et R6 ne peut être calculée analytiquement. En effet, l'expression statique de ces résidus fait apparaître le signe de la dérivée de X ($sg(pX)$), cette fonction n'étant pas dérivable.

Les expressions analytiques de toutes les sensibilités statiques sont données en annexe n°6a.

II.5 Sensibilités statiques au point de fonctionnement

L'existence d'une expression analytique de la sensibilité d'un résidu à une défaillance n'implique pas que cette défaillance influe effectivement sur le résidu. En effet, il faut que l'évaluation numérique de cette sensibilité au point de fonctionnement soit différente de zéro. Dans notre exemple, comme K_1 et Q_f sont nuls en fonctionnement nominal, la sensibilité à Q_{n_b} du résidu R3 s'annule :

$$\frac{\partial R_3}{\partial Q_{n_b}} = 0$$

De la même façon, les sensibilités des paramètres P_v , Q_n , F_c et μ_v sont annulées pour les résidus R3 à R6.

La sensibilité de R3 au paramètre K_r est égale à l'erreur de régulation du système, qui, par définition, reste proche de 0 :

$$\frac{\partial R_3}{\partial K_r} = (X_c - X_m)$$

La sensibilité du résidu n'est pas strictement nulle, mais va donc dépendre du point de fonctionnement du système. Il sera donc difficile de détecter une défaillance du paramètre K_r avec ce résidu. Ce type de sensibilité est signalé dans le tableau par 'x'.

	K_r	ξ, ω_0	Q_f	Q_n	β	f	F_c	μ_v	R	$K1$	Pa	Is	Pv	X
R 1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R 2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
R 3	x	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
R 4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
R 5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
R 6	x	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

Tableau IV.9 : Signatures statiques au point de fonctionnement.

II.6 Sensibilités statiques déduites des non-linéarités

La dernière étape consiste à prendre en compte les non-linéarités du système étudié. La particularité de ce système est qu'il passe très rapidement d'un point de fonctionnement à un autre, lors des phases alternées de serrage et desserrage, modélisées par des non-linéarités de type signe ou changement de gain (servo-valve). Aussi certains paramètres n'ont pas une influence constante en fonction du temps. Pour ces paramètres, il convient d'écrire les expressions analytiques des sensibilités dans chaque cas.

Par exemple, l'influence d'une variation du paramètre sur le résidu sera différente suivant que le système est en mode serrage ou en mode desserrage. L'influence en moyenne pourra donc être non nulle, puisque l'influence dans un sens de serrage ne compense pas systématiquement l'influence dans l'autre sens. Une défaillance de Q_{nb} (ou Q_{n_s}) est détectable et localisable en pratique (voir chapitre 5). Ce paramètre n'intervenant qu'en serrage (respectivement en desserrage), l'influence n'apparaît que dans un sens. L'expression de la sensibilité du résidu à ce paramètre s'écrit de deux manières différentes suivant le point de fonctionnement dans lequel se trouve le système à chaque instant. Une variation du résidu R3 entre le fonctionnement normal et une variation du paramètre du débit nominal en serrage uniquement (Q_{nb} de $3,78 \cdot 10^{-3}$ à $3,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) à la vingtième seconde du laminage, en utilisant les mêmes entrées et les mêmes séquences de bruits ajoutés, illustre ce phénomène.

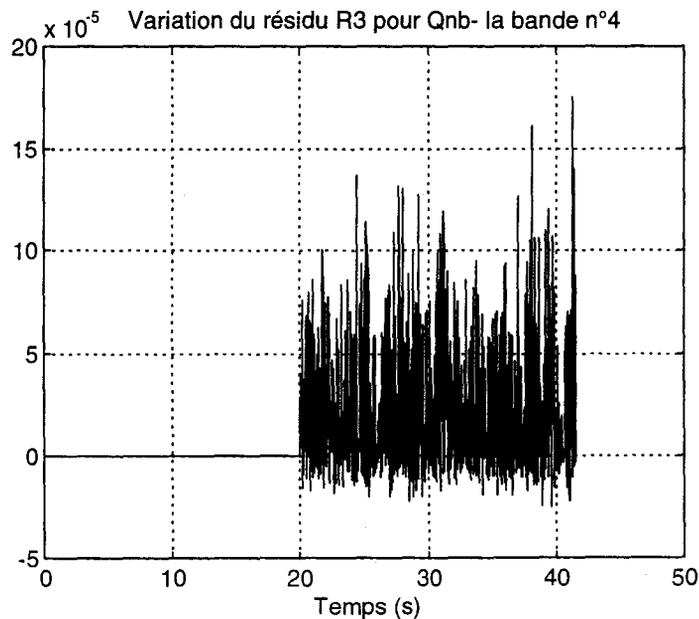


Figure IV.3 : Variation du résidu R3 entre le fonctionnement normal et une variation du paramètre Q_{nb} de $3,78 \cdot 10^{-3}$ à $3,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

On détecte également une défaillance liée aux paramètres F_c et μ_v , qui sont facteurs du signe de la vitesse de déplacement du vérin (signe $\left(\frac{dX}{dt}\right)$).

Lorsque les sensibilités ne sont pas linéaires, les défaillances deviennent détectables, alors que les sensibilités statiques sont théoriquement nulles.

	K_f	ξ, ω_0	Q_f	Q_n	β	f	F_c	μ_v	R	K1	Pa	Is	Pv	X
R 1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R 2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
R 3	x	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
R 4	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
R 5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
R 6	x	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0

Tableau IV.10 : Signatures statiques en tenant compte des non-linéarités.

Remarque : En cas de défaillances multiples, une défaillance liée aux paramètres R, Q_n Pv, F_c ou μ_v devient théoriquement détectable si K_1 ou Q_f est simultanément en panne (différent de zéro). En prenant les défaillances combinées, on obtient les structures suivantes :

	Q_f	F_c	μ_v	R	K1	Pv	R.Qf	R.K ₁	Qn.K ₁	Qn.Q _f	Pv.Qf	Pv.K ₁	Fc.Q _f	Fc.K ₁	$\mu_v.Q_f$	$\mu_v.K_1$
R 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R 2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
R 3	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
R 4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
R 5	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
R 6	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1

Tableau IV.11 : Signatures statiques en tenant compte des non-linéarités, pour des défaillances doubles.

Le cas R.Qf n'apporte rien car si $K_1 = 0$, R n'intervient jamais dans R3 à R6.

II.7 Conclusion

En conclusion de cette partie, nous pouvons dire que l'influence en moyenne d'une défaillance sur un résidu dépasse le niveau structurel et nécessite une étude plus fine des différents cas. Cette étude peut s'appuyer sur la forme analytique des résidus, mais doit également dans le cas non-linéaire faire intervenir la connaissance des points de fonctionnement et utiliser les simulations.

La partie suivante présente les résultats obtenus en simulation comparés à ceux de l'étude théorique.

III Etude pratique des sensibilités aux défaillances

III.1 Principe

Nous cherchons à déterminer pour chaque résidu la sensibilité à chacune des défaillances du cahier des charges.

Suivant le principe défini au chapitre 3, le simulateur est alimenté par les mesures des entrées du laminage acquises pour une bande de métal donnée (bande n°4). On applique sur le simulateur une défaillance constante entre les instants 20,01 s et 41,52 s, soit à peu près du milieu de la bande jusqu'à la fin du laminage. Les mêmes séquences de bruit sont utilisées pour chaque simulation.

Un essai nominal sans défaillance, est tout d'abord réalisé, pour lequel on calcule pour chacun des résidus, la moyenne des résidus μ_{0i} et leur variance σ_{0i}^2 sur la fenêtre temporelle 20,01 s et 41,52 s. Pour chaque défaillance j, on calcule pour chaque résidu i, toujours de l'instant 20,01 s à 41,52 s :

- sa moyenne μ_{ji}
- sa variance σ_{ji}^2
- la variation de moyenne du résidu i pour la défaillance j par rapport à l'essai nominal :

$$V_{ji} = \mu_{ji} - \mu_{0i} \quad (8)$$

La sensibilité du résidu i à la défaillance j est estimée pratiquement par :

$$\hat{s}_{ji} = \frac{V_{ji}}{\Delta d_j} \quad (9)$$

Cette sensibilité est ensuite estimée théoriquement à partir de son expression analytique, chaque paramètre étant remplacé par sa valeur nominale ou sa valeur de défaillance si c'est le paramètre étudié. Les variables intervenant dans l'expression des sensibilités théoriques dépendant du temps et des conditions de simulation, il est donc nécessaire, pour chaque défaillance, d'effectuer une simulation qui utilise les mêmes entrées que l'essai nominal, qui sert de référence. La sensibilité du résidu i est ensuite calculée à chaque instant par la formule définie en (7) :

$$s_{ji}(t) = \frac{\Delta r_i(t, u)}{\Delta d_j(t)} = \frac{\partial f(t, u(t), d(t))}{\partial d_j(t)} \quad (10)$$

La moyenne \bar{s}_{ji} de cette expression sur la fenêtre 20,01 s à 41,52 s est alors comparée à l'estimation pratique de la sensibilité (9).

III.2 Comparaison

Cette comparaison a été réalisée dans deux cas de simulation : le cas avec bruit, c'est à dire en utilisant le simulateur complet calé pour la bande n°4 avec la procédure du chapitre 3, et le cas sans bruit, c'est à dire sans ajout de bruit sur les capteurs ni sur le système.

Le tableau de comparaison (voir annexe 8) rapporte :

- le nom du résidu
- sa moyenne et son écart-type en fonctionnement nominal pour une simulation avec bruit
- le nom du paramètre dont on cherche les sensibilités (en grisé) et sa valeur de défaillance
- V_{ji} : la variation de moyenne par rapport à l'essai nominal pour la simulation bruitée

- v_{ji}^* : la variation de moyenne par rapport à l'essai nominal pour la simulation non bruitée
- $\bar{s}_{ji} \cdot \Delta d_j$: la variation de moyenne théorique avec des signaux bruités
- $\bar{s}_{ji}^* \cdot \Delta d_j$: la variation de moyenne théorique avec des signaux non bruités
- l'écart réduit de chacune de ces variations calculé par rapport à l'écart-type en nominal σ_0 . Par exemple, pour la simulation bruitée :

$$\text{écart}_1 = \frac{v_{ji}}{\sigma_0} \sqrt{N}$$

où N est le nombre de points dans la fenêtre, soit 2152 pts pour un pas d'échantillonnage de 0,01 s.

		R1	R2	R3	R4	R5	R6
Nominal	Moyenne	-6,47E-06	-4,45E+02	1,02E-04	9,94E-05	9,60E-05	-1,06E-04
	Ecart-type	5,61E-04	6,42E+04	1,70E-03	1,82E-03	1,78E-03	1,75E-03
Q_f	$8,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$						
	Variation de moyenne avec bruit	4,48E-11	-2,47E-02	4,13E-04	4,13E-04	4,13E-04	-4,13E-04
	Variation de moyenne sans bruit	-1,02E-12	2,62E-01	4,09E-04	4,09E-04	4,09E-04	-4,09E-04
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-4,06E-04	4,05E-04	4,06E-04	-4,05E-04
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-3,98E-04	3,98E-04	3,98E-04	-3,98E-04
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,00	0,00	11,23	10,50	10,72	-10,94
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,00	0,00	11,13	10,41	10,63	-10,85
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-11,04	10,30	10,54	-10,73
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-10,84	10,14	10,35	-10,56

Tableau IV.12 : Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques pour l'instrumentation initiale (extrait).

Lorsque le résidu a une sensibilité théoriquement nulle, mais que la panne intervient dans son expression dynamique, il est inscrit '0' dans le tableau, et '-' s'il n'intervient pas.

Pour le paramètre de débit de fuite Q_f , les sensibilités théoriques et pratiques sont très proches, avec ou sans bruit. Pour le gain du régulateur K_r , la sensibilité théorique pour le résidu qui varie le plus correspond à la pratique. Pour les autres résidus, les variations sont peu importantes.

Pour le coefficient de pertes de charge R , deux valeurs de sensibilités pratiques seulement étaient prévues par la théorie, pour les résidus R2 et R8, pour chaque sens de variation du paramètre.

Pour le coefficient de frottement visqueux μ_v et la force de collage F_c , les sensibilités pratiques avec bruit peuvent être très différentes des sensibilités sans bruit. En fait, ces paramètres sont multipliés par le signe de la vitesse de déplacement des vérins $\frac{dX}{dt}$, donc le

bruit peut influencer le point de fonctionnement serrage/desserrage. De plus, la théorie ne prévoyait aucun niveau de sensibilité observé en pratique.

Pour les paramètres Q_{nh} et Q_{nb} , les sensibilités obtenues théoriquement à partir des expressions analytiques des résidus sont difficilement interprétables en raison du sens de serrage. Dans un sens (serrage ou desserrage), la sensibilité est nulle, dans l'autre, elle ne l'est pas, la valeur numérique indiquée dans le tableau correspond donc à la moyenne de ces deux sensibilités.

La théorie ne permet donc pas d'évaluer toutes les sensibilités, d'autant plus que certaines sont nulles théoriquement, et non nulles pratiquement.

IV Robustesse

Pour être exploitable, les résidus doivent être calculés avec la plus grande précision. Une imprécision de la valeur des paramètres du modèle entraîne une modification de la valeur des résidus. L'effet de la défaillance peut alors être noyé dans cette imprécision. Les paramètres qui ont été identifiés pour la cage sont connus avec une forte incertitude, liée de plus à leur variabilité au cours du laminage d'une même bande de métal ou de bande à bande. Ces paramètres, appelés incertains sont : le module de cédage de la cage, M_{ced} , le module de cédage de la cage associé à la force de contre-flexion M_{ced2} , le module de cédage de la cage associé à la vitesse M_{ced3} , et le coefficient de tarage S_0 . Le résidu R_2 qui utilise la relation cage est donc imprécis. Les sensibilités des résidus à ces paramètres doivent être faibles afin que le résidu reste exploitable.

Les sensibilités du résidu à ces paramètres sont donc évaluées.

L'expression de R_2 en régime statique ($p = 0$) est :

$$2A \cdot P_v - M_{ced} \cdot [\Delta H_s + X + S_0] - 2 \left(1 - \frac{M_{ced}}{M_{ced2}} \right) \cdot F_w + \frac{M_{ced}}{M_{ced3}} Vit - P_v \cdot \mu_v \cdot sg(V) - F_{cste} \cdot sg(V)$$

Le calcul des sensibilités du résidu R_2 aux paramètres incertains de la cage donne :

pour M_{ced} :

$$\frac{\partial R_2}{\partial M_{ced}} = - \left(\Delta H_s + X_{mes} + S_0 - \frac{1}{M_{ced3}} Vit \right) + 2 \frac{F_{worb}}{M_{ced2}}$$

pour M_{ced2} :

$$\frac{\partial R_2}{\partial M_{ced2}} = -2 \frac{M_{ced}}{M_{ced2}^2} F_{worb}$$

pour M_{ced3} :

$$\frac{\partial R_2}{\partial M_{ced3}} = - \frac{M_{ced}}{M_{ced3}^2} Vit$$

pour S_0 :

$$\frac{\partial R_2}{\partial S_0} = - M_{ced}$$

Pour une variation de moyenne de R_2 égale à un écart-type, soit $\sigma_{R_2} = 6,16 \cdot 10^4$ N, on détermine quelle est la variation du paramètre qui provoque une telle défaillance, ainsi que sa valeur par rapport à sa valeur nominale :

Paramètre	Valeur nominale	Variation	Variation relative
S_0 (m)	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$-1,61 \cdot 10^{-5}$	-1,45 %
M_{ced} (TF / mm)	411	-6,25	-1,52%
M_{ced2} (TF / mm)	652	-86,85	-13,32 %
M_{ced3} (s^{-1})	-87519	7319	8,36 %

Tableau IV.13 : Variations des paramètres incertains entraînant une variation de moyenne de R_2 égale à un écart-type.

Une variation très minime des paramètres S_0 et M_{ced} de la cage entraîne des variations importantes du résidu R2. Ces deux paramètres étant connus avec une forte imprécision, le résidu R2 aura une moyenne non nulle lorsqu'il sera calculé avec des données réelles, pour lesquelles ces paramètres sont amenés à se modifier au cours des laminages successifs et qu'il faudrait alors recalculer systématiquement avec une grande précision. Aussi, il faudra considérer le système de surveillance sans ce résidu, qui ne serait être exploitable en ligne.

V. Conclusion

Le travail d'évaluation des possibilités de surveillance a nécessité une étude approfondie des sensibilités. Il a été nécessaire de déterminer qualitativement et quantitativement les influences des défaillances sur les résidus. L'imprécision apportée par des paramètres qui n'appartiennent pas au cahier des charges a permis de mettre en évidence que certains résidus ne pourront être utilisés pour la surveillance.

Ces résultats sont indispensables pour concevoir les procédures de décision et en analyser les résultats avec fiabilité.

Chapitre 5 : Décision

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la procédure de décision appliquée au modèle de serrage hydraulique. L'objectif de la décision est d'effectuer un choix entre deux hypothèses : le système est en fonctionnement normal, H_0 ou en fonctionnement défaillant H_1 . Ce choix est réalisé à partir d'une reconnaissance logique, grâce à un test qui associe pour chaque résidu i l'hypothèse H_0^i ou H_1^i (cf. chapitre 2). Ce test détecte un changement de moyenne ou de variance du résidu, qui révèle l'influence d'une défaillance. A partir des hypothèses effectuées sur les résidus, la procédure de localisation doit déterminer l'état de fonctionnement du système. La qualité du résultat final est, comme nous le verrons, fortement liée aux performances de l'algorithme de détection.

Aussi, dans un premier temps nous présentons quelques algorithmes de détection. Les principes de ces algorithmes sont rappelés ainsi que les précautions à prendre pour une application. Les algorithmes sont classés en deux groupes : les tests de changements de moyenne et les tests de changements de variance.

Ensuite, quelques unes de ces méthodes sont appliquées à la simulation du serrage hydraulique. Nous allons chercher l'amplitude minimale de défaillance détectable par ces méthodes, qui permettront de s'apercevoir si les objectifs fixés par le cahier des charges sont réalisables.

L'application de la procédure de localisation va permettre de vérifier dans quelles mesures les défaillances détectées sont localisables. Nous rassemblons alors les défaillances en plusieurs groupes pour chaque signature détectée. Nous montrons les apports de l'instrumentation complémentaire grâce aux résultats de la détection et de la localisation pour toutes les défaillances.

Enfin, nous étudions l'évolution des performances de la surveillance en supprimant les résidus insuffisamment robustes aux paramètres incertains.

1 Algorithmes de décision

Nous présentons dans cette partie quelques méthodes de détection rencontrées dans la littérature. Nous nous limitons cependant aux méthodes statistiques, puisque les résidus dont nous disposons sont seulement décrits par des caractéristiques statistiques.

Introduction du problème :

Les signaux pour lesquels on cherchera à détecter un saut de moyenne ou d'écart-type sont considérés comme gaussiens, comme nous l'avons vérifié dans le chapitre 3. La loi de probabilité d'un signal r ayant une distribution gaussienne est donnée par :

$$p_x(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

Cette loi est caractérisée par les deux premiers moments $\mu = \text{Esp}(r)$ et $v = \text{Var}(r) = \sigma^2$ et est notée $N(\mu, \sigma^2)$. Chacune de ces deux caractéristiques est susceptible d'être influencée par une défaillance. Leur valeur peut varier aussi brusquement que la valeur du paramètre défaillant.

Supposons le signal décrit à chaque instant par :

$$r_k = \mu_k + \varepsilon_k \quad (2)$$

$k = 1$ à n .

où ε_k est un bruit blanc, gaussien, centré et de variance σ_k^2 et μ_k est la moyenne du signal r pour $k = 1$ à n .

La moyenne et l'écart-type du signal r sur toute la fenêtre de 1 à n valent :

$$\mu_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} r_k \quad (3)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{k=n} (r_k - \mu_0)^2 \quad (4)$$

En cas de changement de la moyenne de r , il existe un instant ρ tel que :

$$\mu_k = \begin{cases} \mu_0 & \text{si } k \leq \rho - 1 \\ \mu_1 & \text{si } k \geq \rho. \end{cases} \quad (5)$$

En cas de changement de la variance de r , il existe un instant ρ tel que :

$$\varepsilon_k \text{ est un bruit blanc, gaussien, centré et de variance } \begin{cases} \sigma_0^2 & \text{si } k \leq \rho - 1 \\ \sigma_1^2 & \text{si } k \geq \rho \end{cases} \quad (6)$$

Le problème consiste à déterminer, à l'instant n , l'instant de changement ρ et la valeur des moyennes μ_0 et μ_1 avant et après changement.

Certaines des méthodes de détection présentées ici s'appliquent uniquement à des signaux gaussiens, tandis que d'autres sont définies dans un cas plus général. Toutes les méthodes présentées s'appliquent à des défaillances de type rupture, c'est à dire qu'il existe un instant ρ pour lequel un signal gaussien décrit par une moyenne μ et un écart-type σ change brutalement de caractéristiques. Deux types de rupture peuvent se produire :

- un changement brutal de moyenne
- un changement brutal d'écart-type ou rupture spectrale.

Les méthodes ci-dessous peuvent détecter l'une ou l'autre de ces ruptures et sont donc classées en deux groupes.

I.1. Détection d'un saut de moyenne

Le signal est caractérisé par la loi normale notée $N(\mu, \sigma^2)$, et on se place dans le cas où le signal passe d'une moyenne μ_0 à une moyenne μ_1 à l'instant ρ , avec une variance σ^2 .

I.1.1. Moyenne connue avant et après rupture.

Dans ce paragraphe, on se place dans le cas où l'on connaît l'amplitude de la défaillance ν , mais pas l'instant de rupture ρ .

Le problème de détection consiste à tester entre l'hypothèse d'aucune défaillance :

$$H_0 : \rho > n$$

et l'hypothèse de changement :

$$H_1 : \rho \leq n$$

Le rapport de vraisemblance entre les deux hypothèses est défini par :

$$\prod_{k=\rho}^n \frac{p_1(r_k)}{p_0(r_k)} \quad (7)$$

où p_i est la densité de probabilité gaussienne de moyenne μ_i ($i = 0, 1$) et de variance $\sigma_i = \sigma^2$, ($i = 0, 1$). En remplaçant p_0 et p_1 par leur expression, le logarithme du rapport de vraisemblance est alors :

$$A_n = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma^2} \sum_{k=\rho}^n \left(r_k - \frac{\mu_1 + \mu_0}{2} \right) = \frac{1}{\sigma^2} S_\rho^n(\mu_0, \nu)$$

où

$$S_i^j(\mu, \nu) = \nu \sum_{k=i}^j \left(r_k - \mu - \frac{\nu}{2} \right)$$

et $\nu = \mu_1 - \mu_0$ est l'amplitude du saut.

En remplaçant l'instant ρ de changement par son estimation du maximum de vraisemblance (MLE) sous H_1 :

$$\hat{\rho}_n = \arg \max_{1 \leq \rho \leq n} \left[\prod_{k=0}^{\rho-1} p_0(r_k) \prod_{k=\rho}^n p_1(r_k) \right] = \arg \max_{1 \leq \rho \leq n} S_\rho^n(\mu_0, \nu) \quad (8)$$

L'indicateur de changement est défini par :

$$g_n \stackrel{\Delta}{=} A_n(\hat{\rho}_n) = \max_{\rho} S_\rho^n(\mu_0, \nu)$$

à comparer à un seuil λ . On décide H_1 et on arrête le test si g_n dépasse λ , sinon l'hypothèse H_0 est conservée, et on continue le test jusqu'à décider H_1 .

On peut encore écrire ce détecteur de la manière suivante :

on détecte au premier instant où

$$g_n = S_1^n(\mu_0, \nu) - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^k(\mu_0, \nu) > \lambda$$

Cet indicateur est appelé règle d'arrêt de Page-Hinkley [Page 54], [Hink 71] ou algorithme de la somme cumulée (CUSUM), et peut être calculé de la manière récursive suivante:

$$g_n = \left(g_{n-1} + r_n - \mu_0 - \frac{\nu}{2} \right)^+ \quad (9)$$

$$\text{avec } (x)^+ = \sup(0, x)$$

La règle d'arrêt de Page-Hinkley minimise le retard moyen à la détection pour un taux de fausse alarme fixé [BASS 86].

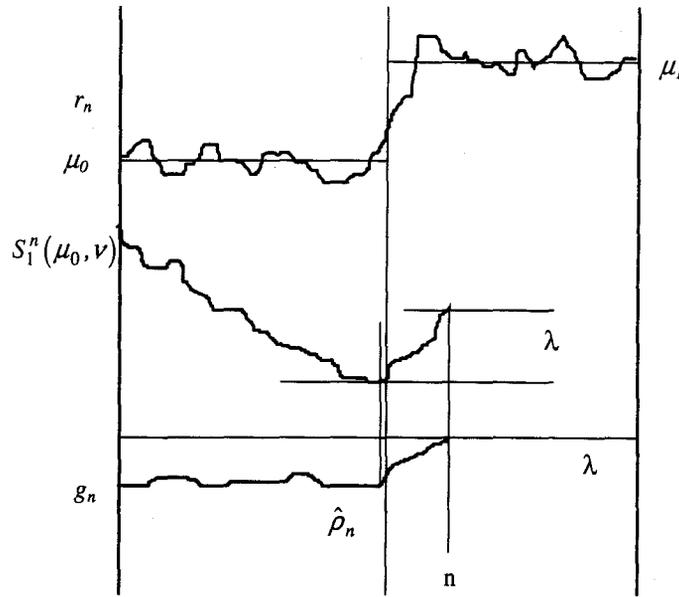


Figure V.1 : Comportement du test de Page-Hinkley.

1.1.2 Moyenne inconnue après rupture.

On se place désormais dans le cas le plus proche de la réalité : on ne connaît pas l'amplitude du saut ν , c'est à dire que l'on ne connaît plus la moyenne μ_1 après le changement.

- **Méthode de la variable centrée**

Une première approche consiste à estimer la moyenne m_i du signal sur une fenêtre mobile de longueur $N = 2m + 1$ ainsi que son écart type s_i :

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=-m}^{j=m} r_{i+j} \quad (10)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=-m}^{j=m} (r_{i+j} - m_i)^2 \quad (11)$$

Alors, si μ_0 est la moyenne de référence, la variable u_i suit une loi normale centrée et réduite :

$$u_i = \frac{m_i - \mu_0}{s_i / \sqrt{N}} \quad (12)$$

Il suffit alors de comparer cette valeur u_i à une valeur de seuil positive α_1 et négative α_2 . Ces seuils peuvent être calculés en fixant un taux de fausses alarmes.

Paramètres du test :

Pour le test de la variable centrée, deux paramètres sont à faire varier : la taille de la fenêtre de l'estimation de la moyenne et de l'écart-type N , et le taux de fausses alarmes pour les seuils α_1 et α_2 .

- variation de la fenêtre N .

La qualité de l'estimation m_i de la moyenne du signal va dépendre de la taille de la fenêtre. Plus N sera grand, meilleure sera l'estimation. En pratique, il faut prendre $N > 30$ points pour une estimation correcte. Cependant, le retard à la détection est égal à m puisqu'il faut attendre d'enregistrer N points pour effectuer le calcul de la moyenne à l'instant i et de détecter un saut de moyenne à l'instant $i - m$.

- variation du taux de fausse alarme.

Pour que le signal ait la même probabilité de dépasser le seuil de fonctionnement normal en valeur positive et en valeur négative, il faut prendre $\alpha_1 = \alpha_2$. Pour un taux de fausses alarmes de 0,1%, on aura $\alpha_1 = 3,1$; pour un taux de 5 %, $\alpha_1 = 1,96$.

Il a été montré que ce test est relativement insensible aux sauts de variance, dérives de moyenne et valeurs aberrantes [HOLZ 92].

• **Test du χ^2**

Il est également possible de détecter une variation de moyenne par un changement d'écart-type. Le principe est d'estimer la variance du signal sans estimer sa moyenne. Si la moyenne du signal change, l'estimation de la variance est faussée et augmente. Si le signal suit la loi d'une population normale, alors la variable suivante suit une loi du χ^2 à $N-1$ degrés de liberté :

$$\chi^2 = \frac{Ns_i^2}{\sigma_0^2} \qquad s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=-m}^{j=m} (y_{i+j} - \mu_0)^2$$

On compare cette variable à un seuil évalué également par des considérations probabilistes (test unilatéral) à partir du taux de fausses alarmes.

Paramètres du test :

Pour ce test, deux paramètres sont à faire varier : la taille de la fenêtre de l'estimation de la moyenne et de l'écart-type N , et le taux de fausses alarmes pour le seuil α_1 .

- La taille de la fenêtre doit également être prise supérieure à 30 points pour obtenir une estimation correcte.

- Le seuil α_1 est également calculé à partir d'un taux de fausses alarmes, mais dépend également du nombre de degrés de liberté $N - 1$.

Le test de détection de moyenne par approximation fonctionnelle décrit dans [HOLZ 92] est équivalent au test du χ^2 et ne sera donc pas développé ici.

• **Détection par la méthode de variation d'un filtre dérivateur [RAGO 90]**

L'idée est de détecter les fortes variations du signal par des fortes valeurs d'un filtre dérivateur. Si l'on travaille sur une fenêtre de longueur $2.n$, on peut par exemple calculer la moyenne du signal sur les n premiers points (m^1) et les n derniers (m^2). Le filtre est alors :

$$y_i = \frac{m_i^1 - m_i^2}{n}$$

A l'instant de changement de moyenne, le filtre atteint sa valeur maximum. On compare alors la valeur du filtre à un seuil λ . Ce seuil et la taille de la fenêtre sont choisis pour minimiser le nombre de fausses alarmes.

Les moyennes m^1 et m^2 suivent une loi normale, puisque le signal testé est par hypothèse un signal gaussien. Chaque moyenne, calculée sur une fenêtre de longueur n a pour loi $N(m, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$. En l'absence de défaillance, la variable y qui est la différence de 2 signaux gaussiens

suit une loi normale, et a pour loi $N(0, \frac{\sigma\sqrt{2}}{n\sqrt{n}})$. Il est possible alors de déterminer le seuil de détection à partir d'un taux de fausses alarmes donnés.

L'inconvénient de cette approche est qu'elle ne peut fonctionner que pour les pannes franches, et d'amplitude assez importante.

Le test de détection par corrélation avec un modèle est équivalent à cette méthode. La justification pourra être trouvée dans [HOLZ 92].

• **Règle d'arrêt de Page - Hinkley**

Une autre approche consiste à exécuter en parallèle la règle d'arrêt de Page-Hinkley correspondant à un saut de moyenne minimum choisi v_m à détecter dans deux directions possibles : saut de moyenne positif ou négatif. Les règles d'arrêt correspondantes sont les suivantes :

saut négatif :

$$\begin{cases} T_0 = 0 \\ T_n = \sum_{k=1}^n \left(r_k - \mu_0 + \frac{v_m}{2} \right) \\ M_n = \max_{0 \leq k \leq n} T_k \\ \text{Alarme si } M_n - T_n > \lambda \end{cases} \quad (13)$$

saut positif :

$$\begin{cases} U_0 = 0 \\ U_n = \sum_{k=1}^n \left(r_k - \mu_0 - \frac{v_m}{2} \right) \\ m_n = \min_{0 \leq k \leq n} U_k \\ \text{Alarme si } U_n - m_n > \lambda \end{cases} \quad (14)$$

La décision prise est la première règle qui stoppe. Le temps du saut ρ est l'instant correspondant au dernier extremum avant la détection.

Une seconde approche consiste à remplacer l'amplitude du saut par son estimation au sens du maximum de vraisemblance (MLE) :

$$H_1 : \max_{1 \leq \rho \leq n} \max_{\nu} S_{\rho}^n(\mu_0, \nu) > \lambda \quad (15)$$

Par définition (5) on a :

$$\hat{\nu}_n \stackrel{\Delta}{=} \arg \max_{\nu} S_{\rho}^n(\mu_0, \nu) = \frac{1}{n - \rho + 1} \sum_{k=\rho}^n (r_k - \mu_0) \quad (16)$$

Ainsi, la double maximisation (15) est réduite à une seule maximisation.

Paramètres du test :

Pour ce test, deux paramètres sont à faire varier : l'amplitude de défaillance minimum à détecter v_m et le seuil λ .

L'amplitude de panne minimum à détecter v_m peut être exprimée en nombre d'écart-type du signal δ , soit :

$$v_m = \delta \cdot \sigma_0$$

Une étude a montré que la détection est optimale lorsque l'amplitude de la défaillance estimée v_m est égale à l'amplitude de la défaillance ν .

I.2 Détection de rupture spectrale

Les algorithmes de détection de rupture spectrale sont répartis en deux classes distinctes :

- les méthodes qui testent les propriétés statistiques d'un signal.
Le signal est étudié sous les deux hypothèses H_0 et H_1 , chaque méthode utilise alors un test spécifique pour détecter le comportement attendu du signal lorsqu'un changement brusque d'écart-type s'est produit.
- les méthodes qui utilisent la comparaison de modèles.
La deuxième classe comprend les méthodes qui sont basées sur une estimation au sens du maximum de vraisemblance de l'instant et de l'amplitude des changements, afin d'obtenir des performances statistiques proches de l'optimalité. L'approche statistique correspondante est celle du rapport de vraisemblance généralisé (RVG) de [Will 76b].

1.2.1 Inspection d'une statistique

- **Test de la nervosité d'un signal**

Ce test mesure le nombre de dépassement consécutif d'un seuil fixé a priori en fonction de la probabilité de fausse alarme désirée :

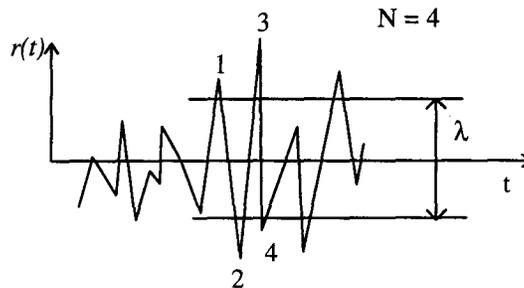


Figure V.2 : Inspection d'une statistique.

La présence d'un saut est décidée si le nombre de dépassements consécutifs est supérieur ou égal à N fixé (généralement 4 ou 5), à l'instant $t_a = t - N + 1$.

Sous l'hypothèse gaussienne, le seuil λ est directement lié à la probabilité de fausses alarmes (Pfa) :

$$Pfa = (\text{Prob} (|r_k| > \lambda))^N \text{ où } \text{Prob} (|r_k| > \lambda) = (1 - 2 F(\lambda/\sigma_0))$$

$$\text{et } F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

Cette méthode est assez grossière et ne fonctionne que pour des sauts spectraux larges [VOZE 94].

- **Test de Fischer**

Si l'on dispose de l'estimation de l'écart-type du signal s_i par (10) et (11), sur une fenêtre temporelle centrée de longueur N :

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=-m}^{j=m} r_{i+j} \tag{10}$$

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=-m}^{j=m} (r_{i+j} - m_i)^2 \tag{11}$$

le rapport :

$$F = \frac{s_i}{\sigma_0} \tag{17}$$

avec σ_0 l'estimation de l'écart-type du signal sur la fenêtre de longueur n ,

suit une loi de Fischer à (N-1, n-1) degrés de liberté. Il est possible de déduire dans les tables les valeurs de cette distribution pour un taux de fausses alarmes fixé. On compare alors la valeur de cette distribution au seuil ainsi déterminé.

• **Test de blancheur.**

La blancheur est testée en calculant une estimation ergodique de la valeur de la fonction de corrélation pour un décalage unitaire. Cette estimation est réalisée au moyen de l'équation récurrente suivante :

$$\rho_k = \alpha \rho_{k-1} + (1 - \alpha) r_k r_{k-1}$$

où α est un facteur d'oubli exponentiel ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Le détecteur repose alors sur le choix entre les deux hypothèses suivantes :

- en l'absence de saut, la variable ρ_k est centrée
- en présence de saut, la variable ρ_k n'est plus centrée.

Le problème initial de détection d'un changement d'écart-type se rapporte alors à un problème de détection de changement de moyenne de la variable ρ_k .

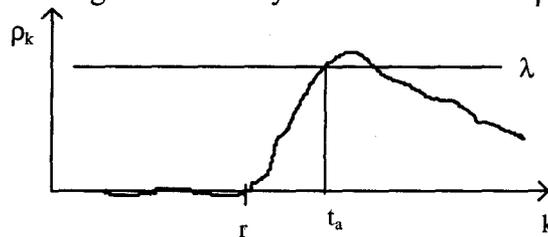


Figure V.3 : Test de blancheur.

Il est possible de calculer une estimation de la probabilité de fausses alarmes (Pfa) pour un seuil λ fixé a priori :

$$Pfa = 1 - \text{Prob} (|r_k r_{k-1}| < \frac{\lambda}{\alpha}) \text{ où } \text{Prob} (|r_k r_{k-1}| < \frac{\lambda}{\alpha}) = \frac{1}{\pi \hat{\sigma}_0^2} \int_{-\lambda/\alpha}^{\lambda/\alpha} K\left(\frac{|w|}{\hat{\sigma}_0^2}\right) dw$$

où $\hat{\sigma}_0^2$ est l'estimation de la variance de $e(t)$ et

$$K(w) = \int_0^{\infty} e^{-w \cos \text{hyp}(t)} dt \text{ pour } w > 0.$$

1.2.2 Comparaison de modèles

Ces méthodes reposent sur l'estimation parallèle de deux ou trois modèles du signal analysé. La différence des méthodes correspond à différents choix de distances entre modèles estimés et de fenêtres d'estimation. La plupart de ces méthodes sont basées sur le rapport de vraisemblance généralisé.

• **Rapport de vraisemblance généralisé.**

Le rapport de vraisemblance entre les deux hypothèses est défini par :

$$\prod_{k=\rho}^n \frac{p_1(r_k)}{p_0(r_k)} \tag{7}$$

où p_i est la densité de probabilité gaussienne de moyenne $\mu_i = \mu_0$ ($i = 0, 1$) et de variance σ_i ($i = 0, 1$), ρ est l'instant de changement d'hypothèse.

Le logarithme du rapport de vraisemblance est alors :

$$S_{\rho}^n(\sigma_0, \eta) = \sum_{k=\rho}^n \text{Log} \frac{p_1(r_k)}{p_0(r_k)}$$

où $\eta = \sigma_1 - \sigma_0$ est l'amplitude du saut de variance.

L'instant ρ et le saut de variance η étant inconnus a priori, ils sont remplacés par leur estimation au sens du maximum de vraisemblance :

$$\hat{\rho} = \arg \max_{1 \leq \rho \leq n} S_{\rho}^n(\sigma_0, \eta)$$

$$\hat{\eta} = \arg \max_{\eta} S_{\rho}^n(\sigma_0, \eta)$$

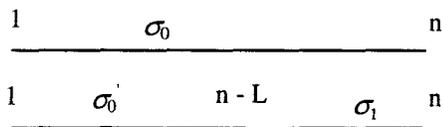
La fonction de décision est alors la suivante :

$$g_n = \max_{\rho} \max_{\eta} S_{\rho}^n(\sigma_0, \eta) \begin{matrix} > \lambda & H_1 \\ < \lambda & H_0 \end{matrix}$$

Lorsque g_t dépasse un seuil λ fixé a priori, alors H_1 doit être décidée.

Cette double maximisation est longue en temps de calcul. Appel et Brandt ont alors proposé une simplification de la méthode précédente. Celle-ci revient à comparer l'estimation de l'écart-type σ_0 à σ_1 estimé sur une fenêtre glissante de taille L $\{n - L + 1; \dots, n\}$ et non plus sur toute la fenêtre $\{\rho, \rho + 1, \dots, n - 1, n\}$. Lorsque $\rho = n - L + 1$, alors la fonction de décision peut être envisagée. Elle reste satisfaisante sans introduire trop de fausses alarmes supplémentaires pour une valeur de L suffisamment élevée ($L = 100$).

- Test de Brandt.



Cette méthode a été proposée par Appel et Brandt (1983). Elle est basée sur l'utilisation d'une distance entre les lois de probabilités conditionnelles avant et après changement, issue de l'écriture du rapport de vraisemblance généralisée entre les deux hypothèses H_0 et H_1 . Les modèles comparés sont identifiés sur les fenêtres ci-dessus pour lesquelles on estime l'écart-type du signal $\hat{\sigma}_0, \hat{\sigma}_0', \hat{\sigma}_1$, ce qui conduit à la fonction de décision suivante :

$$g_n = n \text{Log } \hat{\sigma}_0^2 - [(n-L) \text{Log } \hat{\sigma}_0'^2 + L \text{Log } \hat{\sigma}_1^2] \begin{matrix} > \lambda & H_1 \\ < \lambda & H_0 \end{matrix}$$

l'estimation de l'instant de changement ρ peut être faite dans une seconde étape.

- D'autres méthodes de comparaison de modèles nécessitent un modèle auto régressif du signal et donc une étape d'identification préliminaire :
 - la distance cepstrale, basée sur la norme quadratique moyenne de la différence du logarithme de leur densité spectrale de puissance respective
 - le test de divergence - Hinkley construit avec l'erreur de prédiction $\varepsilon = \hat{y} - y$
 - la méthode locale, qui utilise des petites variations du modèle autour du modèle de fonctionnement nominal [Niki 86], [Bass 93].

II Applications

II.1 Recherche de limites de détection

Lors de la conception du cahier des charges, nous nous sommes intéressés aux amplitudes minimales de défaillances à détecter. Cette fois ci, nous recherchons l'ensemble des amplitudes minimales de défaillances détectables. La comparaison de ces deux ensembles de valeurs nous permettra de dégager les objectifs qui pourront être effectivement atteints. L'amplitude minimale de la défaillance à détecter est appelée limite de détection. Cette limite est définie comme la plus petite valeur détectable par le test de détection. Parmi les méthodes proposées dans le chapitre précédent, deux tests ont été retenus : un test hors ligne, le saut réduit et un test en ligne, le test de Page-Hinkley.

II.1.1 Limites de détection par le test du saut réduit

II.1.1.1 Intérêt

Le test du saut réduit est très simple à calculer et à mettre en oeuvre. Le test est effectué hors ligne afin de pouvoir estimer la moyenne après changement sur toute la durée de la défaillance. Ceci nécessite donc de connaître l'instant d'apparition de la défaillance. L'estimation de la moyenne sur toute la durée de la défaillance est le meilleur estimateur de l'amplitude de la variation de la moyenne du résidu que l'on puisse obtenir. Ce premier test a pour but de déterminer rapidement les amplitudes minimales de défaillances détectables.

II.1.1.2 Principe

Sur le simulateur complet (simulation du passage de la tôle entre les cylindres de travail, ajout de bruits sur Pa, Xm, Is), les entrées Fworb, Vit, Smon, Sagg sont prises identiques à celles mesurées sur le site industriel pour la bande n°4 (durée de laminage totale 41,52 s). Les défaillances sont introduites sous la forme d'un échelon à T = 20 s et sont maintenues jusqu'à la fin de laminage de la bande.

Le saut réduit qui teste la nullité de la différence de deux moyennes est calculé comme suit pour chaque essai :

$$\text{Saut réduit} = \frac{m_1 - m_2}{\frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\sqrt{N}}}$$

m_1, σ_1 : moyenne et écart type du résidu en essai nominal (sans défaillance) après 20 s

m_2, σ_2 : moyenne et écart type du résidu après 20 s, pour une simulation avec une défaillance.

N nombre d'échantillons après 20 s (soit 2152 pour la bande n°4)

Ce test est équivalent au test de la variable centrée défini par (8) et (9), mais l'instant de défaillance ρ est connu et le test est appliqué hors ligne. La variation de moyenne du résidu est considérée comme significative si le saut réduit dépasse la valeur 2 (ce qui équivaut à un risque de fausse alarme de 5%).

Pour chaque paramètre, on cherche l'amplitude limite de l'échelon de défaillance qui provoque une variation de moyenne significative (avec un risque 5% de fausse détection) d'au moins un résidu.

Le critère d'arrêt décidant que la limite est atteinte est le suivant :

$$2 < \text{saut réduit}(R_i) < 2,1$$

Exemple pour l'instrumentation initiale pour les variations positives et négatives de Q_{nb} et Q_{nh} :

Paramètres	Q_{nb} en m^3/s	Q_{nb} en m^3/s	Q_{nh} en m^3/s	Q_{nh} en m^3/s
Valeur nominale	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$
Valeur limite de détection	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$
Valeur des sauts réduits pour :				
R1	$2,13 \cdot 10^{-15}$	$9,90 \cdot 10^{-16}$	$1,44 \cdot 10^{-15}$	$5,94 \cdot 10^{-16}$
R2	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$4,38 \cdot 10^{-3}$
R3	2,05	2,06	2,00	2,01
R4	1,92	1,93	1,87	1,88
R5	1,96	1,97	1,91	1,92
R6	2,00	2,01	1,95	1,96

Tableau V.1 : Valeurs du saut réduit pour la limite de détection pour l'instrumentation initiale (extrait).

II.1.1.3 Résultats

Les tableaux ci dessous donnent pour chaque paramètre :

- sa valeur nominale v_n (valeur du paramètre en fonctionnement normal)
- sa valeur de défaillance v_d , définie par le cahier des charges (chapitre 2)
- sa valeur limite de détection v_l pour le saut réduit au sens vu précédemment
- la variation du paramètre à la valeur limite de détection relativement à sa valeur nominale, soit :

$$\frac{v_l - v_n}{v_n}$$

- la comparaison de la valeur limite détectable à la valeur de défaillance du cahier des charges par l'indicateur suivant :

$$\text{comp} = \frac{v_l - v_n}{v_d - v_n} \quad (16)$$

ainsi si $\text{comp} < 1$, le cahier des charges initial est respecté, si $\text{comp} > 1$, il ne l'est pas.

- l'indice du ou des premiers résidus qui détectent à la limite de détection.

a) Recherche de limite de détection pour l'instrumentation initiale avec le test du saut réduit

Les résultats obtenus pour les limites de détection des paramètres du cahier des charges par l'instrumentation initiale sont rassemblés dans le tableau V.2 :

• Paramètres à surveiller

Paramètres	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Valeur limite de détection pour le saut réduit	Variation par rapport à la valeur nominale	Comparaison par rapport au cahier des charges	Résidus en détection
Qf en m3/s	0	$8,85 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$		0,25	4
Kr en A/m	40	36,5	1,425	-96%	11,02	1
Kr en A/m	40	43,5	76,325	91%	10,38	1
R en s-1	32,21	25,23	impossible		impossible	
R en s-1	32,21	38,99	impossible		impossible	
f en N,s/m	$3 \cdot 10^6$	$5,85 \cdot 10^6$	impossible		impossible	
f en N,s/m	$3 \cdot 10^6$	$6,10 \cdot 10^7$	$6,19 \cdot 10^8$	20525%	10,61	2
β en Pa/s	$1,56 \cdot 10^9$	$1,17 \cdot 10^9$	$3,23 \cdot 10^7$	-98%	3,92	3,5,6
β en Pa/s	$1,56 \cdot 10^9$	$2,075 \cdot 10^9$	impossible		impossible	
μ_v en Pa/s	0	0,0057	0,08		14,03	2
Fcste en N	0	$2,2 \cdot 10^4$	$3,99 \cdot 10^5$		18,18	2
ξ	0,9	0,74	0,0005	-99,9%	5,62	3,5,6
ξ	0,9	1,063	impossible		impossible	
ω_0 en rad/s	410	330	4,6	-99%	5,07	1
ω_0 en rad/s	410	600	impossible		impossible	
Qn _b en m3/s	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	-37%	4,12	3,6
Qn _b en m3/s	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	60%	6,64	3,6
Qn _h en m3/s	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	-36%	4,29	3
Qn _h en m3/s	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$	59%	6,73	3
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$6,0 \cdot 10^{-12}$		0,27	3

Tableau V.2 : Limites de détection par le test du saut réduit pour l'instrumentation initiale.

Remarques :

Les cas de détection impossible pour R (en variation négative), β , ξ , ω_0 (en variation positive) correspondent aux cas où l'amplitude de la variation du paramètre a provoqué une saturation du courant Is. De plus, les sensibilités sont quasi nulles pour ces paramètres et la variation de la valeur de ces paramètres augmente la dynamique du système sans être détectable sur la moyenne des résidus.

Pour la variation positive de R ($R > 32$) il n'y a pas eu de saturation du courant mais aucune détection n'a été possible même pour des valeurs très élevées du paramètre.

Cette première étude permet déjà de dégager un groupe de paramètres dont les variations seront plus faciles à détecter que les autres. En effet la fuite au niveau de la tuyauterie Qf ou le coefficient de fuite du vérin hydraulique K₁, sont déjà détectables par ce premier test pour des variations raisonnables.

Les variations des autres paramètres semblent beaucoup plus difficiles à détecter. Il faut en effet soit pratiquement annuler le paramètre soit l'augmenter dans des proportions importantes et parfois bien au-delà d'un cahier des charges réaliste. Il est à noter que les sensibilités de l'ensemble des résidus aux paramètres R, f, β , ω_0 , ξ , sont théoriquement toutes nulles, comme nous l'avons vu dans l'étude des sensibilités statiques (cf. annexe 6) ce qui explique les résultats ci-dessus.

Parmi les 6 résidus que comprend le système de surveillance ceux qui détectent en premier les variations des paramètres à surveiller sont les résidus R1, R3, R4, R5 ou R6 pour tous les paramètres exceptés μ_v , Fc, f pour lesquels R2 détecte le premier.

Conclusion :

Cette première étude montre que le cahier des charges est loin d'être respecté. Seul deux paramètres peuvent être détectés en cas de défaillances à la valeur définie par l'étude préliminaire.

b) Comparaison des performances instrumentation initiale/ complémentaire

L'instrumentation complémentaire comporte plus de résidus que l'instrumentation initiale, et plus de défaillances de paramètres sont théoriquement détectables par les tests de changements de moyenne des résidus (cf. annexe 6). Aussi, les limites de détection par le saut réduit pour l'instrumentation complémentaire doivent donc être inférieures ou égales.

• Paramètres à surveiller

Paramètres	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Valeur limite de détection pour le saut réduit				Comparaison par rapport au cahier des charges	
			Résidus en détection	instrumentation initiale	Résidus en détection	instrumentation complémentaire	instrumentation initiale	instrumentation complémentaire
Qf en m3/s	0	$8,85 \cdot 10^{-5}$	4	$2,21 \cdot 10^{-5}$	3,15,21	$1,50 \cdot 10^{-5}$	0,25	0,17
Kr en A/m	40	36,5	1	1,425	3,15,21	1,850	11,02	10,9
Kr en A/m	40	43,5	1	76,325	4	76,325	10,38	10,38
R en s-1	32,21	25,23		impossible	3	7,75	impossible	3,50
R en s-1	32,21	38,99		impossible	15,21	250	impossible	12,12
f en N,s/m	$3 \cdot 10^6$	$5,85 \cdot 10^5$		impossible		impossible	impossible	impossible
f en N,s/m	$3 \cdot 10^6$	$6,10 \cdot 10^7$	2	$6,19 \cdot 10^5$	6	$6,19 \cdot 10^5$	10,61	10,61
β en Pa/s	$1,56 \cdot 10^9$	$1,17 \cdot 10^9$	3,5,6	$3,23 \cdot 10^7$	21	$4,50 \cdot 10^7$	3,92	3,88
β en Pa/s	$1,56 \cdot 10^9$	$2,075 \cdot 10^9$		impossible	21	$8 \cdot 10^9$	impossible	12,50
μ_v en Pa/s	0	0,0057	2	0,08	6	0,08	14,03	14,03
Fcste en N	0	$2,2 \cdot 10^4$	2	$3,99 \cdot 10^5$	6	$3,99 \cdot 10^5$	18,18	18,18
ξ	0,9	0,74	3,5,6	0,0005	11,16,23	0,0005	5,62	5,59
ξ	0,9	1,063		impossible		impossible	impossible	impossible
ω_0 en rad/s	410	330	1	4,6	4	4,6	5,07	5,07
ω_0 en rad/s	410	600		impossible		impossible	impossible	impossible
Qn _b en m3/s	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	3,6	$2,39 \cdot 10^{-3}$	15,21	$2,95 \cdot 10^{-3}$	4,12	2,44
Qn _b en m3/s	$3,78 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$	3,6	$6,04 \cdot 10^{-3}$	15,21	$4,95 \cdot 10^{-3}$	6,64	3,44
Qn _h en m3/s	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	3	$1,60 \cdot 10^{-3}$	3,15,21	$1,75 \cdot 10^{-3}$	4,29	3,57
Qn _h en m3/s	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	3	$3,98 \cdot 10^{-3}$	3,15,21	$3,95 \cdot 10^{-3}$	6,73	6,59
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	$2,2 \cdot 10^{-11}$	3	$6,0 \cdot 10^{-12}$	16	$6,0 \cdot 10^{-12}$	0,27	0,27

Tableau V.3 : Comparaison des limites de détection par le saut réduit pour l'instrumentation initiale et complémentaire.

On constate une très sensible amélioration dans certains cas, notamment pour le paramètre R, coefficient de perte de charge de la tuyauterie, qui était indétectable par l'instrumentation initiale (comme prévu par l'étude des sensibilités). Les limites de détection pour les paramètres Q_f, R, β , Qn_b, Qn_h sont inférieures à celles obtenues pour l'instrumentation initiale, grâce aux nouveaux résidus générés.

D'autre part, pour les paramètres f, K₁, μ_v , Fcste, ξ , ce sont les mêmes résidus que pour l'instrumentation initiale qui détectent en premier (il n'y a donc pas amélioration de la limite de détection pour ces paramètres avec le test du saut réduit), bien que de nouveaux résidus générés grâce à l'instrumentation complémentaire soient très proches de la détection.

c) Défaillances capteurs

En plus des variations des paramètres structuraux de l'actionneur hydraulique, le système de surveillance doit évidemment être capable de détecter les défaillances des capteurs qu'il utilise. L'étude à rouler n'étant pas possible pour les capteurs, on ne dispose pas de valeur de défaillance pour le cahier des charges.

• Instrumentation initiale

Les valeurs de défaillances initialement proposées ont été définies au chapitre 2, paragraphe III (modélisation des défaillances).

Type de panne capteur	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable	Résidu en détection
ech Is+ en A	$4,517.10^{-4}$	$3,550.10^{-5}$	1
ech Is- en A	$-4,517.10^{-4}$	$-3,550.10^{-5}$	1
ech Pv+ en Pa	$4,359.10^4$	$2,500.10^3$	2
ech Pv- en Pa	$-4,359.10^4$	$-2,500.10^3$	2
Pv= α ..Pv	0,99	0,9993	2
Pv= α ..Pv	1,01	1,0007	2
Is= α ..Is	0,99	0,25	1
Is= α ..Is	1,01	4,15	1
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	1.10^{-6}	2
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-1.10^{-6}	2
Xm= α ..Xm	1,01	1,006	2
Xm= α ..Xm	0,99	0,994	2

Tableau V.4 : Limites de détection par le saut réduit pour les défaillances capteurs.

Le résidu le plus sensible aux pannes capteurs (à part pour Is) est R2, résidu par ailleurs le moins robuste par rapport aux paramètres incertains (voir chapitre 3).

De plus on constate que les valeurs de saut réduit des autres résidus hormis R2 qui devraient être sensibles sont très faibles, ce qui signifie qu'ils n'ont pas de variation suffisamment importante pour être détectés même probablement par d'autres types de test.

• Instrumentation complémentaire

L'instrumentation complémentaire n'apporte rien pour le test du saut réduit en ce qui concerne les limites de détection des pannes capteurs. Elle ne fait que permettre la détection de défaillances des deux capteurs ajoutés.

Toutefois il apparaît des résidus complémentaires dont les valeurs de saut réduit sont supérieures à 0,1 ce qui signifie qu'ils ont des variations susceptibles d'être détectées par d'autres types de test .

Type de panne capteur	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable	Résidus de détection
ech Is+ en A	$4,517.10^{-4}$	$3,550.10^{-5}$	4
ech Is- en A	$-4,517.10^{-4}$	$-3,550.10^{-5}$	4
ech Pv+ en Pa	$4,359.10^4$	$2,500.10^3$	6
ech Pv- en Pa	$-4,359.10^4$	$-2,500.10^3$	6
Pv= α -.Pv	0,99	0,9993	6
Pv= α +.Pv	1,01	1,0007	6
Is= α -.Is	0,99	0,25	4
Is= α +.Is	1,01	4,15	4
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	1.10^{-6}	6
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-1.10^{-6}	6
Xm= α +.Xm	1,01	1,006	6
Xm= α -.Xm	0,99	0,994	6
ech Qv + en m ³ /s	$1,25.10^{-4}$	$1,50.10^{-5}$	3,15,21
ech Qv - en m ³ /s	$-1,25.10^{-4}$	$-1,50.10^{-5}$	3,15,21
Qv= α -.Qv	0,99	0,35	15,21
Qv= α +.Qv	1,01	2,15	15,21
ech Ps+ en Pa	$3,76.10^5$	$2,35.10^4$	2,8
ech Ps- en Pa	$-3,76.10^5$	$-2,35.10^4$	2,8
Ps= α -.Ps	0,99	0,9936	2,8
Ps= α +.Ps	1,01	1,0064	2

Tableau V.5 : Limites de détection par le saut réduit des défaillances capteurs par l'instrumentation complémentaire.

II.1.1.4 Conclusion

L'étude des limites de détection par le test du saut réduit a montré que le système de surveillance ne pourrait détecter efficacement par ce test hors ligne que les défaillances de deux paramètres seulement, Q_f et K_1 , qui représentent tous les deux un débit de fuite, au niveau de la servo-valve et du vérin respectivement, ainsi que les défaillances additives et multiplicatives des capteurs. Cependant, l'instrumentation complémentaire permet de diminuer les limites de détection de nombreux paramètres.

II.1.2 Limite de détection par le test de Page-Hinkley

II.1.2.1 Objectif

Le test de Page Hinkley est une méthode statistique développée pour la détection de variation de moyenne.

Il s'agit d'un test "en ligne" donc utilisable pour l'application industrielle souhaitée.

Il a été choisi parmi d'autres tests "en ligne" (le test de la variable centrée, du filtre dérivateur et du Chi2) en fonction des résultats obtenus pour les défaillances du cahier des charges dans une étude préliminaire.

Ne nécessitant pas la connaissance du résidu sur une bande complète ni de l'instant d'apparition de la défaillance ρ , le test de Page Hinkley nous permettra d'évaluer de façon précise les performances du système de surveillance du laminoir, tel qu'il pourrait être implanté sur site industriel.

II.1.2.2 Principe

Sur le simulateur complet (simulation du passage de la tôle entre les cylindres de travail, ajout de bruits sur Pa, Xm, Is), les entrées Fworb, Vit, Smon, Sagn sont prises identiques à celles mesurées sur le site pour la bande n°4 (durée de laminage totale 41,52 s). Les défaillances sont introduites sous la forme d'un échelon à T = 20 s et sont maintenues jusqu'à la fin de la bande.

Rappel

La règle d'arrêt de Page-Hinkley correspond à un saut de moyenne minimum choisi v_m à détecter dans deux directions possibles : saut de moyenne positif ou négatif. Les règles d'arrêt correspondantes sont les suivantes :

saut négatif :

$$\begin{cases} T_0 = 0 \\ T_n = \sum_{k=1}^n \left(r_k - \mu_0 + \frac{v_m}{2} \right) \\ M_n = \max_{0 \leq k \leq n} T_k \\ \text{Alarme si } M_n - T_n > \lambda \end{cases} \quad (11)$$

saut positif :

$$\begin{cases} U_0 = 0 \\ U_n = \sum_{k=1}^n \left(r_k - \mu_0 - \frac{v_m}{2} \right) \\ m_n = \min_{0 \leq k \leq n} U_k \\ \text{Alarme si } U_n - m_n > \lambda \end{cases} \quad (12)$$

A chaque instant et pour chaque résidu les valeurs de $M_n - T_n$ et $U_n - m_n$ sont comparées à leurs seuils respectifs. Il y a détection dès que l'une ou l'autre de ces valeurs dépasse son seuil. Il est à noter que le test n'est pas remis à zéro après une détection pour évaluer la continuité de la détection sur toute la durée d'influence de la défaillance.

Comme pour le saut réduit on fait varier l'amplitude de la défaillance jusqu'à obtenir une détection limite. Pour le test de Page Hinkley, on considère la limite de détection atteinte lorsque pour l'un des résidus au moins les valeurs $M_n - T_n$ ou $U_n - m_n$ dépassent leur seuil sur une durée continue de 3 secondes environ.

Réglages :

Choix des moyennes et écarts-types de référence

Pour les instrumentations initiale et complémentaire, le calcul des moyennes et écarts-types de référence s'est effectué sur les mille premiers points du résidu (soit 10 s), ce qui exige de les connaître avant de démarrer les tests. Pour notre étude, ces moyennes et écarts-types sont estimés sur l'essai nominal, ce qui nous permet de démarrer les tests dès le début du laminage.

Sur site industriel

Ces paramètres doivent être ajustés à chaque essai. Si aucune défaillance n'est détectée, la moyenne du résidu sur toute la durée du laminage est ajoutée à la moyenne du résidu pour les

autres bandes laminées sans défaut. La moyenne globale pour tous ces essais sert alors de référence pour la suivante. Il en va de même pour l'écart-type.

Une autre approche consiste à utiliser une fenêtre croissante pour calculer, en cours de laminage, la moyenne de référence. A chaque instant, si aucune défaillance n'est détectée, la valeur du résidu est ajoutée dans le calcul de la moyenne. Nous avons comparé sur quelques exemples les résultats obtenus par cette approche avec celle que nous avons utilisée. Les deux approches sont équivalentes, si la première méthode estime avec suffisamment de points la moyenne.

μ_0 = moyenne du résidu sur les 1000 premiers points (soit 10s).

σ_0 = écart type du résidu sur les 1000 premiers points (soit 10s).

Choix de l'amplitude minimum de défaillance à détecter

Cette amplitude, exprimée en fraction d'écart-type δ , est toujours fixée par l'utilisateur :

$$v_m = \delta \cdot \sigma_0$$

Plus cette amplitude est petite, plus les tests vont être sensibles aux variations, mêmes très faibles, des valeurs du résidu autour de sa moyenne μ_0 . Nous avons choisi de prendre cette amplitude très petite, égale à 10^{-4} fois l'écart-type du résidu testé. En fait, à ce niveau là, les tests sont sensibles aux variations naturelles de la moyenne du bruit sur les résidus. Les seuils de détection doivent alors borner ces variations et déterminer ainsi la limite entre les variations de la moyenne du bruit et l'influence d'une défaillance sur le résidu. Ces seuils ont été déterminés après application du test de Page-Hinkley sur l'essai nominal. Les tests pour les sauts positif et négatif sont tracés sur la page suivante, et les seuils choisis sont rapportés dans le tableau V.6.

Ces seuils dépendent de l'allure des tests pour l'essai nominal, donc de la valeur prise pour δ .

Résidu	R1 (A)	R2 (N)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (A)	R6 (A)
seuil λ saut positif	0,03	$4 \cdot 10^6$	0,1	0,1	0,1	0,1
seuil λ saut négatif	0,08	$8 \cdot 10^6$	0,03	0,04	0,06	0,02

Tableau V.6 : Seuils positifs et négatifs du test de Page-Hinkley pour l'essai nominal, avec $\delta = 10^{-4}$.

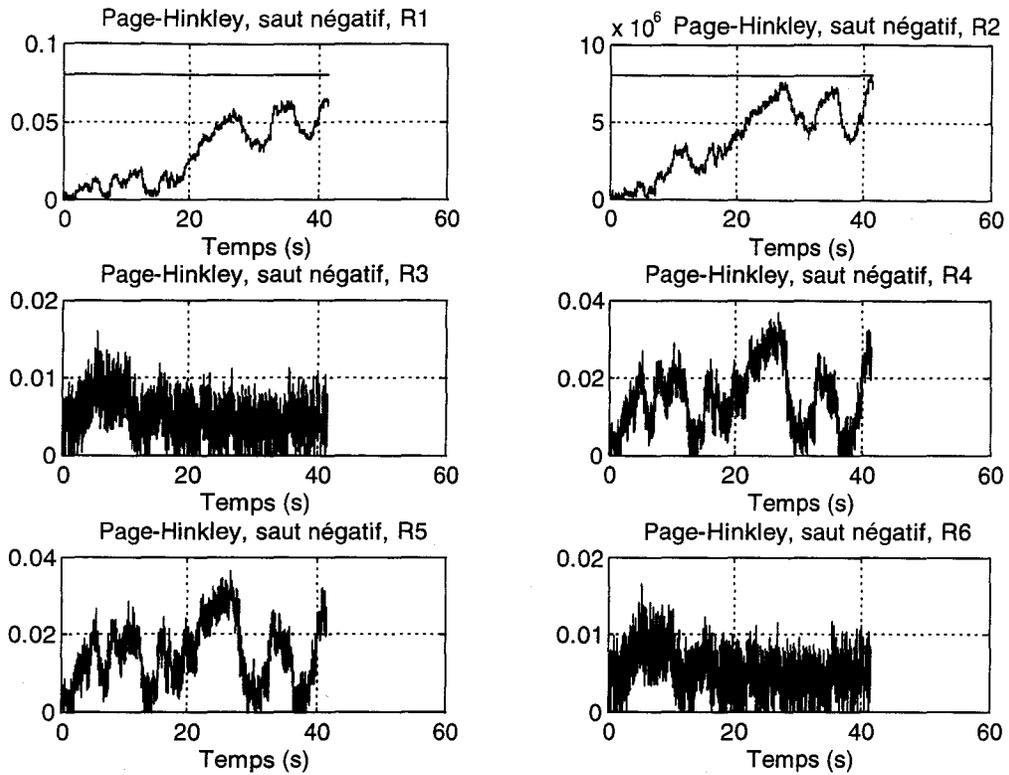


Figure V.4 : Allures des courbes Mn-Tn (saut négatif) avec seuils λ choisis a posteriori en fonction des résultats nominaux (instrumentation initiale) $\delta = 1.10^{-4}$.

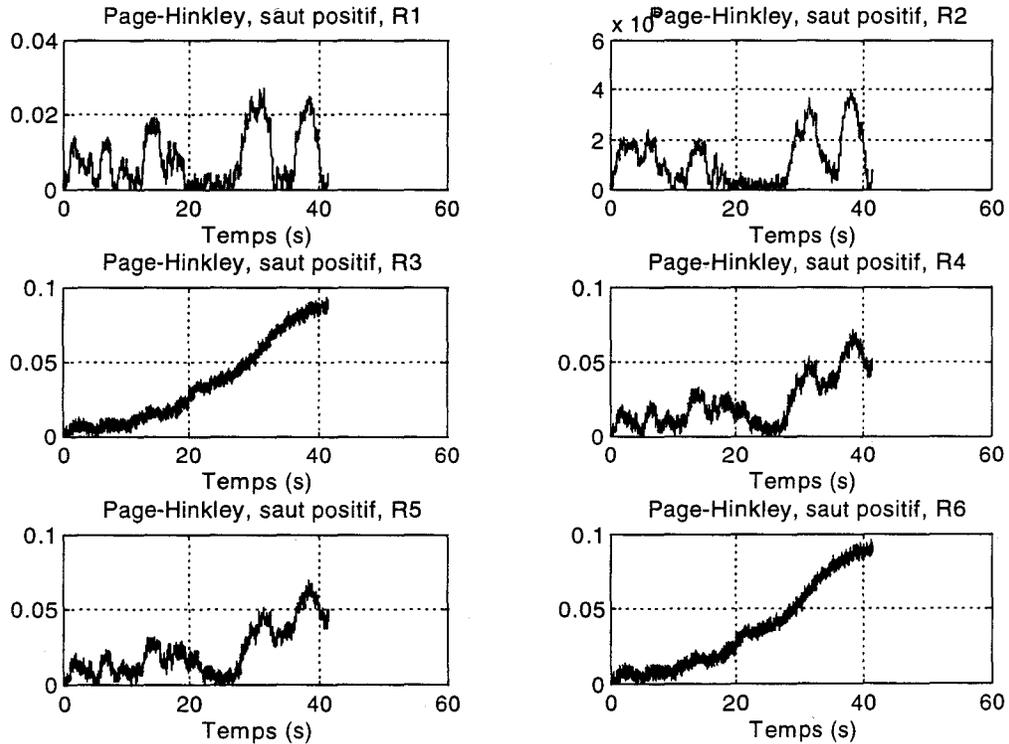


Figure V.5 : Allures des courbes Un-mn (saut positif) avec seuils λ choisis a posteriori en fonction des résultats nominaux (instrumentation initiale), avec $\delta = 1.10^{-4}$.

II.1.2.3 Résultats

Nous avons utilisé l'indicateur de comparaison défini par (16) dans les tableaux récapitulatifs ci-dessous, qui représente le respect ou non du cahier des charges.

• **Instrumentation initiale :**

Paramètres	Valeur nominale	Limite de détection pour Page Hinkley	Valeur de défaillance du cahier des charges	Variation par rapport à la valeur nominale pour la limite de détection	Résidu de détection	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges
Qf en m ³ /s	0	2,50.10 ⁻⁶	8,85.10 ⁻⁵		3,6	0,03
Kr en A/m	40	28	36,5	-30%	1	3,43
Kr en A/m	40	50	43,5	25%	1	2,86
R en s-1	32,21	impossible	25,23	impossible		impossible
R en s-1	32,21	impossible	38,99	impossible		impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	impossible	5,85.10 ⁵	impossible		impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	3,35.10 ⁸	6,10.10 ⁷	11067%	2	5,72
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	9,00.10 ⁸	1,17.10 ⁹	-42%	3,6	1,69
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	4,05.10 ⁹	2,075.10 ⁹	160%	3	4,83
μ _v en Pa/s	0	0,04	0,0057		2	7,02
Fcste en N	0	1,00.10 ⁵	2,2.10 ⁴		2	4,55
ξ	0,9	0,08	0,74	-91%	4,5	5,13
ξ	0,9	2	1,063	122%	3,6	6,75
ω ₀ en rad/s	410	150	330	-63%	3,6	3,25
ω ₀ en rad/s	410	impossible	600	impossible		impossible
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,24.10 ⁻³	3,44.10 ⁻³	-14%	4,5	1,59
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	9%	3,6	1,00
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	-8%	3,6	1,00
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,92.10 ⁻³	2,72.10 ⁻³	17%	4,5	1,91
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	1,00.10 ⁻¹²	2,2.10 ⁻¹¹		3,6	0,05

Tableau V.7 : Limites de détection par le test de Page-Hinkley pour l'instrumentation initiale.

On constate que l'instrumentation déjà existante permet la détection des variations de Qf, Qn_b, Qn_h, K₁ en respectant le cahier des charges initial.

Seuls les paramètres de frottement (f, μ_v, Fcste) sont détectés par le résidu R2. Cependant le système de surveillance utilisant uniquement l'instrumentation initiale reste insuffisant pour respecter la totalité du cahier des charges.

• Instrumentation complémentaire :

Paramètres	Valeur nominale	Limite de détection pour Page Hinkley	défaillance du cahier des charges	Variation par rapport à la valeur nominale pour la limite de détection	Résidus de détection	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges
Qf en m ³ /s	0	1,50.10 ⁻⁶	8,85.10 ⁻⁵		3,15,21	0,02
Kr en A/m	40	36,5	36,5	-8,75%	15,21	1,00
Kr en A/m	40	43,5	43,5	8,75%	3,15,21	1,00
R en s ⁻¹	32,21	29	25,23	-10%	3,15,21	0,46
R en s ⁻¹	32,21	38,99	38,99	21,05%	1,14,15,21,22	1,00
f en N _s /m	3.10 ⁶	impossible	5,85.10 ⁵	impossible		impossible
f en N _s /m	3.10 ⁶	6,00E.10 ⁷	6,10.10 ⁷	1900%	1,14,21,22	0,98
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,24.10 ⁹	1,17.10 ⁹	-21%	15,21	0,82
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,90.10 ⁹	2,075.10 ⁹	22%	14,22	0,66
μ _v en Pa/s	0	0,006	0,0057		1,14,15,21,22	1,05
Fcste en N	0	2,20.10 ⁴	2,2.10 ⁴		1,14,15,21,22	1,00
ξ	0,9	0,74	0,74	-17,78%	3,15,21	1,00
ξ	0,9	1,063	1,063	18,11%	1,14,15,21,22	1,00
ω ₀ en rad/s	410	330	330	-19,51%	1,14,15,21,22	1,00
ω ₀ en rad/s	410	492	600	20%	3	0,43
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,65.10 ⁻³	3,44.10 ⁻³	-3%	15,21	0,38
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,85.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	2%	3,15,21	0,21
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,42.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	-3%	3,15,21	0,38
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,61.10 ⁻³	2,72.10 ⁻³	4%	15,21	0,50
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	6,00.10 ⁻¹³	2,2.10 ⁻¹¹		5,7,20	0,03

Tableau V.8 : Limite de détection par le test de Page-Hinkley pour l'instrumentation complémentaire

Les défaillances du cahier des charges sont testées en première valeur, ce qui permet de constater si ces valeurs respectent le critère de limite de détection (détection continue de 3 s au minimum).

L'ajout de capteurs sur Ps et Qv permet de détecter, grâce aux nouveaux résidus générés, toutes les variations des paramètres à surveiller définies dans le cahier des charges, excepté pour la variation négative du coefficient de frottement visqueux f. Pour une variation positive de ce paramètre et des paramètres Fcste et μ_v, les limites de détection sont améliorées et ne dépendent plus du résidu R6 (R2 en instrumentation initiale), ni des deux autres résidus redondant sur la relation cage R8 et R9. Il est donc possible d'envisager de supprimer ces résidus (cf. paragraphe IV).

• Comparaison pour les deux instrumentations

Paramètres	Valeur nominale	Valeur du cahier des charges	instrumentation initiale			instrumentation complémentaire		
			Limite de détection pour Page Hinkley	Variation par rapport à la valeur nominale	comparaison	Limite de détection pour Page Hinkley	Variation par rapport à la valeur nominale	comparaison
Qf en m ³ /s	0	8,85.10⁻⁵	2,50.10 ⁻⁶		0,03	1,50.10 ⁻⁶		0,02
Kr en A/m	40	36,5	28	-30%	3,43	36,5	-8,75%	1,00
Kr en A/m	40	43,5	50	25%	2,86	43,5	8,75%	1,00
R en s-1	32,21	25,23	impossible	impossible	impossible	29	-10%	0,46
R en s-1	32,21	38,99	impossible	impossible	impossible	38,99	21,05%	1,00
f en N,s/m	3.10 ⁶	5,85.10⁵	impossible	impossible	impossible	impossible	impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	6,10.10⁷	3,35.10 ⁸	11067%	5,72	6,00E.10 ⁷	1900%	0,98
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,17.10⁹	9,00.10 ⁸	-42%	1,69	1,24.10 ⁹	-21%	0,82
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	2,075.10⁹	4,05.10 ⁹	160%	4,83	1,90.10 ⁹	22%	0,66
μv en Pa/s	0	0,0057	0,04		7,02	0,006		1,05
Fcste en N	0	2,2.10⁴	1,00.10 ⁵		4,55	2,20.10 ⁴		1,00
ξ	0,9	0,74	0,08	-91%	5,13	0,74	-17,78%	1,00
ξ	0,9	1,063	2	122%	6,75	1,063	18,11%	1,00
ω ₀ en rad/s	410	330	150	-63%	3,25	330	-19,51%	1,00
ω ₀ en rad/s	410	600	impossible	impossible	impossible	492	20%	0,43
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,44.10⁻³	3,24.10 ⁻³	-14%	1,59	3,65.10 ⁻³	-3%	0,38
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	4,12.10⁻³	4,12.10 ⁻³	9%	1,00	3,85.10 ⁻³	2%	0,21
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,29.10⁻³	2,29.10 ⁻³	-8%	1,00	2,42.10 ⁻³	-3%	0,38
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,72.10⁻³	2,92.10 ⁻³	17%	1,91	2,61.10 ⁻³	4%	0,50
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	2,2.10⁻¹¹	1,00.10 ⁻¹²		0,05	6,00.10 ⁻¹³		0,03

Tableau V.9 : Comparaison des limites de détection par le test de Page-Hinkley pour l'instrumentation initiale et complémentaire.

Les résultats du test de Page Hinkley sont très satisfaisants :

- avec l'instrumentation initiale, plusieurs défaillances sont détectables en dessous de 20% de variation par rapport à la valeur nominale et la variation positive de ξ qui était indétectable avec l'instrumentation initiale le devient grâce à l'instrumentation complémentaire.

- avec l'instrumentation complémentaire l'amélioration par rapport à l'instrumentation initiale est supérieure à celle déjà constatée lors de la comparaison des résultats en appliquant le test du saut réduit. Toutes les variations de paramètres (excepté pour f) sont détectables avant 22% de variation par rapport à leur valeur initiale et parmi celles-ci plus de la moitié le sont avant 10%.

Grâce à l'indicateur de comparaison (limite de détection/ cahier des charges), on s'aperçoit que l'instrumentation initiale permet de détecter nettement les défaillances de Q_f et K₁ avant que leur amplitude atteigne la valeur du cahier des charges. Pour l'instrumentation complémentaire, toutes les amplitudes de défaillances définies par le cahier des charges peuvent être détectées, à l'exception de f en variation négative.

• Défaillances capteurs

Type de défaillance capteur	Valeur de défaillance initialement proposée	Instrumentation initiale		Instrumentation complémentaire	
		Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley	Résidus de détection	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley	Résidus de détection
ech Is+ en A	$4,517.10^{-4}$	$1,35.10^{-5}$	4	$1,35.10^{-5}$	1,11,13,17,19,22
ech Is- en A	$-4,517.10^{-4}$	-1.10^{-5}	1	-1.10^{-5}	1,4,14,22
ech Pv+ en Pa	$4,359.10^4$	$2,500.10^3$	2	$6,7.10^2$	2
ech Pv- en Pa	$-4,359.10^4$	-1.10^3	2	-8.10^2	2
Pv= α -.Pv	0,99	0,99975	2	0,9998	2
Pv= α +.Pv	1,01	1,0007	2	1,0002	2
Is= α -.Is	0,99	0,75	4	0,75	13,17,19
Is= α +.Is	1,01	1,125	1	1,125	1,4,14,22
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	$3,5.10^{-7}$	2	$3,5.10^{-7}$	6
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-5.10^{-7}	2	-5.10^{-7}	6
Xm= α +.Xm	1,01	1,0000000008	2	1,0000000008	6
Xm= α -.Xm	0,99	0,9999999992	2	0,9999999992	6
ech Qv + en m ³ /s	$1,25.10^{-4}$			$1,25.10^{-5}$	21
ech Qv - en m ³ /s	$-1,25.10^{-4}$			$-1,10.10^{-5}$	3,21
Qv= α -.Qv	0,99			0,92	14,15,21,22
Qv= α +.Qv	1,01			1,05	3,15,21
ech Ps+ en Pa	$3,76.10^5$			7.10^2	2,
ech Ps- en Pa	$-3,76.10^5$			-7.10^2	2
Ps= α -.Ps	0,99			0,9998	2
Ps= α +.Ps	1,01			1,0002	2

Tableau V.10 : Limites de détection par le test de Page-Hinkley des défaillances capteurs pour l'instrumentation initiale et complémentaire.

Comme pour le test du saut réduit, toutes les défaillances capteurs sont détectées par le test de Page-Hinkley avant la défaillance initialement proposée. L'instrumentation complémentaire permet la détection des défaillances additives et multiplicatives des capteurs supplémentaires, et diminue la limite de détection des défaillances du capteur de pression vérin Pv.

II.1.2.4 Conclusion

Les résultats des tests de Page Hinkley ont montré que le système de surveillance conçu avec l'instrumentation initiale permet de détecter plusieurs défaillances, mais souvent d'amplitude supérieure aux défaillances définie par le cahier des charges. L'instrumentation complémentaire, par contre, permet de générer des résidus suffisamment sensibles aux variations des paramètres à surveiller pour détecter presque toutes les défaillances, et dans tous les cas de respecter le cahier des charges.

II.1.3 Comparaison

Le tableau suivant effectue une comparaison entre les limites de détection par les tests du saut réduit et de Page-Hinkley, pour l'instrumentation initiale et complémentaire, à partir de l'indicateur de comparaison au cahier des charges.

Paramètres à surveiller	Valeur nominale	Valeur du cahier des charges	Instrumentation initiale		Instrumentation complémentaire	
			comparaison pour le test du saut réduit	comparaison pour le test du page Hinkley	comparaison pour le test du saut réduit	comparaison pour le test du page Hinkley
Qf en m ³ /s	0	8,85.10 ⁻⁵	0,25	0,03	0,17	0,02
Kr en A/m	40	36,5	11,02	3,43	10,9	1,00
Kr en A/m	40	43,5	10,38	2,86	10,38	1,00
R en s-1	32,21	25,23	impossible	impossible	3,50	0,46
R en s-1	32,21	38,99	impossible	impossible	12,12	1,00
f en N,s/m	3.10 ⁶	5,85.10 ⁵	impossible	impossible	impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	6,10.10 ⁷	10,61	5,72	10,61	0,98
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,17.10 ⁹	3,92	1,69	3,88	0,82
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	2,075.10 ⁹	impossible	4,83	12,50	0,66
μv en Pa/s	0	0,0057	14,03	7,02	14,03	1,05
Fcste en N	0	2,2.10 ⁴	18,18	4,55	18,18	1,00
ξ	0,9	0,74	5,62	5,13	5,59	1,00
ξ	0,9	1,063	impossible	6,75	impossible	1,00
ω ₀ en rad/s	410	330	5,07	3,25	5,07	1,00
ω ₀ en rad/s	410	600	impossible	impossible	impossible	0,43
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,44.10 ⁻³	4,12	1,59	2,44	0,38
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	6,64	1,00	3,44	0,21
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	4,29	1,00	3,57	0,38
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,72.10 ⁻³	6,73	1,91	6,59	0,50
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	2,2.10 ⁻¹¹	0,27	0,05	0,27	0,03

Tableau V.11 : Comparaison des limites de détection pour le test du saut réduit et de Page-Hinkley

Le test de Page-Hinkley permet de détecter des défaillances d'amplitudes toujours inférieures à celles obtenues par le test du saut réduit, que ce soit pour l'instrumentation initiale ou bien complémentaire. Le test de Page-Hinkley avec l'instrumentation initiale reste par ailleurs plus performant que le test du saut réduit avec l'instrumentation complémentaire pour la majorité des paramètres. Pour les deux tests, cependant, l'instrumentation complémentaire diminue sensiblement les valeurs limites détectables.

II.1.4 Conclusion

Le test de saut réduit est effectué hors ligne. Bien qu'utilisant le meilleur indicateur de l'amplitude du saut, ce test ne permet pourtant pas de détecter toutes les défaillances du cahier des charges. Le test de Page-Hinkley est plus performant, détecte plus de défaillances, et est sensible à des défaillances d'amplitudes plus petites.

Aussi, le test de Page-Hinkley sera conservé pour l'étude des performances du système de surveillance par rapport au cahier des charges initial. L'étude des limites de détection nous a montré que l'instrumentation initiale sera insuffisante pour respecter le cahier des charges, et que l'instrumentation complémentaire permettra de s'en approcher.

II.2 Détection et localisation dans les conditions du cahier des charges

II.2.1 Objectif

L'objectif est de tester directement les performances du système de surveillance pour les défaillances du cahier des charges. Les résultats obtenus dans cette partie serviront de base à la réalisation éventuelle d'un système de surveillance complet implanté sur site industriel. En

fonction des résultats, nous essayerons de déterminer l'instrumentation optimale, les résidus qu'il faut utiliser, et les défaillances détectables et localisables.

II.2.2 Principe

Sur le simulateur complet (simulation du passage de la tôle entre les cylindres de travail, ajout de bruits sur Pa, Xm, Is), les entrées Fworb, Vit, Smon, Sagc sont prises identiques à celles mesurées sur le site industriel pour la bande n°4 (durée de laminage totale 41,52 s). Le paramètre défaillant passe de sa valeur initiale à sa valeur de défaillance définie par le cahier des charges sous la forme d'un échelon à T = 20 s et est maintenue jusqu'à la fin de la bande.

Le test de Page-Hinkley est appliqué avec les mêmes réglages que pour la partie précédente. On considère qu'une détection est effective si sa durée de détection continue est supérieure ou égale à 0,1 s. Comme pour la limite de détection, le test n'est pas remis à zéro après une détection pour étudier la persistance de la défaillance dans le temps.

II.2.3 Résultats

Nous rassemblons dans les tableaux comparatifs suivants les résultats obtenus par le test de Page-Hinkley pour les défaillances d'amplitude définies dans le cahier des charges.

Comparaison des signatures théoriques et pratiques

- **Instrumentation initiale :**

	K_r	Q_f	R	f	β	μ_v	F_c	Q_{nb}	Q_{nh}	ω_0	ξ	K_l	X	I_s	P_v
R1	x 0													1 1	
R2				0 0		1 0	1 0						1 1		1 1
R3	x 0	1 1	0 0		0 0			1 1+	1 1-	0 0	0 0	1 1	0 0		0 1
R4		1 1	0 0	0 0	0 0	1 0	1 0	1 1-	1 1+	0 0	0 0	1 1	0 0	1 1	
R5		1 1	0 0		0 0			1 1-	1 1+	0 0	0 0	1 1	0 0	1 1	0 0
R6	x 0	1 1	0 0	0 0	0 0	1 0	1 0	1 1+	1 1-	0 0	0 0	1 1	0 0		

Tableau V.12 : Comparaison des sensibilités statiques au point de fonctionnement en tenant compte de non-linéarités et expérimentales avec les valeurs du cahier des charges par le test de Page-Hinkley.

- Une case vide signifie qu'il n'y a aucun lien structurel entre le paramètre et le résidu.
- La colonne de gauche indique la sensibilité de la moyenne du résidu à la variation du paramètre déduite d'une étude préliminaire (chapitre 4, II.6).
- La colonne de droite indique la sensibilité pratique, par le test de Page-Hinkley.
- '1' signifie que la moyenne du résidu est sensible à la variation (positive et négative) de la valeur du paramètre, '0' sinon.
- '1-' (ou '1+') signifie que la moyenne du résidu est seulement sensible à une diminution (ou augmentation) de la valeur du paramètre.
- 'x' signifie que la sensibilité dépend du point de fonctionnement du système.

Sur la colonne de droite du tableau V.12, on s'aperçoit que les paramètres dont les défaillances sont détectables sont Q_f , K_l , Q_{nb} et Q_{nh} , ainsi que les défaillances capteurs. Ces résultats étaient attendus après l'étude de limite de détection. Pour les paramètres Q_{nb} et Q_{nh} , la détection n'est effective que pour deux des quatre résidus sensibles, ce qui montre qu'à la limite de détection tous les résidus ne détectent pas. Il est important de noter également que

les sensibilités que l'étude préliminaire a révélé être nulles sont toutes nulles comme prévues, à l'exception du résidu R3 pour le capteur sur Pv. Enfin, les défaillances de F_c et μ_v ne sont pas détectées, car leur valeur de défaillance obtenue par le cahier des charges est inférieure à leur limite de détection par ce test.

• **Instrumentation complémentaire**

Le tableau de résultats des détections des défaillances du cahier des charges par le test de Page-Hinkley est fourni en annexe 7.

L'instrumentation complémentaire permet la détection de toutes les défaillances capteurs ainsi que les défaillances liées aux paramètres, à l'exception de celle correspondant à une diminution de la valeur du frottement f , pour laquelle nous n'avons pas obtenu de limite de détection par ce test. Tous les résidus théoriquement sensibles aux défaillances ne détectent pas les défaillances, c'est notamment le cas pour les défaillances de F_c et μ_v , toujours en raison de leur valeur de défaillance inférieure à leur limite de détection par ce test.

Comparaison des détections continues et des écarts-réduits

Pour chaque résidu donnant de bonnes détections par Page Hinkley (détection continue supérieure ou égale à 0,1 s), on rapporte le taux de détection et la durée de détection continue (pour un maximum de 21,52 s), ainsi que l'écart réduit obtenu par l'étude des sensibilités pratiques des résidus aux défaillances (chapitre 4, paragraphe III, et annexe 7). On fait de même pour les fausses détections, l'ensemble des résultats étant regroupés dans les tableaux V.13 et V.14.

• **Instrumentation initiale** (tableau V.13) :

Il existe une seule fausse détection pour l'instrumentation initiale. Elle est due à un pic transitoire sur le résidu R2 pour le paramètre β en variation négative. Ce pic apparaît également pour une variation négative, mais les valeurs positives du résidu compensent les valeurs négatives et ne modifient pas la moyenne du résidu.

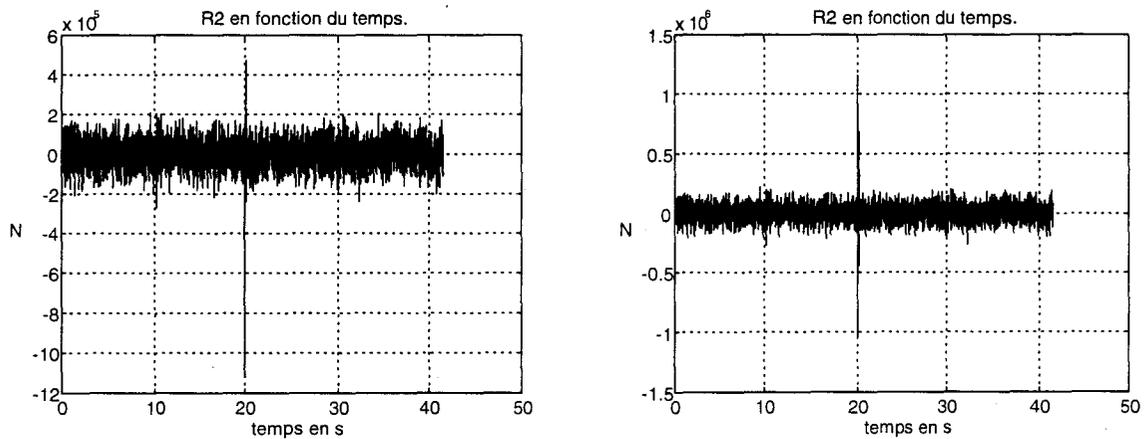


Figure V.6 : Allure de R2 pour des variations de β négative et positive.

A l'exception de la durée de β pour R6, les durées de détection continues sont suffisamment importantes pour détecter la défaillance.

• **Instrumentation complémentaire** (tableau V.14) :

On s'aperçoit que les résidus provoquant de fausses détections sont souvent les mêmes (1,3,14,15,22), et peuvent être aussi ceux qui détectent souvent. Les détections inattendues de β sont dues au pic apparaissant au moment de l'échelon de défaillance. Pour le paramètre K_1 ,

les fausses détections apparaissent 10 s après les bonnes détections, et sont d'amplitudes relativement peu importantes.

Les durées de détection continues sont généralement moins importantes pour les fausses détections que pour les bonnes. Les taux de détection sont souvent en rapport avec les durées de détection continue, ce qui fait qu'on obtient les mêmes conclusions entre les fausses et les bonnes détections.

Par rapport aux écarts-réduits, on s'aperçoit que plus les durées de détection sont longues, plus l'écart réduit est grand. En fait, si l'amplitude de la défaillance est grande, la sensibilité du résidu traduite en écart-réduit est importante, et le test détecte plus rapidement et plus longtemps la défaillance.



Instrumentation initiale			Test de Page-Hinkley				Saut réduit
	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Détection	Indice des résidus concernés	Taux de détection (%) min./ max.	détection continue (s) min./ max.	écart-réduit min./ max.
Qf	0	8,85.10 ⁻⁵ m ³ /s	Bonnes	3,4,5,6	89,6 à 92,8	19,27 à 19,91	10,35 à 10,84
			Fausse				
Kr-	40	36,5 A/m	Bonnes				
			Fausse				
Kr+	40	43,5 A/m	Bonnes				
			Fausse				
R-	32,21	25,23 s-1	Bonnes				
			Fausse				
R+	32,21	38,99 s-1	Bonnes				
			Fausse				
f-	3,00E+06	5,85e5 N.s/m	Bonnes				
			Fausse				
f+	3,00E+06	6,1e7 N.s/m	Bonnes				
			Fausse				
β-	1,56E+09	1,170e9 Pa/s	Bonnes	6	3,6	0,10	0,14
			Fausse	2	99,9	21,49	0,24
β+	1,56E+09	2,075e9 Pa/s	Bonnes				
			Fausse				
μ_v+	0	0,0057 Pa/s	Bonnes				
			Fausse				
Feste+	0	2,20e4 N	Bonnes				
			Fausse				
ξ-	0,9	0,74 (SU)	Bonnes				
			Fausse				
ξ+	0,9	1,063 (SU)	Bonnes				
			Fausse				
ω_θ-	410	330 rad/s	Bonnes				
			Fausse				
ω_θ+	410	600 rad/s	Bonnes				
			Fausse				
Qnb-	3,78E-03	3,44e-3 m ³ /s	Bonnes	4,5	11,6	0,84	0,56 à 0,59
			Fausse				
Qnb+	3,78E-03	4,12e-3 m ³ /s	Bonnes	3,6	35,6 à 37,1	6,84 à 7,51	0,52 à 0,53
			Fausse				
Qnh-	2,50E-03	2,29e-3 m ³ /s	Bonnes	3,6	33,1 à 35,2	6,83	0,52 à 0,53
			Fausse				
Qnh+	2,50E-03	2,72e-3 m ³ /s	Bonnes	4,5	8,8 à 9,4	0,59	0,49 à 0,52
			Fausse				
K1+	0	2,2e-11 m ³ /Pa.s	Bonnes	3,4,5,6	88,5 à 92,1	19,01 à 19,81	9,51 à 10,17
			Fausse				

Tableau V.13 : Comparaison du test de Page Hinkley et des sensibilités pratiques pour l'instrumentation initiale.

- Nom du paramètre
- Valeur nominale du paramètre
- Valeur de défaillance définie par le cahier des charges.
- Type de détection :
 - Bonnes : détection par le test de Page-Hinkley qui correspond à la signature structurale.
 - Fausse : détection par le test de Page-Hinkley qui ne correspond pas à la signature structurale.
- Indices des résidus qui détectent par le test de Page-Hinkley.
- Taux de détection (nb de points qui sont supérieurs au seuil/nb de points total après la défaillance), minimum et maximum pour l'ensemble des résidus qui détectent, en %.
- Durée de détection continue minimale et maximale pour l'ensemble des résidus qui détectent, en seconde.
- Valeur du saut réduit calculée sur la moyenne des résidus avant et après la défaillance, minimum, et maximum pour l'ensemble des résidus qui détectent.

Instrumentation complémentaire			Test de Page-Hinkley				Saut réduit
	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Détection	Indice des résidus concernés	Taux de détection (%) min./ max.	détection continue (s) min./ max.	écart-réduit min./ max.
Qf	0	8,85.10 ⁻⁵ m ³ /s	Bonnes	1,3,11,12,13,14,15,16,17,18,19,21,22,23	92,8 à 96,6	19,91 à 20,78	9,83 à 16,99
			Fausse				
Kr-	40	36,5 A/m	Bonnes	3,4,15,21	2,5 à 31	0,20 à 5,06	0,27 à 0,32
			Fausse	1,13,14,19,22	2,4 à 16,7	0,15 à 1,25	0,09 à 0,17
Kr+	40	43,5 A/m	Bonnes	3,4,15,21	17,4 à 60,5	1,35 à 12,46	0,29 à 0,34
			Fausse	1,14,22	1,2 à 1,9	0,17 à 0,19	0,17 à 0,18
R-	32,21	25,23 s-1	Bonnes	14,15,21,22	26,3 à 68,0	2,82 à 13,39	0,41 à 0,46
			Fausse	1,3	30,2 à 62,1	3,27 à 13,05	0,43 à 0,48
R+	32,21	38,99 s-1	Bonnes	14,15,21,22	16,6 à 32,2	2,40 à 3,76	0,29 à 0,32
			Fausse	1,3	7,5 à 32,3	0,17 à 3,50	0,29 à 0,33
f-	3,00E+06	5,85e5 N.s/m	Bonnes				
			Fausse				
f+	3,00E+06	6,1e7 N.s/m	Bonnes	21,22	15,2 à 29,4	2,07 à 3,62	0,27 à 0,30
			Fausse	1,3,14,15	5,9 à 30,5	0,11 à 2,86	0,25 à 0,30
β-	1,56E+09	1,170e9 Pa/s	Bonnes	1,10,12,13,15,16,18,19,21,23	5,4 à 99,9	0,20 à 21,49	0,03 à 0,20
			Fausse	2,6	99,9 à 100	21,49 à 21,51	0,24 à 2,27
β+	1,56E+09	2,075e9 Pa/s	Bonnes	1,14,15,21,22	19,9 à 73,8	3,51 à 9,25	0,43 à 0,70
			Fausse				
μ _v +	0	0,0057 Pa/s	Bonnes	21,22	19,6 à 26,0	3,18 à 3,59	0,26 à 0,29
			Fausse	1,3,14,15	9,6 à 27,3	0,33 à 2,82	0,24 à 0,29
Fcste+	0	2,20e4 N	Bonnes	21,22	21,3 à 28,3	3,20 à 3,63	0,27 à 0,31
			Fausse	1,3,14,15	10,5 à 29,5	1,01 à 3,56	0,25 à 0,30
ξ-	0,9	0,74 (SU)	Bonnes	1,3,14,15,21,22	7,0 à 59,7	0,85 à 12,46	0,30 à 0,40
			Fausse				
ξ+	0,9	1,063 (SU)	Bonnes	1,3,12,13,14,15,19,21,22	1,5 à 30,1	0,10 à 2,86	0,08 à 0,31
			Fausse				
ω ₀ -	410	330 rad/s	Bonnes	1,12,13,14,15,18,19,21,22,23	2,5 à 30,7	0,14 à 2,86	0,07 à 0,31
			Fausse				
ω ₀ +	410	600 rad/s	Bonnes	1,3,14,15,18,19,21,22,23	10,6 à 62,8	0,87 à 12,43	0,10 à 0,47
			Fausse	8	5,2	0,45	0,04
Qnb-	3,78E-03	3,44e-3 m ³ /s	Bonnes	1,3,11,13,14,15,17,19,21,22	15,9 à 73,6	0,94 à 14,27	0,52 à 1,05
			Fausse				
Qnb+	3,78E-03	4,12e-3 m ³ /s	Bonnes	1,3,11,12,13,14,15,16,17,18,19,21,22,23	40,8 à 76,2	5,23 à 16,04	0,47 à 0,97
			Fausse				
Qnh-	2,50E-03	2,29e-3 m ³ /s	Bonnes	1,3,11,12,13,14,15,16,17,18,19,21,22,23	24,6 à 65,3	3,39 à 13,39	0,51 à 0,66
			Fausse				
Qnh+	2,50E-03	2,72e-3 m ³ /s	Bonnes	1,3,11,13,14,15,17,19,21,22	13,1 à 51,3	0,85 à 9,05	0,46 à 0,62
			Fausse				
K1+	0	2,2e-11 m ³ /Pa.s	Bonnes	5,7,9,10,11,12,13,16,17,18,19,20,23	89,6 à 99,0	18,84 à 21,18	2,14 à 10,17
			Fausse	3,14,15,21,22	0,7 à 8,3	0,12 à 1,71	0,05 à 0,09

Tableau V.14 : Comparaison du test de Page Hinkley et des sensibilités pratiques pour l'instrumentation complémentaire.

II.3 Détection de saut de variance pour les défaillances du cahier des charges

II.3.1 Test de Fischer

Sur le simulateur complet (simulation du passage de la tôle entre les cylindres de travail, ajout de bruits sur Pa, Xm, Is), les entrées Fworb, Vit, Smon, Sgc sont prises identiques à celles mesurées sur le site industriel pour la bande n°4 (durée de laminage totale 41,52 s). Pour les valeurs du cahier des charges, les défaillances sont introduites sous la forme d'un échelon à T = 20 s et sont maintenues jusqu'à la fin de la bande.

Rappel :

Soit s_i l'estimation de l'écart-type du résidu sur une fenêtre glissante de N points $t = n - N + 1$ à n , et σ_0 l'estimation de l'écart-type du résidu sur toute la fenêtre d'observation $t = 0$ à n , alors

$$F = \frac{s_i}{\sigma_0} \quad (17)$$

suit une loi de Fischer à (N-1, n-1) degrés de liberté. Il est possible de déduire dans les tables les valeurs de cette distribution pour un taux de fausse alarme fixé.

Dans la mise en oeuvre du test, deux paramètres sont à fixer : la taille de la fenêtre glissante N, et le seuil de détection.

En choisissant une fenêtre d'estimation de 401 points, soit 4,01 s, et un taux de fausses alarmes de 0,1 %, on ne constate aucune détection, sauf pour une variation négative de f, par le résidu R2, et pour une variation positive et négative de β , en raison d'un transitoire très rapide sur ce même résidu à l'instant d'apparition de la défaillance.

f - :

R2

Signature théorique	1
Taux de détection (%)	92,19
Instant de première détection en s	21,69
Durée totale de détection en s	19,84
Maximum des durées de détection continue en s	19,83

β^- - et β^+ (en raison du transitoire sur R2)

R2 pour β^-

R2 pour β^+

	R2 pour β^-	R2 pour β^+
Signature théorique	-	-
Taux de détection (%)	18,82	19,14
Instant de première détection en s	20,01	20,01
Durée totale de détection en s	4,05	4,12
Maximum des durées de détection continue en s	4,05	4,12

La détection de l'augmentation d'écart-type de R2 pour une variation de f est pratiquement réalisée sur toute la durée d'existence de la défaillance, à partir de l'instant 21,69 s, et sur 92 % du temps de présence de la défaillance. Par contre, la détection du pic de R2, dû à la variation de β , ne se fait que sur 19 % du temps de présence de la défaillance, correspondant à

la durée d'estimation de l'écart-type du résidu, biaisé par l'apparition du transitoire quasi-instantané.

Afin d'augmenter la sensibilité du test aux variations d'écart-type des résidus, il est possible de diminuer le seuil de détection en augmentant le taux de fausses alarmes à 1 %. Ceci introduit de nombreuses détections, mais d'une durée de détection continue trop courte ($< 0,1$ s) pour être prises en compte. En plus des détections précédentes, les détections significatives (0,52 s et 0,42 s) sont celles du test sur le résidu R3 pour une variation positive des paramètres Q_f et K_1 , représentatifs d'une fuite au niveau de la tuyauterie et du vérin respectivement.

L'augmentation de la taille de la fenêtre à 701 points, ne permet pas d'augmenter le nombre de détections, mais augmente leur durée. Pour le paramètre β , la détection du pic sur R2 est désormais de 7,03 s.

f - :

	R2
Signature théorique	1
Taux de détection (%)	92,33
Instant de première détection en s	21,66
Durée totale de détection en s	19,87
Maximum des durées de détection continue en s	19,86

Pour β^- et β^+ (en raison du transitoire sur R2)

	R2 pour β^-	R2 pour β^+
Signature théorique	-	-
Taux de détection (%)	32,71	33,08
Instant de première détection en s	20,01	20,01
Durée totale de détection en s	7,04	7,12
Maximum des durées de détection continue en s	7,04	7,12

Le test effectué avec $N = 401$ points et un taux de fausse alarme de 5 %, permet de détecter toutes les pannes. Cependant, les résultats montrent que la détection est toujours la même pour les résidus 3 à 6 à quelques exceptions près. En fait, certains résidus ne sont pas structurellement influencés en écart-type par la défaillance. Les détections correspondantes sont alors des fausses détections.

En conclusion, pour éviter un taux de fausse détection important, il est nécessaire de choisir un taux de fausse alarme inférieur à 1 % pour le test de Fischer.

II.3.2 Test de Brandt

La fenêtre d'estimation des écarts-types est prise à 501 points (soit 5,01 s). Les seuils sont identiques pour tous les résidus, puisque le test est rapporté à son écart-type sur toute la fenêtre d'estimation. Le test est appliqué sur tous les résidus obtenus après simulation de toutes les défaillances du cahier des charges. On constate qu'on détecte autant de défaillances que pour le test de Fischer avec un taux de fausse détection de 1%. Pour le test de Brandt, on détecte donc les défaillances de Q_f et K_1 pour tous les résidus attendus (de R3 à R6), le transitoire de R2 pour une défaillance de β ainsi que l'augmentation de variance de R2 pour une diminution de la valeur de f . Pour toutes ces défaillances, la durée de détection continue est plus importante que pour le test de Fischer. En comparaison des performances, le test de Brandt est donc meilleur.

Nous conserverons donc les résultats du test de Brandt pour la surveillance du serrage hydraulique.

Le comportement du test de Brandt en nominal et pour une défaillance liée au paramètre de débit de fuite de la servo-valve Q_f , pour l'instrumentation initiale, est illustré ci-dessous :

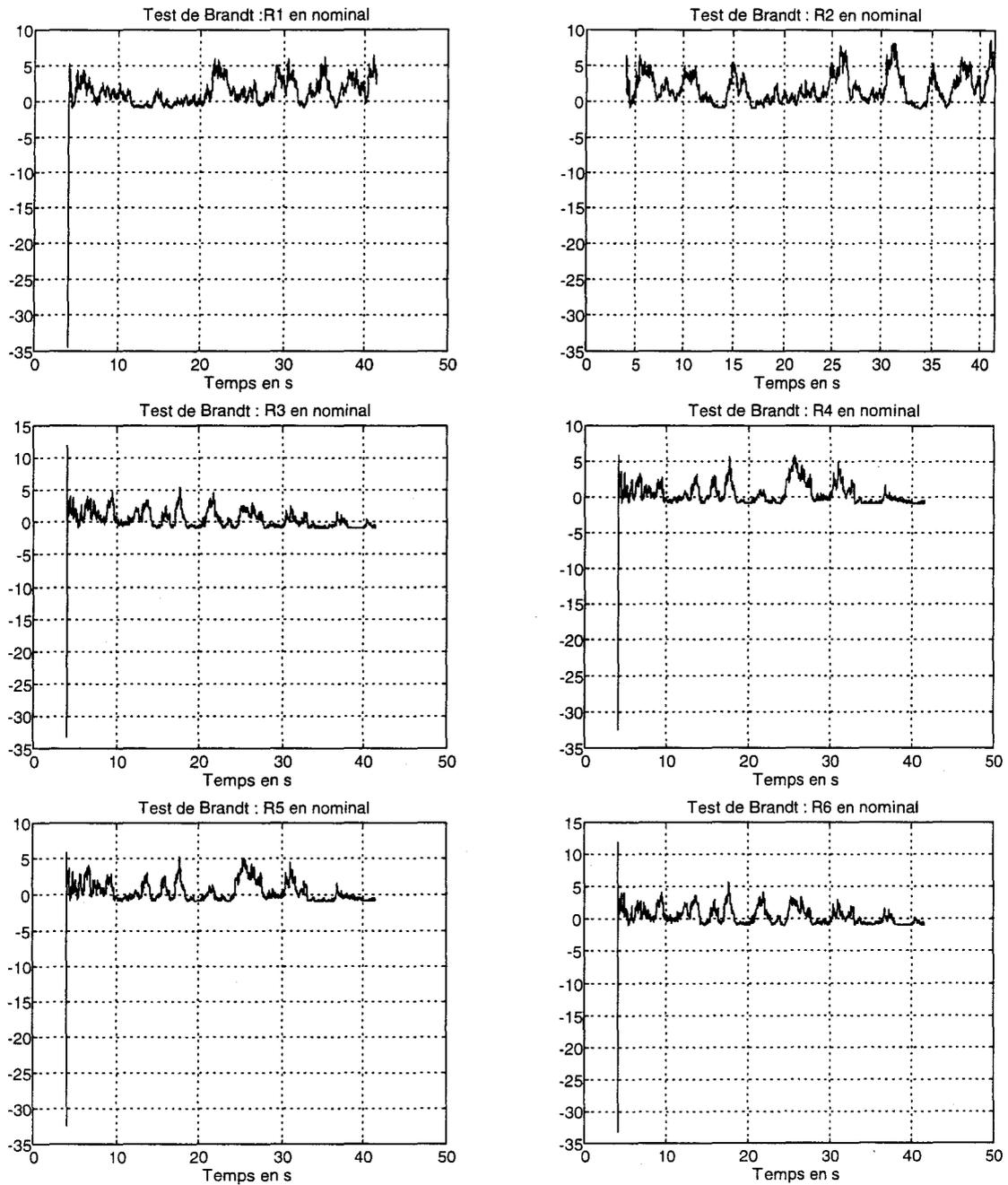


Figure V.7 : Allures des tests de Brandt pour chacun des 6 résidus de l'instrumentation initiale pour l'essai nominal.

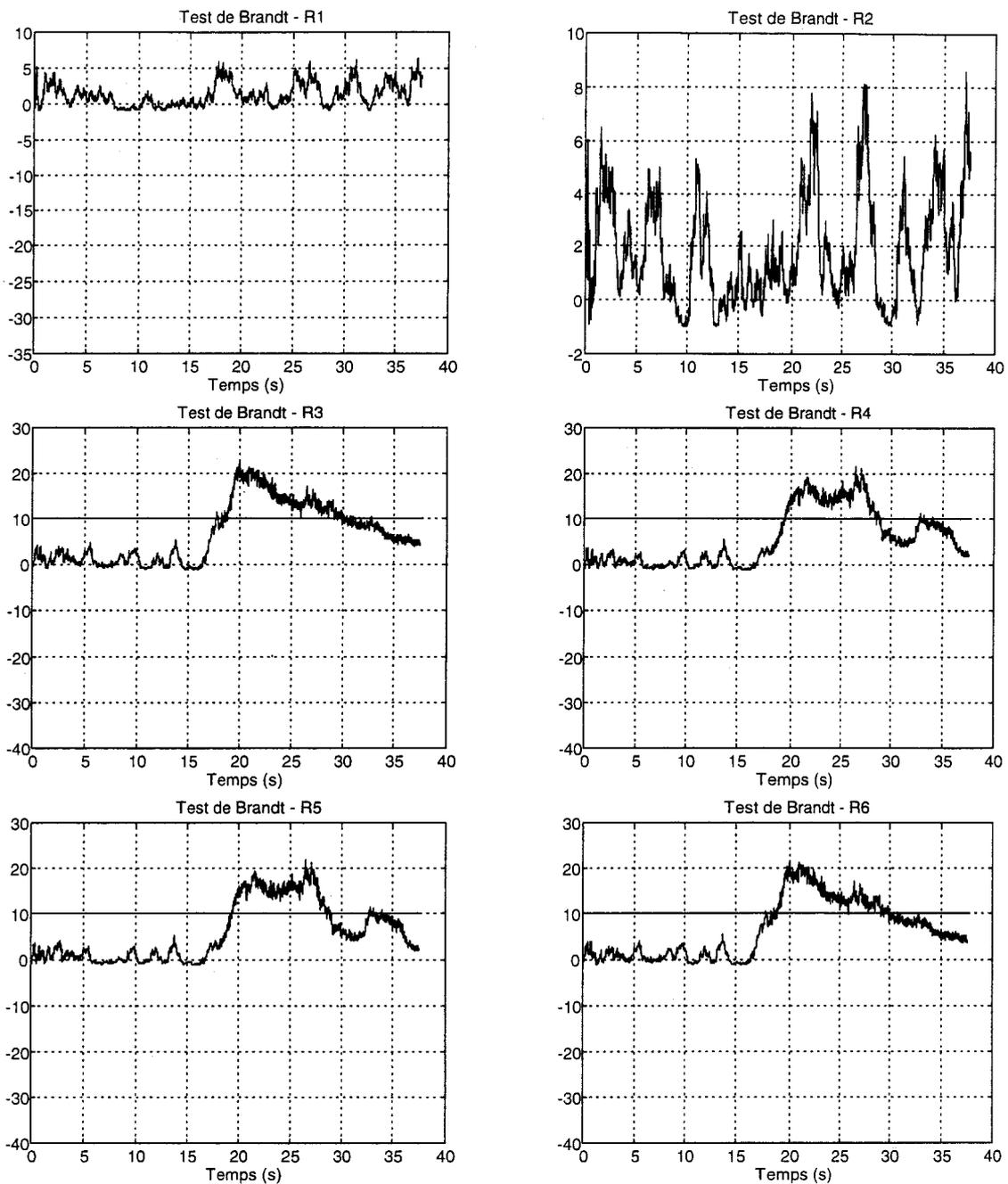


Figure V.8 : Allures des tests de Brandt pour chacun des 6 résidus de l'instrumentation initiale pour une défaillance du paramètre Q_f (de 0 à $8,85 \text{ m}^3/\text{s}$).

Instrumentation complémentaire :

Le test de Brandt appliqué aux 23 résidus de l'instrumentation complémentaire pour toutes les défaillances du cahier des charges permet de constater beaucoup de fausses détections, notamment sur les résidus 1,3,14,15,21 et 22 (cf. annexe 10a). De manière générale, tous les résidus faisant intervenir la mesure de Q_v provoquent des fausses détections, parfois importantes (le test détecte jusqu'à 3 s en continu). On se trouve ici confronté à un problème lié à la simulation, les mesures des deux capteurs supplémentaires de l'instrumentation complémentaire peuvent ne pas être convenablement bruités par la simulation. Le calcul dans les résidus d'une estimation des dérivées successives des signaux P_s et Q_v , en utilisant les entrées industrielles et les sorties simulées de P_s et Q_v (simulation avec bruits) est

particulièrement bruité. Aussi, la dynamique de ces signaux n'est pas complètement restituée par les estimations, et les résidus utilisant ces deux mesures supplémentaires conservent l'aspect de la dynamique des signaux mesurés. Le test appliqué à ces résidus détecte alors un changement de variance, dû en fait à un changement de dynamique de la mesure.

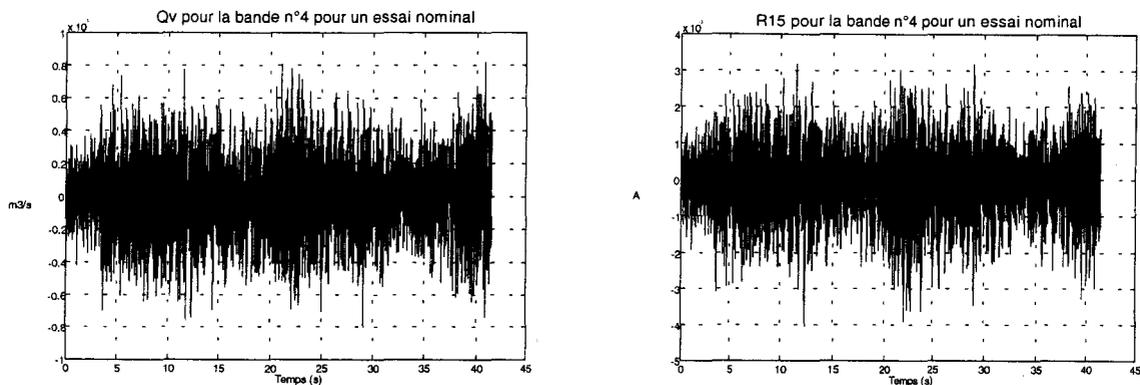


Figure V.9 : Comparaison des allures pour l'essai nominal du débit d'entrée du vérin et d'un résidu de l'instrumentation complémentaire (R15).

Nous choisissons donc de ne pas conserver ces résidus ainsi influencés. Sans ces résidus, il reste des fausses détections qui apparaissent toujours sur les mêmes résidus (R5, R7, R20) (cf. annexe 10b). En faisant abstraction de ces derniers, il reste alors un ensemble de 10 résidus, les 6 résidus de l'instrumentation initiale, et les résidus R12, R13, R18 et R19. Ces quatre derniers résidus ne sont utiles que pour la détection des défaillances des paramètres K_1 et Q_f (cf. annexe 10c). Ces paramètres étant déjà bien détectés par l'instrumentation initiale, il n'est donc à priori pas indispensable de les conserver.

II.4 Conclusion

L'étude des limites de détection a montré que le test du saut réduit, bien qu'étant le meilleur estimateur de la moyenne après apparition de la défaillance n'est pas aussi performant que le test de Page-Hinkley, qui est cumulatif. Ce dernier test permet d'améliorer pour chaque paramètre et pour chaque capteur la limite de détection obtenue par le test du saut réduit. Ces limites de détection comparées aux valeurs de défaillance définies par le cahier des charges fournissent une bonne indication des objectifs qu'il est possible d'atteindre par chaque test. La simulation des défaillances du cahier des charges a confirmé les résultats obtenus par les limites de détection. De plus, nous retrouvons également des signatures théoriques déduites de l'étude des sensibilités (chapitre 4) relativement proches des signatures expérimentales, que ce soit pour l'instrumentation initiale ou pour l'instrumentation complémentaire.

Le test de Brandt appliqué aux résidus pour les défaillances définies par le cahier des charges permet la détection de quelques défaillances, notamment la diminution de la valeur du frottement f , qui n'était pas détectée par les tests de saut de moyenne. Pour l'instrumentation complémentaire, il convient d'éliminer des résidus qui provoqueraient des fausses alarmes en raison du manque d'information pour le calage des mesures supplémentaires P_s et Q_v .

III Localisation

A partir des résultats que nous avons obtenus pour la détection des défaillances, influençant soit la moyenne, soit l'écart-type des résidus, nous comparons chacun des vecteurs de cohérence obtenus après simulation de la défaillance avec les signatures de la défaillance, structurelle (chapitre 2) ou théorique en tenant compte des non-linéarités (chapitre 4). Ceci nous permettra de dégager l'ensemble des défaillances détectables, puis, pour celles qui le sont, l'ensemble des défaillances localisables par leur signature. Nous présenterons conjointement les résultats pour les deux schémas d'instrumentation retenus.

Pour l'instrumentation initiale, il y a 15 types de défaillances possibles dont 3 capteurs (X, Is, Pv), pour l'instrumentation complémentaire, on ajoute deux capteurs à surveiller, soit 17 types de défaillances possibles dont 5 capteurs (X, Is, Pv, Qv, Ps)

III.1 Détection et localisation des sauts de moyennes

A partir des essais réalisés pour la détection des défaillances du cahier des charges par la méthode de Page-Hinkley, on peut dresser un tableau récapitulatif du nombre de défaillances dont l'influence sur la moyenne des résidus est **détectable** :

Définitions :

Signature structurelle : signature binaire déduite de l'analyse structurelle.

Signature théorique : signature binaire obtenue après l'étude des sensibilités statiques en tenant compte des non-linéarités.

Signature pratique : signature binaire obtenue par le test de Page-Hinkley après simulation de la défaillance.

Défaillances théoriquement détectables : défaillances dont la signature binaire déduite des sensibilités statiques et non-linéaires comporte au moins un '1'.

Défaillances pratiquement détectables : défaillances dont la simulation fournit une signature comportant au moins un '1'.

Défaillances non-détectables : défaillances dont la simulation fournit une signature ne comportant aucun '1'.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Théoriquement détectables	9	60 %	12	71 %
Pratiquement détectables	7	47 %	16	94 %
Non détectables	8	53 %	1	6 %

Tableau V.15 : Détection par le test de Page Hinkley pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, Instrumentation initiale et complémentaire.

De même, pour le test de Page-Hinkley, on peut dresser un tableau du nombre de défaillances **localisables** au sens des définitions suivantes :

Définitions :

Défaillances structurellement localisables : défaillances dont la signature binaire du vecteur de cohérence correspond complètement à la signature structurelle de la défaillance.

Défaillances théoriquement localisables : défaillances dont la signature binaire du vecteur de cohérence correspond complètement à la signature statique au point de fonctionnement et non-linéaires

Défaillances non- localisables : défaillances dont la signature pratique, après simulation de la défaillance, ne correspond à aucune signature.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Structurellement localisables	3	20 %	4	24 %
Théoriquement localisables	4	27 %	6	35 %
Non localisables	11	73 %	11	65 %

Tableau V.16 : Localisation par le test de Page Hinkley pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, Instrumentation initiale et complémentaire.

Dans les deux cas d'instrumentation, la signature déduite des sensibilités de Pv est retrouvée complètement, mais un résidu dont la sensibilité statique est théoriquement nulle détecte la défaillance.

Evolution des groupes de signatures pour la localisation :

Les signatures structurelles pour l'instrumentation initiale font ressortir 6 signatures distinctes :

- 1- Qf, R, β , Qn_b, Qn_n, ω_0 , ξ , K₁ : [0 0 1 1 1 1]
- 2- Pv : [0 1 1 0 1 0]
- 3- Is : [1 0 0 1 1 0]
- 4- f, μ_v , Fc : [0 1 0 1 0 1]
- 5- X : [0 1 1 1 1 1]
- 6- Kr : [1 0 1 0 0 1]

La signature du groupe 1 est incluse dans celle du groupe 5.

Les signatures statiques au point de fonctionnement non-linéaires ne font apparaître plus que 5 groupes distincts :

- 1- K₁, Qn_b, Qn_n, Q_f : [0 0 1 1 1 1]
- 2- Pv, X : [0 1 0 0 0 0]
- 3- Is : [1 0 0 1 1 0]
- 4- μ_v , Fc : [0 1 0 1 0 1]
- 5- R, β , ω_0 , ξ , K_r, f : [0 0 0 0 0 0]

Le capteur Is a conservé sa signature structurelle, de même que tous les paramètres liés aux débits (K₁, Qn_b, Qn_n, Q_f groupe 1) et les paramètres μ_v et Fc. Les signatures de Pv et X deviennent identiques. Il n'y a plus aucune inclusion, mais les paramètres du groupe 5 sont les paramètres dont la défaillance n'influence plus les résidus.

Les signatures pratiques font apparaître 7 groupes distincts :

1- K_r, Q_r :	[0 0 1 1 1 1]
2- X :	[0 1 0 0 0 0]
3- Is :	[1 0 0 1 1 0]
4- R, $\beta, \omega_0, \xi, K_r, f, \mu_v, F_c$:	[0 0 0 0 0 0]
5- Pv :	[0 1 1 0 0 0]
6- Q_{n_b-}, Q_{n_h+} :	[0 0 0 1 1 0]
7- Q_{n_b+}, Q_{n_h-} :	[0 0 1 0 0 1]

Deux groupes de signatures sont définis pour les paramètres Q_{n_b} et Q_{n_h} , qui n'ont pas la même signature suivant que leur variation est positive ou négative. La signature de Pv a évolué, et forme le groupe 5, ainsi la signature de X est désormais incluse dans sa signature. La signature du groupe 6 est incluse dans celles du groupe 1 et 3 ; la signature du groupe 7 est quant à elle incluse dans celle du groupe 1 uniquement.

Remarque : ces tableaux sont obtenus à partir de l'ensemble des valeurs de défaillances du cahier des charges. Pour des amplitudes de défaillances plus importantes, certaines ruptures deviennent localisables. Pour des niveaux de défaillances correspondant à des variations de 20 % par rapport à la valeur nominale, (cf. annexe 8), le taux de défaillances théoriquement localisables est proche de 70 % pour l'instrumentation complémentaire :

	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Théoriquement détectables	9	60 %	12	71 %
Pratiquement détectables	10	67 %	16	94 %
Non détectables	5	33 %	1	6 %

Tableau V.17 : Détection par le test de Page Hinkley pour des défaillances correspondant à une variation de 20 % du paramètre par rapport à sa valeur nominale, instrumentation initiale et complémentaire.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Structurellement localisables	7	47 %	8	47 %
Théoriquement localisables	9	60 %	12	71 %
Non localisables	6	40 %	5	29 %

Tableau V.18 : Localisation par le test de Page-Hinkley pour des défaillances correspondant à une variation de 20 % du paramètre par rapport à sa valeur nominale, instrumentation initiale et complémentaire.

Globalement, deux fois plus de défaillances sont localisées avec ce nouvel ensemble de valeurs de défaillances : on passe de 27 % à 60 % de défaillances localisables pour l'instrumentation initiale et de 35 à 71 % pour l'instrumentation complémentaire.

III.2 Détection et localisation des sauts de moyennes et variances

Le test de Brandt permet de détecter complémentairement au test de Page-Hinkley, uniquement une variation négative du paramètre f . Il est intéressant de constater que, grâce aux deux tests de détection de saut de moyenne et de saut d'écart-type, le système de

surveillance ainsi conçu avec l'instrumentation complémentaire est capable de détecter 100 % des défaillances du cahier des charges.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Pratiquement détectables	8	53 %	17	100 %
Non détectables	7	47 %	0	0 %

Tableau V.19 : Détection par le test de Page Hinkley et le test de Brandt pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, Instrumentation initiale et complémentaire.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Structurellement localisables	3	20 %	4	24 %
Théoriquement localisables	4	27 %	6	35 %
Non localisables	11	73 %	11	65 %

Tableau V.20 : Localisation par le test de Page Hinkley et le test de Brandt pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, Instrumentation initiale et complémentaire.

Cependant, les résultats complémentaires obtenus par le test de Brandt ne permettent pas de localiser plus de défaillances par rapport au test de Page-Hinkley.

IV Robustesse du système de surveillance

IV.1 Performances du système de surveillance en présence des paramètres incertains

Nous avons vu au chapitre 2 que les paramètres de la relation cage sont connus avec une imprécision importante. De plus, dans le chapitre 3, nous avons montré que le résidu utilisant directement cette relation cage est plus sensible à un changement de valeur de ces paramètres qu'à une défaillance du cahier des charges. Aussi, dans cette partie, nous souhaitons revenir sur les résultats obtenus et étudier la robustesse des résidus aux paramètres incertains. Pour établir une comparaison, nous avons estimé que la valeur nominale des paramètres incertains pourrait être connue avec une imprécision de 20 %.

Ces paramètres sont tous les paramètres identifiés pour le modèle cage dans le chapitre 3, soit le coefficient de tarage S_0 , les modules de cédage de la cage liés à l'effet du laminage M_{ced} , aux forces de contre-flexion (F_{worb}) M_{ced2} , et à la vitesse de rotation des cylindres (V_{it}) M_{ced3} , la masse totale M , auxquels on ajoute la pression d'alimentation P_a , la masse volumique de l'huile ρ et le coefficient de déformation élastique du vérin K , dont les valeurs moyennes sont connues mais incertaines. Tous ces paramètres ont des valeurs supposées fixes lors du laminage d'une bande d'acier et ne peuvent être considérés comme défaillants.

IV.1.1 Limites de détection par le test du saut réduit.

La limite de détection de ces paramètres permet d'estimer le niveau minimal d'imprécision donnant une évolution significative d'au moins un résidu du système de surveillance.

Paramètres incertains	Valeur nominale	Variation de 20 % par rapport à la valeur nominale ou incertitude supposée	Valeur limite de détection pour le test du saut réduit	Résidus de détection	Variation par rapport à la valeur nominale pour la limite de détection	Comparaison par rapport aux incertitudes supposées
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,28 \cdot 10^7$	$8,63 \cdot 10^9$	3,6	-46%	2,30
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^7$	$3,57 \cdot 10^9$	3,5,6	123%	6,16
K en N/m	0	$4 \cdot 10^{-11}$	$3,50 \cdot 10^{-10}$	3,4,5,6		8,75
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$3,226 \cdot 10^9$	$4,028 \cdot 10^9$	2	-0,1%	0,005
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$4,839 \cdot 10^9$	$4,036 \cdot 10^9$	2	0,1%	0,005
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$5,117 \cdot 10^9$	$6,344 \cdot 10^9$	2	-1%	0,04
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$7,675 \cdot 10^9$	$6,445 \cdot 10^9$	2	1%	0,04
Mced3 en s-1	-87519	-105020	-87929	2	0,47%	0,02
Mced3 en s-1	-87519	-70015	-87109	2	-0,47%	0,02
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1,109 \cdot 10^{-3}$	2	-0,09%	0,005
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,111 \cdot 10^{-3}$	2	0,09%	0,005
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	$6,64 \cdot 10^2$	impossible			impossible
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	$9,96 \cdot 10^2$	$3,03 \cdot 10^9$	3	36438%	1821,9
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	impossible			impossible
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$9,6 \cdot 10^4$	impossible			impossible

Tableau V.21 : Limites de détection par le test du saut réduit pour l'instrumentation initiale.

Remarques :

Les cas de détection impossible pour ρ et M correspondent aux cas où l'amplitude de la variation du paramètre a provoqué une saturation du courant I_s .

Le test du saut réduit semble montrer une sensibilité plus grande des résidus aux variations des paramètres incertains qu'à celles des paramètres à surveiller. En effet le coefficient de tarage So et les modules de cé dage $Mced$, $Mced2$, $Mced3$ notamment sont détectables pour des variations inférieures à 1%.

Cette sensibilité plus grande aux paramètres incertains est a priori très gênante pour la détection des autres défaillances puisqu'elle peut créer des fausses alarmes et gêner la localisation.

Pour tous les paramètres incertains détectables pour une variation inférieure à 1%, seul le résidu R2 est concerné contrairement à la majorité des paramètres à surveiller (cf. tableau V.3). Celui-ci devra donc éventuellement être écarté en vue d'une meilleure robustesse du système de surveillance.

Il n'y a détection que pour des variation relativement importantes de la pression d'alimentation P_a (-46% et 123%). Ainsi, l'imprécision autour de sa valeur influe très peu sur les résidus. Enfin, on peut considérer que la masse volumique de l'huile ρ n'influe pas sur les moyennes des résidus étudiés.

Comparaison instrumentation initiale et complémentaire

L'instrumentation complémentaire comporte 3 relations de redondance analytique utilisant la redondance par la relation cage (R6, R8 et R9). R6 est équivalent à R2 pour l'instrumentation initiale. Ces trois résidus ont les mêmes sensibilités aux paramètres incertains définis précédemment.

Paramètres incertains	Valeur nominale	incertitude supposée	Valeur limite de détection pour le saut réduit				Comparaison par rapport aux incertitudes supposées	
			instrumentation initiale	Résidu de détection	instrumentation complémentaire	Résidu de détection	instrumentation initiale	instrumentation complémentaire
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,28 \cdot 10^7$	$8,63 \cdot 10^6$	3,6	$9,83 \cdot 10^6$	15,21	2,30	1,93
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^7$	$3,57 \cdot 10^6$	3,5,6	$3,45 \cdot 10^6$	15,16,21	6,16	5,78
K en N/m	0	$4 \cdot 10^{-11}$	$3,50 \cdot 10^{-10}$	3,4,5,6	$2,90 \cdot 10^{-10}$	5,7	8,75	7,25
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$3,226 \cdot 10^9$	$4,028 \cdot 10^9$	2	$4,028 \cdot 10^9$	6	0,005	0,005
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$4,839 \cdot 10^9$	$4,036 \cdot 10^9$	2	$4,036 \cdot 10^9$	6	0,005	0,005
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$5,117 \cdot 10^9$	$6,344 \cdot 10^9$	2	$6,344 \cdot 10^9$	6	0,04	0,04
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$7,675 \cdot 10^9$	$6,445 \cdot 10^9$	2	$6,445 \cdot 10^9$	6	0,04	0,04
Mced3 en s-1	-87519	-105020	-87929	2	-87929	6	0,02	0,02
Mced3 en s-1	-87519	-70015	-87109	2	-87109	6	0,02	0,02
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1,109 \cdot 10^{-3}$	2	$1,109 \cdot 10^{-3}$	6	0,005	0,005
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,111 \cdot 10^{-3}$	2	$1,111 \cdot 10^{-3}$	6	0,005	0,005
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	$6,64 \cdot 10^2$	impossible		impossible		impossible	impossible
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	$9,96 \cdot 10^2$	$3,03 \cdot 10^3$	3	$9,36 \cdot 10^3$	15,21	1821,9	51,38
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^4$	impossible		impossible		impossible	impossible
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$9,6 \cdot 10^4$	impossible		impossible		impossible	impossible

Tableau V.22 : Limites de détection par le saut réduit pour les paramètres incertains

Pour les paramètres dont les limites de détection étaient dues au résidu R2 de l'instrumentation initiale, c'est-à-dire So, Mced, Mced2 et Mced3, il n'y a aucune amélioration de sensibilité car c'est toujours le même résidu qui détecte le premier (R2 pour l'instrumentation initiale est équivalent à R6 pour l'instrumentation complémentaire). Il n'y a donc pas, pour ces paramètres, dégradation de la robustesse du système de surveillance conçu avec l'instrumentation complémentaire par rapport à l'instrumentation initiale.

Pour les paramètres Pa, K et ρ , il y a une amélioration de la sensibilité due à l'élaboration de nouveaux résidus. Elle est très peu sensible pour Pa et K, un peu plus nette pour ρ , tout en restant dans des proportions largement acceptables en terme de robustesse.

L'ajout des capteurs sur Ps et Qv permet de générer de nouveaux résidus sans introduire de nouveaux problèmes au niveau de la robustesse finale du système de surveillance.

IV.1.2 Limites de détection par le test de Page-Hinkley

Le test de Page-Hinkley, permet de détecter de plus petites variations de moyenne des résidus. Pour ce test, on s'attend à une diminution générale des limites de détection des paramètres incertains, comme pour les paramètres à surveiller. Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus pour les deux schémas d'instrumentation :

Paramètres incertains	Valeur nominale	instrumentation initiale			instrumentation complémentaire		
		Limite de détection pour Page Hinkley	Résidus de détection	Variation par rapport à la valeur nominale	Limite de détection pour Page Hinkley	Résidus de détection	Variation par rapport à la valeur nominale
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,50 \cdot 10^7$	6	-6%	$1,55 \cdot 10^7$	3,21	-3%
Pa en Pa	$1,60 \cdot 10^7$	$1,95 \cdot 10^7$	4	22%	$1,72 \cdot 10^7$	3,21	8%
K en N/m	0	$1 \cdot 10^{-11}$	2,6		$1 \cdot 10^{-11}$	6,16,23	
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$4,030 \cdot 10^9$	2	-0,05%	$4,030 \cdot 10^9$	6,8	-0,05%
Mced en N/m	$4,032 \cdot 10^9$	$4,034 \cdot 10^9$	2	0,05%	$4,034 \cdot 10^9$	6,8,9	0,05%
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$6,370 \cdot 10^9$	2	-0,41%	$6,370 \cdot 10^9$	6,8	-0,41%
Mced2 en N/m	$6,396 \cdot 10^9$	$6,425 \cdot 10^9$	2	0,45%	$6,425 \cdot 10^9$	6,8,9	0,45%
Mced3 en s-1	-87519	-87700	2	0,21%	-87700	6,8	0,21%
Mced3 en s-1	-87519	-87300	2	-0,25%	-87300	6,8,9	-0,25%
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,10950 \cdot 10^{-3}$	2	-0,05%	$1,10950 \cdot 10^{-3}$	6	-0,05%
So en m	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,11050 \cdot 10^{-3}$	2	0,05%	$1,11050 \cdot 10^{-3}$	6	0,05%
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	impossible		impossible	700	1,14,22	-16%
ρ en kg/m ³	$8,30 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^4$	4,5	3514,46%	1150	1,14,22	39%
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$8,10 \cdot 10^3$	2	-89,88%	$1,35 \cdot 10^4$	6	-83%
M en kg	$8 \cdot 10^4$	$3,00 \cdot 10^6$	6	3650,00%	$6,00 \cdot 10^5$	21	650%

Tableau V.23 : Limites de détection par le test de Page-Hinkley pour les paramètres incertains

Comme pour le test du saut réduit, la sensibilité aux variations de ces paramètres n'est pas amplifiée par l'instrumentation complémentaire excepté pour **Pa**, **ρ** et **M**, variations restant cependant assez grandes par rapport au conditions réelles pour pouvoir assurer une robustesse suffisante des résidus concernés.

Notons par ailleurs que pour l'instrumentation complémentaire, Pa influe sur les résidus 1, 3, 14, 15, 21, 22 et ceci pour des variations relativement faibles(-3% et 8%).

La sensibilité du système de surveillance aux paramètres incertains met en évidence un problème de robustesse à ces paramètres, du résidu R2 pour l'instrumentation initiale et R6, R8 et R9 pour l'instrumentation complémentaire, qui les rend inutilisables pour la détection. De façon duale, il faut recalibrer le résidu R2 (ou R6) qui constitue un résidu majeur pour la détection des défaillances capteurs.

Pour les deux systèmes d'instrumentation, les paramètres So, Mced, Mced2, Mced3 sont difficilement estimables avec une précision supérieure à 0,5 %. En considérant que leur valeur peut évoluer au cours du temps, estimer leur valeur en début de laminage d'une tôle (en moyennant le résidu) ne peut être suffisant. Nous étudions donc le système de surveillance sans le résidu R2 pour l'instrumentation initiale et sans les résidus R6, R8, R9 pour l'instrumentation complémentaire, résidus les plus sensibles aux paramètres incertains.

Paramètres incertains	Valeur nominale	Instrumentation initiale			Instrumentation complémentaire		
		Limite de détection pour Page Hinkley	Résidus en détection	Variation par rapport à la valeur nominale	Limite de détection pour Page Hinkley	Résidus en détection	Variation par rapport à la valeur nominale
Mced en N/m	$4,032.10^9$	$3,875.10^9$	3	-3,89%	$3,875.10^9$	12,16,18	-3,89%
Mced en N/m	$4,032.10^9$	$4,4.10^9$	6	9,13%	$4,200.10^9$	21	4,17%
Mced2 en N/m	$6,396.10^9$	$4,900.10^9$	3	-23,39%	$4,900.10^9$	12,16,18	-23,39%
Mced2 en N/m	$6,396.10^9$	$1,9.10^{10}$	6	197,06%	$1,000.10^{10}$	21	56,35%
Mced3 en s-1	-87519	-63000	6	-28,02%	-72000	21	-17,73%
Mced3 en s-1	-87519	-107500	3	22,83%	-102500	12,16,18	17,12%
So en m	$1,11.10^{-3}$	$1,0750.10^{-3}$	3	-3,15%	$1,0750.10^{-3}$	12,16,18	-3,15%
So en m	$1,11.10^{-3}$	$1,19.10^{-3}$	6	7,11%	$1,1525.10^{-3}$	21	3,83%

Tableau V.24 : Limites de détection sans le résidu R2 (instrumentation initiale) et sans les résidus R6, R8, R9 (instrumentation complémentaire).

L'élimination des résidus sensibles R6, R8, R9 permet d'obtenir une meilleure robustesse du système de surveillance aux variations des paramètres So, Mced, Mced2, Mced3. Ainsi, le système de surveillance est robuste pour des variations inférieures à 3 %, quelque soit le paramètre incertain et quelque soit l'instrumentation utilisée.

Cependant, l'élimination de ces résidus changent les limites de détection des défaillances pour lesquelles ces résidus détectaient en premier. C'est le cas en instrumentation pour les paramètres f en variation positive, Fc et μ_v initiale (cf. tableau V.7) et pour les capteurs sur X et Pv (cf. tableau V.10). Pour l'instrumentation complémentaire, seul le capteur sur X est concerné. Les nouvelles limites de détection deviennent alors :

Type de défaillance	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley avec 6 résidus	Résidus de détection	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley sans R2	Résidus de détection
f en N,s/m	3.10^5	$3,35.10^5$	2	impossible	
μ_v en Pa/s	0,0057	0,04	2	impossible	
Fcste en N	$2,2.10^4$	$1,00.10^5$	2	$8,1.10^5$	6
ech Pv+ en Pa	$4,359.10^4$	$2,500.10^3$	2	$2,2.10^5$	5
ech Pv- en Pa	$-4,359.10^4$	$-2,500.10^3$	2	-8.10^4	3
Pv= α_- .Pv	0,99	0,9993	2	0,98	3
Pv= α_+ .Pv	1,01	1,0007	2	1,06	5
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	$3,5.10^{-7}$	2	$2,5.10^{-5}$	6
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-5.10^{-7}	2	$-2,5.10^{-5}$	6
Xm= α_+ .Xm	1,01	1,0000000008	2	1,01	4
Xm= α_- .Xm	0,99	0,9999999992	2	0,94	3

Tableau V.25 : Limites de détection des paramètres à surveiller et des capteurs sans R2.

•Instrumentation complémentaire :

Type de défaillance	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley avec 23 résidus	Résidus de détection	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley sans R6, R8 et R9	Résidus de détection
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	$3,5.10^{-7}$	2	$2,5.10^{-6}$	5,7,23
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-5.10^{-7}	2	$-2,5.10^{-6}$	5,7,23
Xm= α .Xm	1,01	1,0000000008	2	1,01	11,17,21
Xm= α .Xm	0,99	0,9999999992	2	0,94	16,23

Tableau V.26 : Limites de détection des paramètres à surveiller et des capteurs sans R6, R8 et R9.

IV.1.3 Détection et localisation robustes

La suppression des résidus R2, pour l'instrumentation initiale, ou R6, R8 et R9 pour l'instrumentation complémentaire nuit aux performances du système de surveillance, puisque les distances entre signatures de défaillance, ou entre une signature de défaillance et le fonctionnement normal peuvent être réduites. Ainsi, sans le résidu R2 pour l'instrumentation initiale, les défaillances des capteurs Pv et X ne sont plus détectables structurellement, puisqu'elles n'influencent plus aucun résidu. Pratiquement, seul X n'est plus détectable.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Théoriquement détectables	7 (9)	47 %	11 (12)	65 %
Pratiquement détectables	6 (7)	40 %	15 (16)	88 %
Non détectables	9 (8)	60 %	2 (1)	13 %

Tableau V.27 : Détection par le test de Page Hinkley pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, instrumentation initiale sans R2 et complémentaire sans R6, R8 et R9.

Entre parenthèses figurent les performances obtenues avec l'ensemble complet des résidus

Pour l'instrumentation complémentaire, la défaillance du capteur de position de serrage X n'était détectable théoriquement et pratiquement que par les résidus R6, R8 et R9. Les supprimer ne permet plus de surveiller ce capteur, mais 88 % des défaillances du cahier des charges restent détectables en pratique.

Pour la localisation, la défaillance du capteur sur X n'est plus localisable puisque non détectable, mais il n'y a pas d'autre changement.

Instrumentation : Défaillances	Initiale (15 défaillances)		Complémentaire (17 défaillances)	
	Nb de défaillances	%	Nb de défaillances	%
Théoriquement localisables	3 (3)	20 %	4 (4)	24 %
Pratiquement localisables	3 (4)	20 %	5 (6)	29 %
Non localisables	12 (11)	80 %	12 (11)	71 %

Tableau V.28 : Localisation par le test de Page-Hinkley pour l'ensemble des défaillances du cahier des charges, instrumentation initiale sans R2 et complémentaire sans R6, R8 et R9.

Entre parenthèses figurent les performances obtenues avec l'ensemble complet des résidus.

La défaillance du capteur sur X ne peut être détectée par les résidus qui utilisent son rebouclage en entrée du régulateur comme nous l'avons vu dans le chapitre 4. Les résidus les

plus influencés par sa défaillance sont les résidus utilisant la relation cage directement, soit justement les résidus écartés en raison de leur trop grande sensibilité aux incertitudes des paramètres de cédage. Les résultats obtenus par l'analyse du tableau V.28 étaient donc prévisibles.

IV.2 Robustesse des tests dans les conditions industrielles

Lors de la définition du test de Page-Hinkley, le minimum de saut à détecter v_m (voir paragraphe II.1.2) a été volontairement choisi très petit afin de détecter le maximum de défaillances d'amplitudes très faibles. Nous avons vu que les tests appliqués sur les résidus représentaient la variation de la moyenne du bruit résultant sur les résidus simulés. Cependant, les résidus issus des mesures ne sont pas strictement des bruits à répartition normale, puisqu'ils comportent les erreurs de modélisation, les variations non maîtrisées des paramètres incertains et d'éventuelles perturbations non prises en compte par le modèle. Par ailleurs, la modélisation est difficile à approfondir sans trop alourdir le modèle. En conséquence, l'ensemble de ces erreurs de modélisation provoque des fausses alarmes en fonctionnement normal. Avec les réglages utilisés pour évaluer les résidus de simulation ($\delta = 1.10^{-4}$), on constate en particulier un phénomène non modélisé en début du laminage avant le début de la régulation AGC visible sur tous les résidus, ainsi qu'une augmentation des valeurs du test en fin du laminage particulièrement conséquent pour le résidu RM2 (cf. figure V.11), comme on pouvait s'y attendre, puisqu'il s'agit du résidu le moins robuste aux paramètres incertains. Les réglages qui ont été choisis sur les tests en fonctionnement normal en simulation doivent donc être reconsidéré pour les résidus mesurés.

Afin de pouvoir appliquer le test de Page-Hinkley sur les résidus de mesure, il est possible soit d'augmenter le saut minimal de défaillance à détecter en conservant les mêmes seuils, pour rendre les tests robustes en fonctionnement normal, soit de conserver une amplitude minimale détectable faible et d'augmenter les seuils de détection, pour éviter toutes les fausses alarmes en fonctionnement normal.

IV.2.1 Augmentation de l'amplitude minimale détectable

Pour augmenter la robustesse des tests aux erreurs décrites précédemment, il faut augmenter le saut minimum à détecter v_m (soit $v_m = \delta \cdot \sigma_0$ avec σ_0 l'estimation de l'écart-type du signal) et réajuster les niveaux de seuils en conséquence. Les tests calculés avec un saut pour $\delta = 1$ (cf. figure V.13), sont robustes mais également insensibles aux défaillances. Il faut trouver un compromis entre la robustesse aux erreurs intrinsèques et la sensibilité aux défaillances. Avec $\delta = 0,4$, les résidus sont robustes aux erreurs intrinsèques (cf. figure V.12), à l'exception du résidu RM2, que l'on sait déjà très peu robuste. Excepté ce résidu, les valeurs des seuils réajustés sont 2 à 5 fois plus faibles que ceux obtenus avec les résidus de simulation pour $\delta = 10^{-4}$.

Avec $\delta = 0,4$, les tests de Page-Hinkley appliqués aux résidus après simulation des défaillances montre que la moitié environ des défaillances liées aux paramètres ne sont plus détectables et les paramètres Q_f et K_1 sont détectés avant la valeur définie par le cahier des charges (cf. tableau V.29). Pour les défaillances capteurs, seule la défaillance du capteur de la pression vérin P_v reste détectable dans les limites du cahier des charges (cf. tableau V.30).

Paramètres à surveiller	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Limite de détection pour Page Hinkley $\delta=10^{-4}$	Résidus de détection $\delta=10^{-4}$	Limite de détection pour Page Hinkley $\delta=0,4$	Résidus de détection $\delta=0,4$	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges $\delta=10^{-4}$	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges $\delta=0,4$
Qf en m ³ /s	0	8,85.10 ⁻⁵	2,50.10 ⁻⁶	3,6	6,85.10 ⁻⁵	3,6	0,03	0,77
Kr en A/m	40	36,5	28	1	20,7	1	3,43	5,51
Kr en A/m	40	43,5	50	1	impossible		2,86	impossible
R en s-1	32,21	25,23	impossible		impossible		impossible	impossible
R en s-1	32,21	38,99	impossible		impossible		impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	5,85.10 ⁵	impossible		impossible		impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	6,10.10 ⁷	3,35.10 ⁸	2	impossible		5,72	impossible
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,17.10 ⁹	9,00.10 ⁸	3,6	4,7.10 ⁸	3,6	1,69	2,87
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	2,075.10 ⁹	4,05.10 ⁹	3	8,28.10 ⁹	3	4,83	13,79
μ_v en Pa/s	0	0,0057	0,04	2	0,074	2	7,02	12,98
Fcste en N	0	2,2.10 ⁴	1,00.10 ⁵	2	impossible		4,55	impossible
ξ	0,9	0,74	0,08	4,5	impossible		5,13	impossible
ξ	0,9	1,063	2	3,6	impossible		6,75	impossible
ω_0 en rad/s	410	330	150	3,6	impossible		3,25	impossible
ω_0 en rad/s	410	600	impossible		impossible		impossible	impossible
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,44.10 ⁻³	3,24.10 ⁻³	4,5	0,9.10 ⁻³	4,5	1,59	8,47
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	3,6	14,2.10 ⁻³	3,6	1,00	30,65
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	3,6	0,65.10 ⁻³	3,6	1,00	8,81
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,72.10 ⁻³	2,92.10 ⁻³	4,5	10,25.10 ⁻³	4,5	1,91	35,22
K _t en m ³ /Pa.s	0	2,2.10 ⁻¹¹	1,00.10 ⁻¹²	3,6	1,9.10 ⁻¹¹	3,6	0,05	0,86

Tableau V.29 : Comparaison des limites de détection par le test de Page-Hinkley des défaillances liées aux paramètres avec $\delta=0,4$ et $\delta=10^{-4}$.

Type de défaillance capteur	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley $\delta=10^{-4}$	Résidus de détection	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley $\delta=0,4$	Résidus de détection
ech ls+ en A	4,517.10 ⁻⁴	1,35.10 ⁻⁵	4	9.10 ⁻⁵	1
ech ls- en A	-4,517.10 ⁻⁴	-1.10 ⁻⁵	1	-18,9.10 ⁻⁵	1
ech Pv+ en Pa	4,359.10 ⁴	2,500.10 ³	2	2,25.10 ⁴	2
ech Pv- en Pa	-4,359.10 ⁴	-1.10 ³	2	-1,03.10 ⁴	2
Pv= α_v .Pv	0,99	0,99975	2	0,99715	2
Pv= α_v .Pv	1,01	1,0007	2	1,0062	2
ls= α_s .ls	0,99	0,75	4	impossible	
ls= α_s .ls	1,01	1,125	1	2,2	1
ech Xm+ en m	5.10 ⁻⁶	3,5.10 ⁻⁷	2	4,6.10 ⁻⁶	2
ech Xm- en m	-5.10 ⁻⁶	-3,5.10 ⁻⁷	2	-8,6.10 ⁻⁶	2
Xm= α_x .Xm	1,01	1,0000000008	2	1,055	2
Xm= α_x .Xm	0,99	0,9999999992	2	0,9765	2

Tableau V.30 : Comparaison des limites de détection par le test de Page-Hinkley des défaillances capteurs avec $\delta=0,4$ et $\delta=10^{-4}$.

IV.2.2 Augmentation des seuils de détection

Il est possible ainsi d'augmenter les seuils de détection pour éviter toutes les fausses alarmes en fonctionnement normal. Evidemment, si on augmente les seuils on augmente également les niveaux des défaillances détectables. Il est possible d'extrapoler les limites de détection des défaillances en supposant en première approximation que leur influence est linéaire sur les résidus, et que le premier résidu qui détecte est toujours le même. On peut supposer que les limites de détection des défaillances pour l'instrumentation initiale avec les seuils de la figure V.11 donneront les résultats suivants :

Paramètres à surveiller	Valeur nominale	Valeur de défaillance du cahier des charges	Limite de détection pour Page Hinkley seuils de simulation	Limite de détection pour Page Hinkley seuils de mesure	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges seuils de simulation	comparaison par rapport aux défaillances du cahier des charges seuils de mesure
Qf en m ³ /s	0	8,85.10 ⁻⁵	2,50.10 ⁻⁶	2.10 ⁻⁵	0,03	0,22
Kr en A/m	40	36,5	28	impossible	3,43	impossible
Kr en A/m	40	43,5	50	47,5	2,86	2,14
R en s-1	32,21	25,23	impossible	impossible	impossible	impossible
R en s-1	32,21	38,99	impossible	impossible	impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	5,85.10 ⁵	impossible	impossible	impossible	impossible
f en N,s/m	3.10 ⁶	6,10.10 ⁷	3,35.10 ⁸	3,32.10 ⁹	5,72	27,24
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	1,17.10 ⁹	9,00.10 ⁸	impossible	1,69	impossible
β en Pa/s	1,56.10 ⁹	2,075.10 ⁹	4,05.10 ⁹	1,027.10 ¹⁰	4,83	16,86
μv en Pa/s	0	0,0057	0,04	0,53	7,02	92,98
Fcste en N	0	2,2.10 ⁴	1,00.10 ⁵	8.10 ⁵	4,55	8
ξ	0,9	0,74	0,08	impossible	5,13	impossible
ξ	0,9	1,063	2	9,7	6,75	53,99
ω ₀ en rad/s	410	330	150	impossible	3,25	impossible
ω ₀ en rad/s	410	600	impossible	impossible	impossible	impossible
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	3,44.10 ⁻³	3,24.10 ⁻³	3,1.10 ⁻³	1,59	2,11
Qn _b en m ³ /s	3,78.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	4,12.10 ⁻³	6,5.10 ⁻³	1,00	8
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	0,82.10 ⁻³	1,00	8
Qn _h en m ³ /s	2,50.10 ⁻³	2,72.10 ⁻³	2,92.10 ⁻³	3,02.10 ⁻³	1,91	2,39
K ₁ en m ³ /Pa.s	0	2,2.10 ⁻¹¹	1,00.10 ⁻¹²	6,25.10 ⁻¹²	0,05	0,36

Tableau V.31 : Extrapolation des limites de détection des paramètres à surveiller pour des seuils déduits des tests sur les résidus de simulation

Pour ce réglage, les paramètres Q_f et K₁ sont détectés avant la valeur définie par le cahier des charges. Pour les paramètres Qn_b et Qn_h les valeurs obtenues à la limite de détection ne respectent plus le cahier des charges. Pour les autres paramètres qui étaient en dehors du cahier des charges, leur détection est rendue beaucoup plus difficile par l'augmentation des seuils. Enfin, pour les paramètres Kr-, β-, ξ- et ω₀- l'extrapolation de leur limite de détection fournit des valeurs non significatives puisque négatives.

Type de défaillance capteur	Valeur de défaillance initialement proposée	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley seuils de simulation	Résidus de détection	Valeur limite détectable par le test de Page-Hinkley seuils de mesures
ech Is+ en A	$4,517.10^{-4}$	$1,35.10^{-5}$	4	$5,4.10^{-5}$
ech Is- en A	$-4,517.10^{-4}$	-1.10^{-5}	1	$-6,25.10^{-5}$
ech Pv+ en Pa	$4,359.10^4$	$2,500.10^3$	2	$2,5.10^4$
ech Pv- en Pa	$-4,359.10^4$	-1.10^3	2	$-1,25.10^3$
Pv= α -.Pv	0,99	0,99975	2	0,9875
Pv= α +.Pv	1,01	1,0007	2	1,007
Is= α -.Is	0,99	0,75	4	impossible
Is= α +.Is	1,01	1,125	1	1,78
ech Xm+ en m	5.10^{-6}	$3,5.10^{-7}$	2	$4,38.10^{-7}$
ech Xm- en m	-5.10^{-6}	-5.10^{-7}	2	-5.10^{-6}
Xm= α +.Xm	1,01	1,0000000008	2	1,000000001
Xm= α -.Xm	0,99	0,9999999992	2	0,999999992

Tableau V.32 : Extrapolation des limites de détection des défaillances capteurs pour des seuils déduits des tests sur les résidus de simulation

En extrapolant leur limite de détection, toutes les défaillances capteurs restent détectables par le test de Page-Hinkley, à l'exception de la défaillance multiplicative de Is.

IV.2.3 Estimation de la moyenne de référence μ_0 .

Un autre problème de robustesse qui se pose également est l'estimation de la moyenne de référence μ_0 . Dans la procédure utilisée, cette moyenne est estimée sur les mille premiers points du signal. Pour les résidus de mesure, l'estimation de la moyenne sur les mille premiers points prend en compte les erreurs intrinsèques en début du laminage. Si l'on analyse la variation de moyenne des résidus calculée sur une fenêtre temporelle glissante de 0,1 s (cf. Figure V.10), on s'aperçoit qu'elle évolue sur les mille premiers points (soit 10 s). La stabilité de la moyenne est meilleure au delà de 10 s pour la plupart des résidus, associée à des points de fonctionnement stabilisés du laminage après l'engagement de la bande. Ainsi, tous les résidus sont décalés de leur moyenne, ce qui explique que les tests augmentent avec une pente constante puisqu'ils cumulent à chaque instant l'écart entre la valeur du résidu et sa moyenne estimée.

L'estimation de la moyenne sur les mille premiers points est donc une bonne estimation pour les résidus de simulation, mais ne peut être interprétée précisément pour les résidus de mesure en fonctionnement normal.

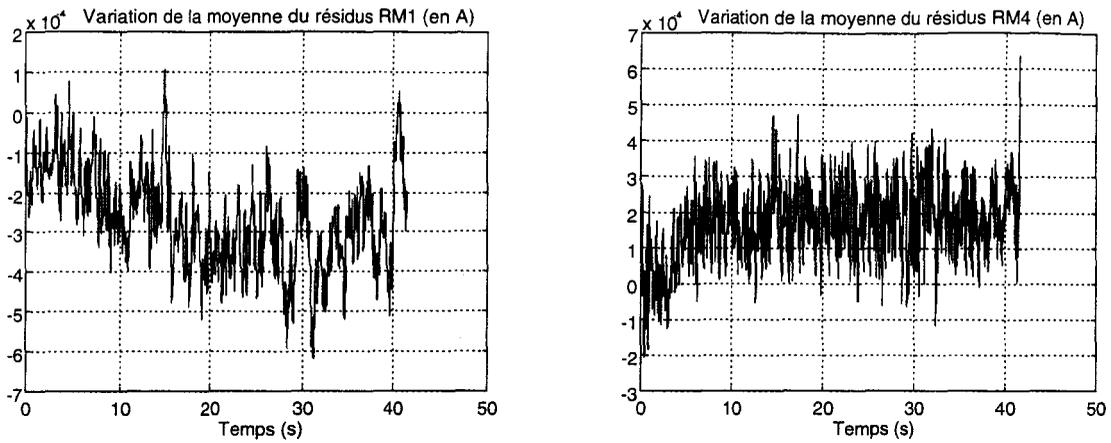


Figure V.10 : Variation de moyenne des résidus mesurés RM1 et RM4 pour la bande n°4

On peut remarquer par ailleurs que les moyennes sur toute la durée du laminage des résidus de mesure ou de simulation ne peuvent être considérées comme statistiquement nulles, puisque l'écart-réduit de chacun des résidus est significatif (>3).

IV.2.4 Conclusion

Dans les deux cas, simulation et mesure, en fonctionnement normal, les moyennes des résidus ne peuvent être considérées comme nulles statistiquement, et les moyennes des résidus de mesure ne sont pas constantes dans le temps, ce qui indique que des variations intrinsèques de paramètre subsistent, surtout pour les phases transitoires de début et de fin de laminage. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces limitations dans l'exploitation du système de surveillance

L'ajustement des estimations des moyennes des résidus peut cependant se faire progressivement à partir des estimations précédentes des moyennes, obtenues sur des plages temporelles appropriées, et dans des conditions similaires de laminage (composition de l'acier, épaisseur finale visée, ...).

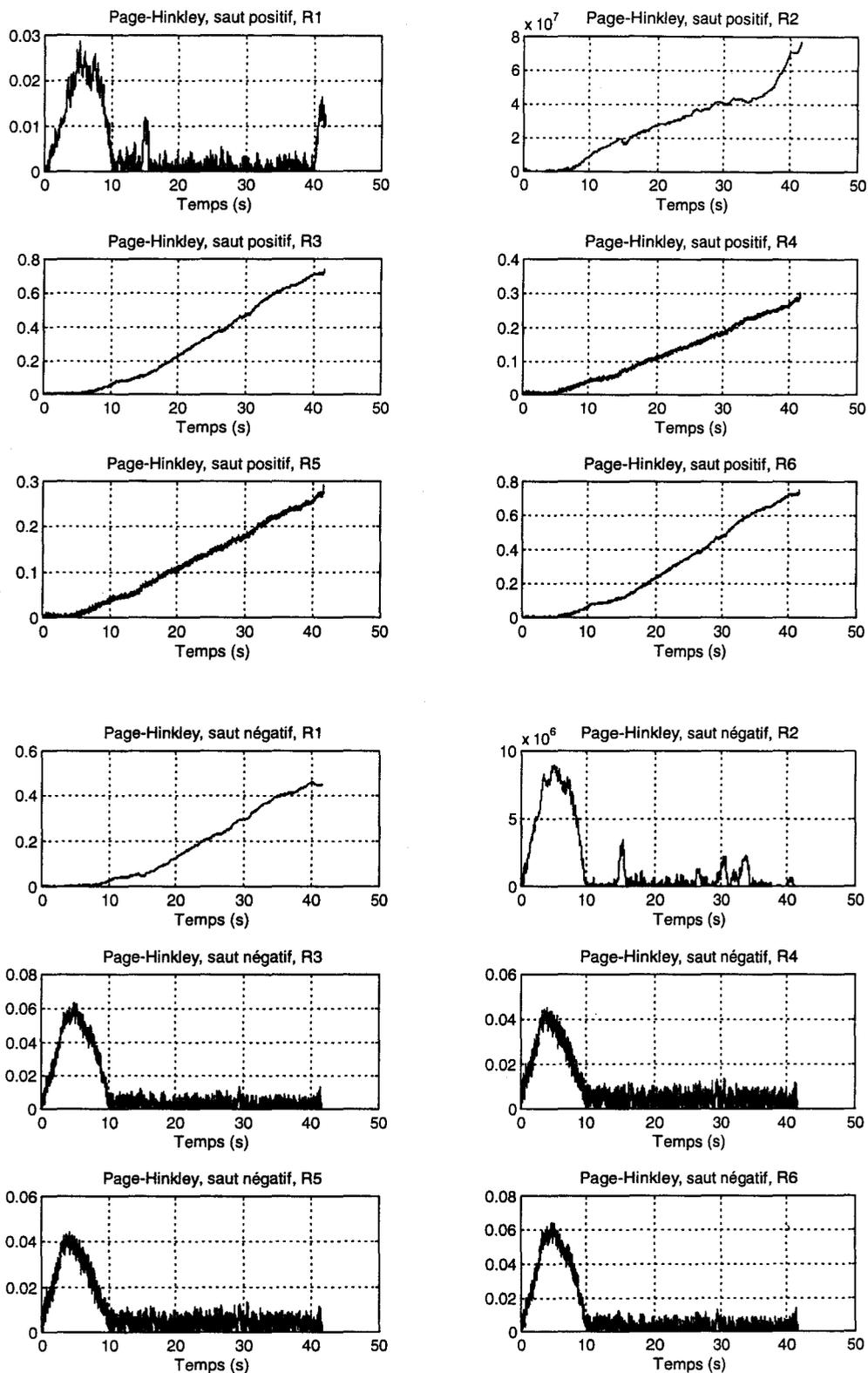


Figure V.11 : Test de Page-Hinkley pour la bande n°4, $\delta = 1.10^{-4}$

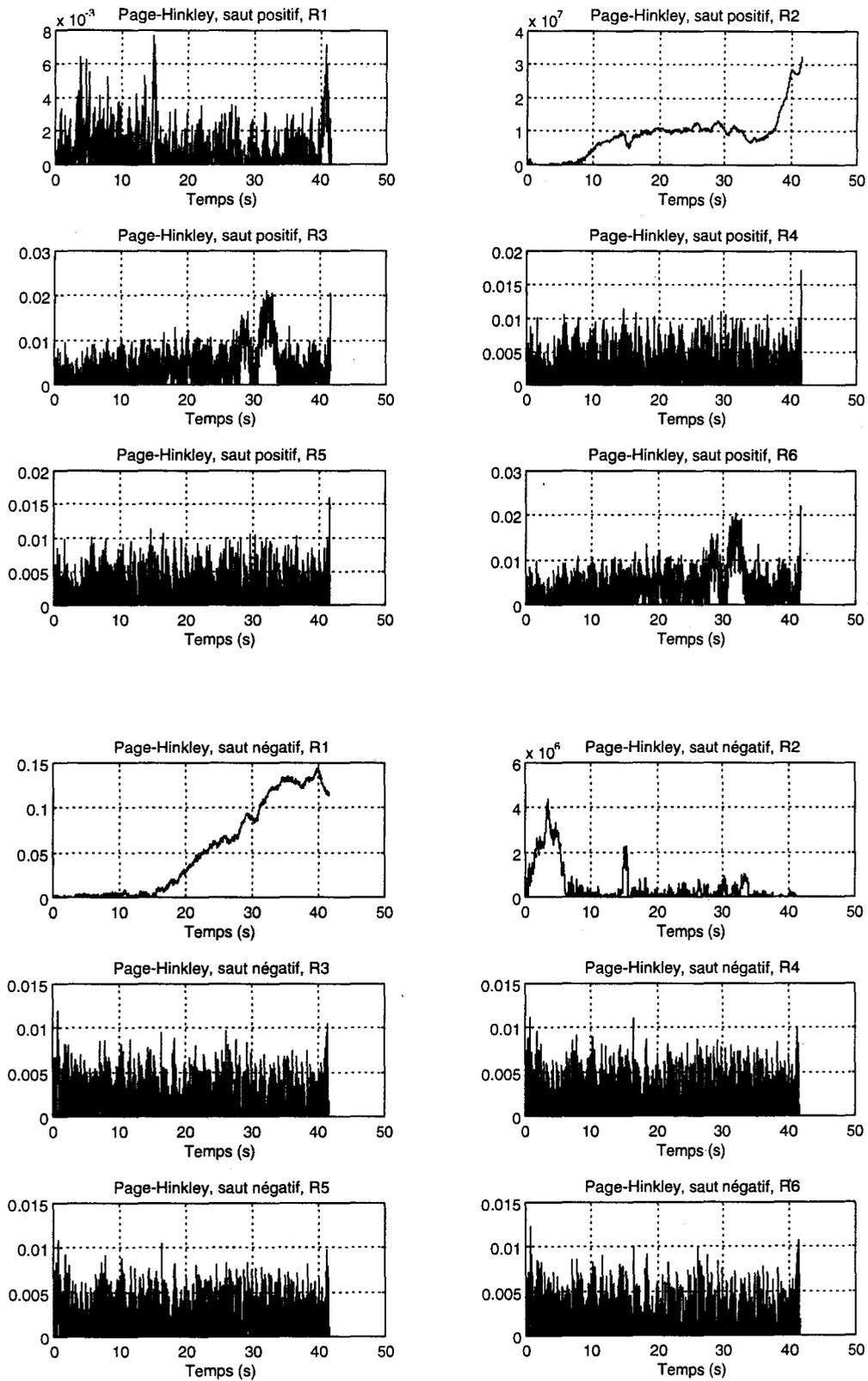


Figure V.12 : Test de Page-Hinkley pour la bande n°4, $\delta = 0,4$

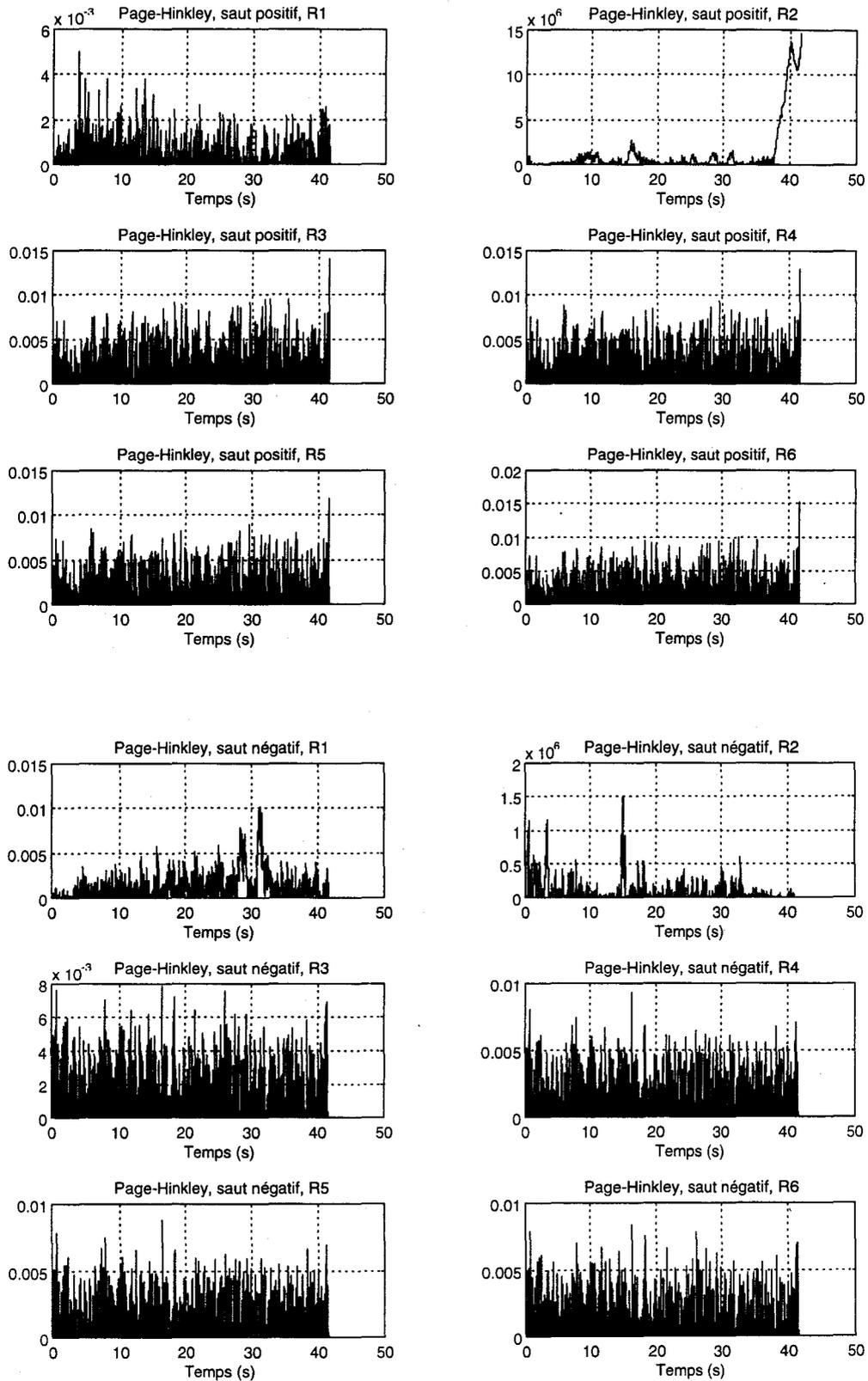


Figure V.13 : Test de Page-Hinkley pour la bande n°4, $\delta = 1$

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'analyse des performances du système de surveillance a permis de montrer l'importance des procédures d'apprentissage avec les signaux mesurés. Le comportement global entrée/sortie obtenu par le modèle du système a été validé dans un premier temps. La différence entre la sortie simulée et la sortie mesurée a également été jugée satisfaisante dans un second temps. Une première analyse des résidus ayant montré que les valeurs des variables intermédiaires en simulation et sur le procédé ne sont pas suffisamment proches, une modélisation plus fine du modèle a été engagée. Ainsi, l'ensemble des résidus est devenu plus robuste vis à vis des entrées du système. Dans cette démarche, les résidus générés par le système de surveillance ont servi d'indicateurs de la validité du modèle, le système étant supposé en fonctionnement normal.

L'analyse de la distribution des résidus de mesure a montré que ces derniers suivaient une loi normale et qu'ils étaient ainsi indépendants des signaux d'entrées. L'étude des performances du système de surveillance et une partie de sa conception ont été réalisées en utilisant une simulation du système. Les entrées industrielles mesurées sur le procédé ont permis de réaliser des simulations complètes du laminage de bandes d'acier, et d'utiliser les sorties du simulateur pour générer un nouvel ensemble de valeurs des résidus. Il a d'abord fallu vérifier que les caractéristiques des résidus issus de la simulation étaient comparables à celles des résidus calculés avec les mesures. On a donc cherché à ce qu'ils aient la même statistique en moyenne et niveau de bruit. La simulation numérique étant déterministe, la première condition est toujours vérifiée. Le bruit persistant sur les résidus résulte uniquement des approximations numériques introduites par l'estimation des dérivées. Ce bruit numérique peut devenir important si les variations du signal sont rapides relativement à leur fréquence d'échantillonnage. Aussi, il convient de le minimiser en choisissant une méthode d'estimation de la dérivée qui atténue les hautes fréquences selon un filtre approprié, capable de conserver les composantes du signal utile, sans déphasage.

Pour caler les résidus de simulation sur le modèle statistique des résidus de mesure, il a fallu ajouter différentes sources de bruits sur le simulateur. Ces bruits ne sont pas choisis arbitrairement. Ils doivent tenir compte des phénomènes réels, comme par exemple le bruit de mesure sur les capteurs, et des perturbations qui agissent sur le système. Si l'on sait où elles agissent, le niveau et la répartition statistique des bruits peuvent être choisis pour obtenir en final des résidus dont la statistique est conforme à celle des résidus de mesure. Ce résultat est obtenu par calages successifs en fonction de la dépendance des résidus aux bruits. Les résidus de simulation ainsi obtenus sont utilisés pour effectuer l'étude de la surveillance du processus de serrage hydraulique.

Comme on ne dispose pas du procédé physique et que de plus les défaillances ne peuvent être introduites sur ce procédé, le simulateur est utilisé ici comme outil pour la définition du cahier des charges, première étape de la conception du système de surveillance qui servira de base à son évaluation. L'influence des défaillances sur les variables du système est utilisée pour définir un cahier des charges réaliste à partir de critères représentant l'état du système. L'intérêt de cette démarche est qu'elle est fondée sur des critères quantitatifs de l'état du système. Cependant, seule la sortie régulée du procédé est réellement représentative de la qualité du produit final. Les autres variables ne sont utiles que pour décrire les dysfonctionnements du procédé qui peuvent conduire à des dégradations de celui-ci.

Pour les paramètres définis dans le cahier des charges, les défaillances de chacun d'entre eux sont simulées sous la forme d'un échelon persistant. Le modèle du serrage hydraulique implanté sous simulateur est utilisé pour évaluer pratiquement les sensibilités aux

défaillances. Il est ainsi possible d'évaluer pratiquement les sensibilités des résidus aux défaillances. Ces sensibilités sont étudiées théoriquement dans un premier temps sur la base des expressions analytiques des résidus. En calculant symboliquement les dérivées partielles des résidus par rapport aux paramètres aux différents points de fonctionnement, on en déduit une expression analytique des sensibilités, évaluable numériquement en remplaçant les signaux par les sorties simulées pour la même défaillance. La comparaison des deux ensembles de sensibilités indique que les sensibilités nulles théoriquement le sont également en pratique. Par contre, pour les autres sensibilités, le niveau de sensibilité n'est pas toujours évalué correctement en théorie, en raison des différentes non-linéarités présente sur le système.

Les sensibilités des résidus aux défaillances fournissent des informations importantes pour la localisation sur la structure des signatures de défaillances. L'étude des signatures théoriques en fonction des différents points de fonctionnement, concernant leurs influences sur la moyenne des résidus a permis de s'apercevoir que certains résidus deviennent théoriquement insensibles à certaines défaillances.

Les signatures déduites de l'étude théorique comportent moins d'éléments que les signatures structurelles et sont plus proches des signatures pratiques des défaillances puisque toutes les moyennes des résidus ne sont pas influencées par les défaillances.

Pour vérifier ces résultats et obtenir les signatures pratiques des défaillances, il faut appliquer des procédures de détection sur les résidus durant la simulation des valeurs de défaillances du cahier des charges. Les résultats montrent que les signatures pratiques sont proches des signatures statiques théoriques déduites des non-linéarités.

L'analyse fine des résultats du système de surveillance appliqué au procédé industriel, pour l'instrumentation initiale, montre que certaines défaillances n'influencent aucune des moyennes des résidus, aucune détection n'étant alors possible. Une instrumentation complémentaire avec addition de quelques capteurs sur le processus enrichit sensiblement le système de surveillance. L'instrumentation complémentaire fournit alors plus de résidus sensibles aux défaillances. Ainsi, dans le cas du serrage hydraulique, le taux de détection des défaillances du cahier des charges est de 100 % pour cette instrumentation, alors qu'il n'est que de 53 % pour l'instrumentation initiale. Parmi les défaillances détectées et localisées, on observe une très bonne détection des paramètres dont la variation influence directement la qualité du produit par une variation de la position de l'actionneur hydraulique. Les autres critères définis pour la détection d'une défaillance permettent de détecter le comportement prémonitoire d'une défaillance liée à un des paramètres essentiels du serrage hydraulique. Cependant, plusieurs défaillances ont la même signature pratique, c'est à dire qu'elles influencent les mêmes sous-systèmes. Dans ce cas, il n'est pas possible de localiser ces défaillances, d'autant plus qu'on ne dispose pas du contrôle des entrées au cours du laminage, qui permettrait, par exemple de générer des signaux spécifiques excitant des fréquences particulières caractéristiques d'une défaillance spécifique.

L'étude pratique des sensibilités a montré également que les résidus utilisant directement le modèle du sous système cage recalé afin d'être exploitable pour la surveillance restaient trop sensibles aux incertitudes de certains paramètres qui ne font pas partie du cahier des charges du système de surveillance. Ce dernier a alors été étudié sans ces résidus, les autres résidus étant quant à eux suffisamment robustes aux paramètres incertains. Pour l'instrumentation initiale, plusieurs limites de détection sont augmentées et s'éloignent des objectifs du cahier des charges, et le système de surveillance perd alors en performances. Cependant, pour l'instrumentation complémentaire, seule une défaillance du capteur de régulation ne peut plus

être détectée avant la valeur de défaillance du cahier des charges, alors qu'il était possible de le faire avec la structure complète des résidus.

Par ailleurs, l'application des tests de décision aux résidus de mesure indique que ces tests doivent être adaptées aux conditions industrielles. L'estimation des moyennes des résidus en début de bande est faussée en raison de phénomènes transitoires lors de l'introduction de la bande de la cage. Les seuils des tests sur les résidus sont également à ajuster par apprentissage en fonctionnement normal afin de minimiser les fausses alarmes. En extrapolant les résultats, on s'aperçoit que les défaillances liées aux paramètres ou les défaillances capteurs restent détectables pour l'instrumentation initiale.

Afin d'améliorer la localisation des défaillances, il est possible lors d'un essai à roule d'appliquer sur le système des signaux spécifiques excitant des fréquences particulières caractéristiques d'une défaillance. Cette solution peut éventuellement être envisagée entre le laminage de deux bandes, ou pendant un arrêt de laminage. Les réponses temporelles des variables fournissent alors des informations intéressantes pour la surveillance en fonction de la connaissance que l'on possède du système pour ce type d'essai.

L'observation des délais de détection peut également être exploitée pour établir l'origine de la défaillance. Les défaillances qui ont la même structure n'ont pas systématiquement la même influence sur les résidus. Pour certaines défaillances, les résidus influencés détectent tous pratiquement en même temps la défaillance, tandis que pour d'autres, l'instant de détection des résidus peut être différent pour chacun des résidus. En établissant alors un tableau de séquences de déclenchement des résidus pour une défaillance donnée, on obtient ainsi une information supplémentaire pour la localisation de défaillances.

La décision basée sur les signatures des défaillances doit être réalisée à partir de règles et d'hypothèses établies sur la connaissance des antécédents des défaillances du système. Par exemple, la probabilité d'apparition de la défaillance, sa fréquence, ses causes et ses conséquences sont autant d'éléments utiles pour établir l'hypothèse de l'origine de la défaillance du système. Cette décision peut être réalisée par un système de déduction.

S'il subsiste plusieurs hypothèses, le choix est laissé à l'opérateur grâce à une interface qui lui propose sous forme symbolique les différentes solutions envisagées par le système de surveillance.

ANNEXES

Annexe 1 : - Récapitulatif des équations du serrage hydraulique

- Définitions et valeurs nominales des paramètres du serrage hydraulique

Annexe 2 : - Allures temporelles des mesures pour la bande n°4

Annexe 3 : - Signature de défaillances des capteurs et paramètres pour l'instrumentation complémentaire

Annexe 4 : Schéma-bloc du serrage hydraulique après évolution du modèle

Annexe 5 : Droites de régression statistique pour la bande n°4

Annexe 6 : - Expressions analytiques complètes des résidus

- Expressions analytiques en régime statique des résidus

- Expressions des sensibilités théoriques aux défaillances

- Tableau de comparaison des différentes signatures

Annexe 7 : - Tableau de comparaison des signatures statiques au point de fonctionnement, en tenant compte des non-linéarités et pratique pour l'instrumentation complémentaire

Annexe 8 : - Tableau de comparaison des sensibilités théoriques et pratique

Annexe 9 : - Valeurs des défaillances pour le cahier des charges à 20 %

Annexe 10 : -Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire

- Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire, avec 13 résidus

- Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire, avec 10 résidus

Annexe 11 : Allures des résidus pour l'instrumentation initiale pour la bande n°4.

ANNEXE 1

Récapitulatif des équations caractérisant le modèle complet du système de serrage hydraulique

- régulateur: $I_s = K_r (X_c - X_m)$ pour $|I_s| < 20$ mA

- servovalve:
$$Q_s = \left(\frac{I(p)}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \times \frac{Q_n}{I_n} \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_n}} \right) - Q_f$$

avec: $\Delta P = P_a - P_s$ et $Q_n = Q_{nh}$ à la mise en pression du vérin,
 $\Delta P = P_s$ et $Q_n = Q_{nb}$ à la mise en dépression du vérin,
 où Q_{nh} correspond au débit nominal de la servo-valve en pression
 et Q_{nb} au débit en dépression.

- Compressibilité du tuyau: $Q_s - Q_v = \frac{\pi D^2 L}{4 \beta_c} p \cdot P_s$

Le coefficient β_c est déduit de β par la relation $\beta_c = \frac{\beta}{1 + H\beta}$

- Inertie et pertes de charge dans la tuyauterie:

$$P_s - P_v = \frac{4 \rho L}{\pi D^2} p \cdot Q_v + \frac{128 \mu K_c L}{\pi D^4} Q_v$$

ou encore: $P_s - P_v = \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \left(\frac{\rho R L}{S} \right) Q_v$ avec $R = \frac{32 \mu K_c}{\rho D^2}$

- vérin: $Q_v = \left[\frac{V_0 + AX}{\beta} \right] p \cdot P_v + K_p \cdot P_v + K_1 P_v + A p \cdot X$

- cage:

$$2AP_v - F_{lam} - 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} - P_{empi} - \mu_v P_v \text{sign}(X) - F_{cste} \text{sign}(X) - f \cdot X = Mp^2 \cdot X$$

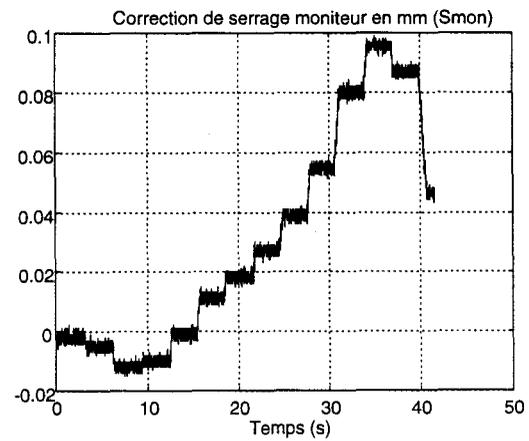
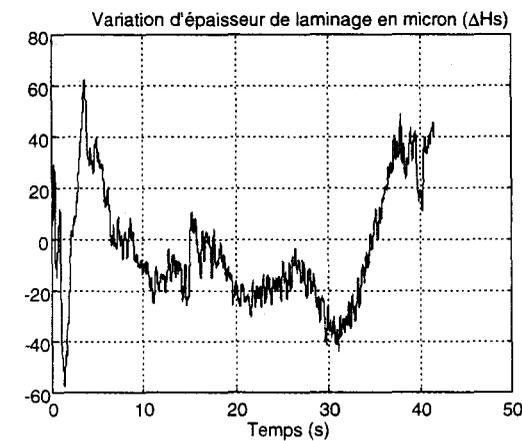
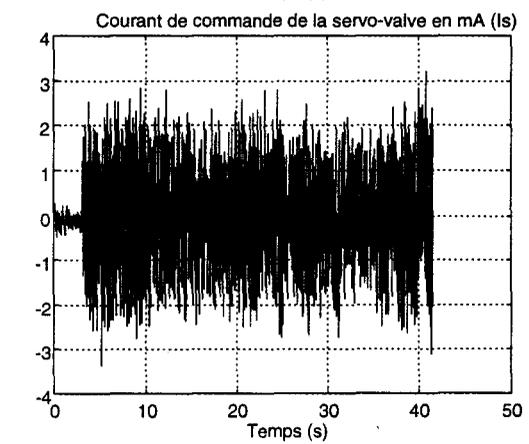
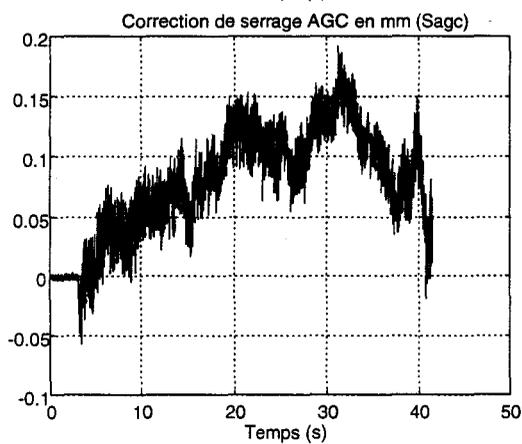
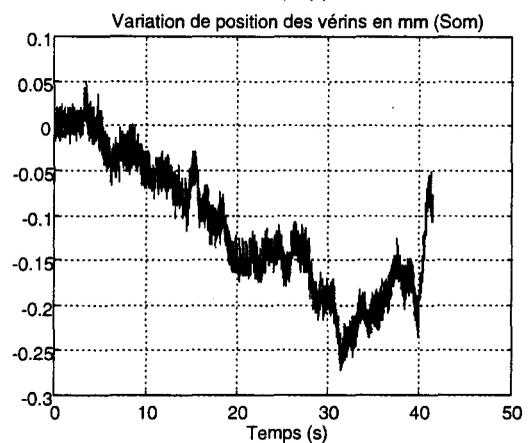
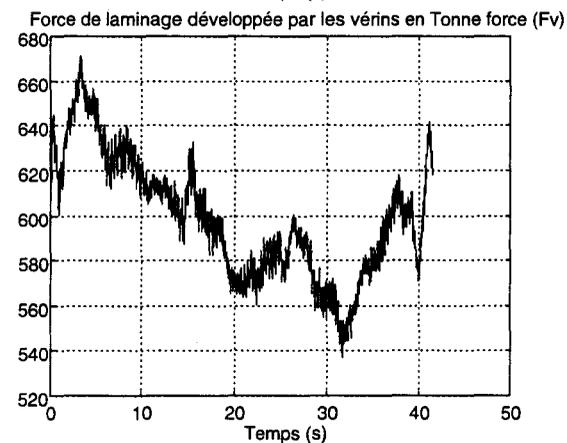
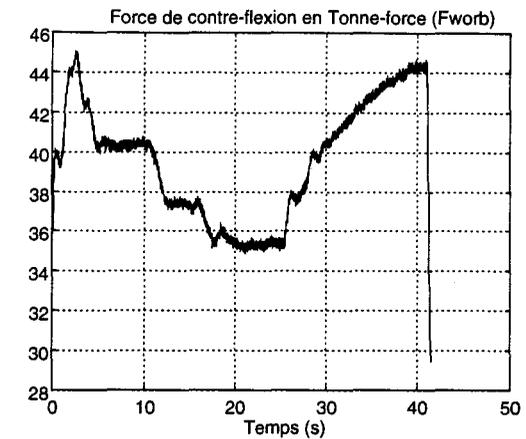
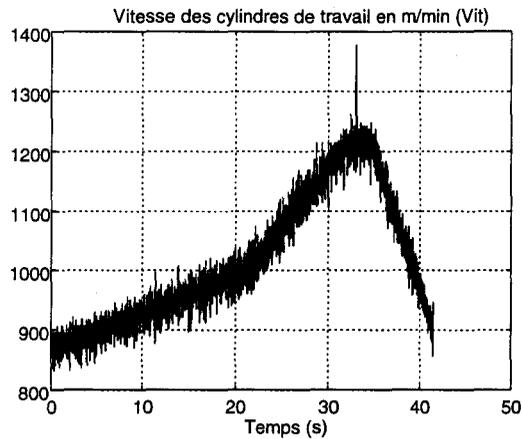
avec $F_{lam} = Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + \Delta H_s + S_0 + X \right)$

Liste des variables et paramètres du serrage hydraulique avec leur valeur nominale pour la bande n°4.

Symbole	Valeur nominale	Unité	Description	Symbole Matlab
μ	0,026	kg/ms	Coefficient de viscosité dynamique de l'huile	Mu
μ_v	0	Pa/s	Coefficient de frottement sec	Muv
A	0,785	m ²	Section du vérin	A
ΔP		Pa	Chute de pression instantanée engendrée par la servo-valve	DP
ΔP_n	$35 \cdot 10^5$	Pa	Chute de pression nominale engendrée par la servo-valve	DPn
f	$3 \cdot 10^6$	Ns/m	Coefficient de frottement visqueux	f
Fcste	0	N	Force de collage	Fcste
Flam		N	Force de laminage	Flam
Fv		N	Force développée par le vérin	Fv
Fworbc	$33 \cdot 10^4$	N	Force de contreflexion par côté	Fworbc
γ		m/s ²	Accélération du vérin	gam
H	$4,39 \cdot 10^{-11}$	Pa ⁻¹	Constante d'élasticité du vérin	H
In	$20 \cdot 10^{-3}$	A	Courant nominal d'excitation de la servo-valve	In
Is		A	Courant d'excitation de la servo-valve	Is
Ismax	$20 \cdot 10^{-3}$	A	Courant de saturation de la servo-valve	Ismax
K	0	N/m	Coefficient de déformation élastique du vérin	K
K1	0	m ³ /Pa.s	Coefficient de fuite du joint d'étanchéité	K1
Kc	25	S.U.	Coefficient de perte de charge de la tuyauterie	Kc
Kr	40	S.U.	Gain du régulateur	Kr
L	6	m	Longueur du tuyau d'alimentation	L
M	$8 \cdot 10^4$	kg	Masse totale sujette au mouvement de serrage	M
Mced	$4,03 \cdot 10^9$	N/m	Module de cédage de la cage	Mced
Mced2	$6,40 \cdot 10^9$	N/m	Module de cédage de la cage dépendant de la force de contre flexion Fworb	Mced2
Mced3	-87519	s ⁻¹	Module de cédage de la cage dépendant de la vitesse de rotation des cylindres Vit	Mced3
Pa	$160 \cdot 10^5$	Pa	Pression d'alimentation nominale délivrée à la servo-valve	Pa
Pempi	$80 \cdot 10^4$	N	Poids total du vérin	Pempi
Ps		Pa	Pression du fluide en sortie de la servo-valve	Ps
Pv		Pa	Pression vérin	Pv
Qf	0	m ³ /s	Débit de fuite de la servo-valve	Qf
Qnb	$3,78 \cdot 10^{-3}$	m ³ /s	Débit volumique nominal de la servo-valve en deserrage	Qnb
Qnh	$2,5 \cdot 10^{-3}$	m ³ /s	Débit volumique nominal de la servo-valve en serrage	Qnh
Qs		m ³ /s	Débit volumique délivré par la servo-valve	Qs
Qv		m ³ /s	Débit volumique délivré au vérin	Qv
ρ	$0,83 \cdot 10^3$	kg/m ³	Masse volumique de l'huile	rho
R	32,21	s ⁻¹	Coefficient de frottement équivalent dans la tuyauterie	R
S	$6,11 \cdot 10^{-4}$	m ²	Section interne de la tuyauterie	S
So	$1,11 \cdot 10^{-3}$	m	Coefficient de tarage (fixe Flam)	So
β	$1,56 \cdot 10^9$	Pa	Coefficient de compressibilité de l'huile	Beta
β_c	$1,46 \cdot 10^9$	Pa	Coefficient de compressibilité équivalent de l'huile dans les tuyaux	Betc
V		m/s	Vitesse de déplacement du vérin	V
Vit		m/s	Vitesse de rotation des cylindres	Vit
Vo	$11,77 \cdot 10^3$	m ³	Volume initial du vérin	Vo
ω_o	410	rad/s	Pulsation liée à la réponse de la servo-valve	wo
ξ	0.9	S.U.	Facteur d'amortissement lié à la réponse de la servo-valve	ksi
X		m	Déplacement du vérin	X
Xm		m	Mesure de la position	Xm
Xc		m	Consigne de position	Xc

Annexe 2

Allures temporelles des mesures pour la bande n°4



ANNEXE 3

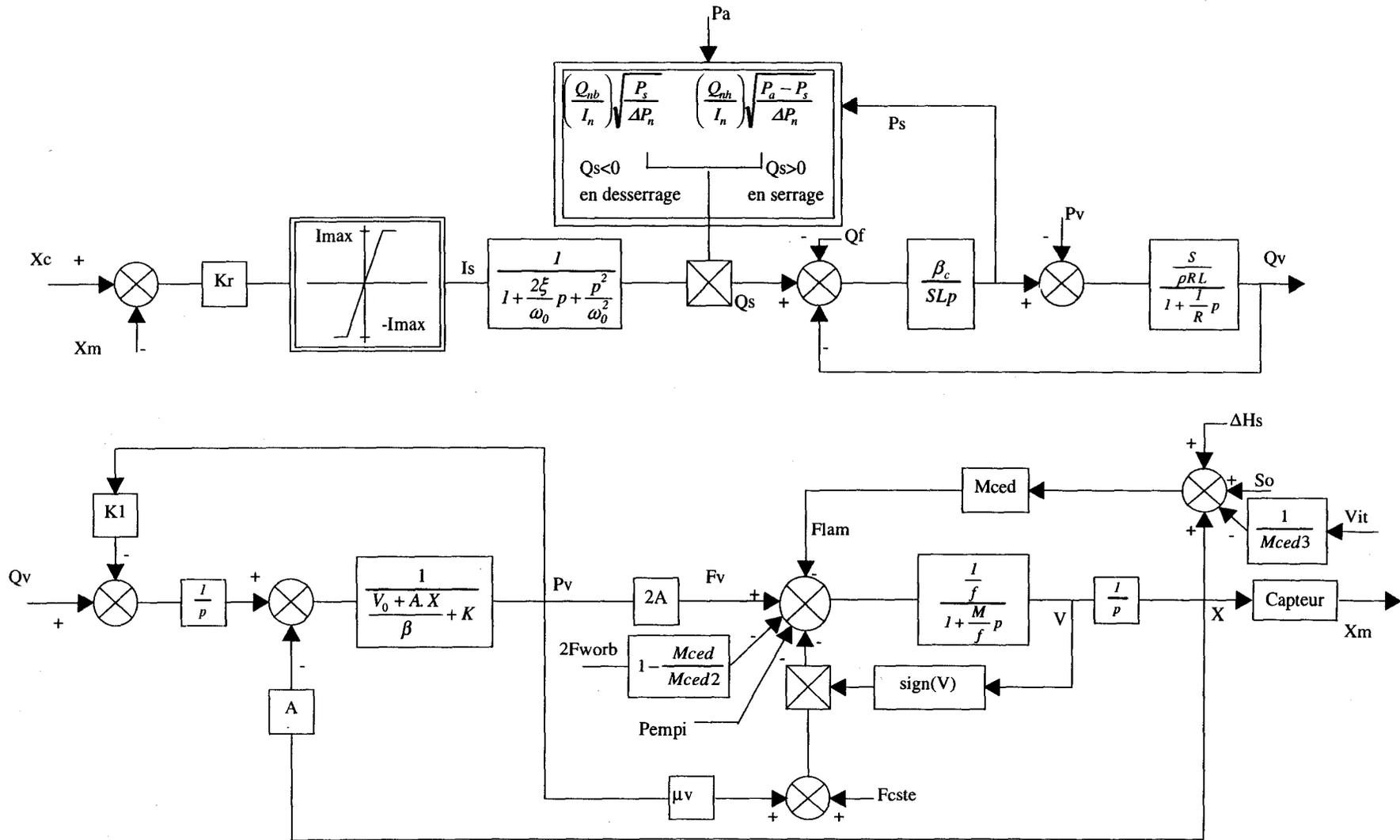
SIGNATURES DE DEFAILLANCES DES CAPTEURS ET PARAMETRES DES 23 RESIDUS

Grâce à l'instrumentation complémentaire (6 capteurs), on peut générer 23 relations de redondance analytique (RRA), dont les signatures binaires sont données ci-dessous:

	Qf	Kr	R	f	β	μv	Fc	ξ	ω_0	Qn _h	Qn _b	K ₁	Pa	Is	Qv	Ps	Pv	X
R 1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
R 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
R 3	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
R 4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R 5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
R 6	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
R 7	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1
R 8	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
R 9	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
R 10	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
R 11	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
R 12	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
R 13	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
R 14	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0
R 15	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0
R 16	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
R 17	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
R 18	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
R 19	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
R 20	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
R 21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
R 22	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1
R 23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1

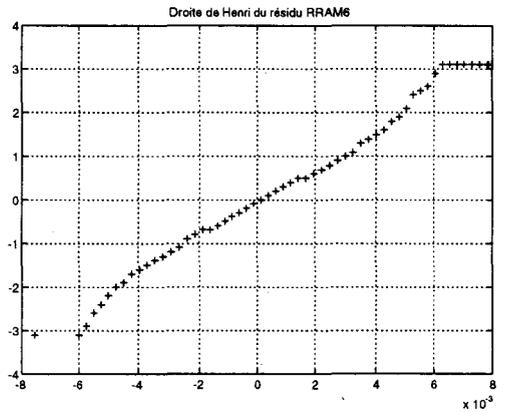
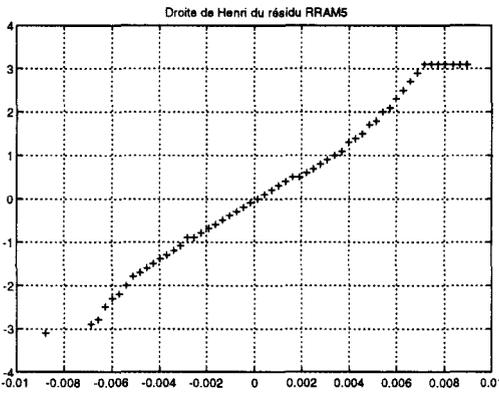
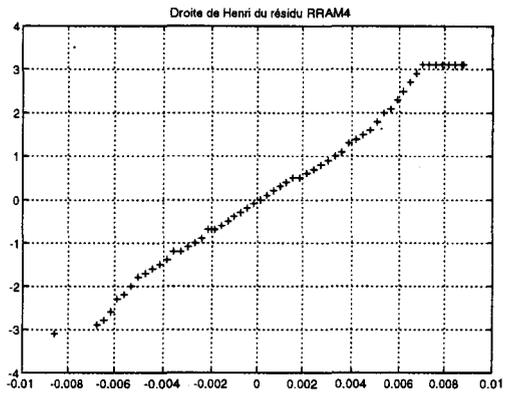
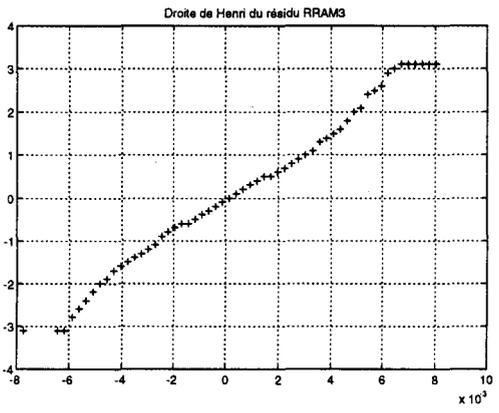
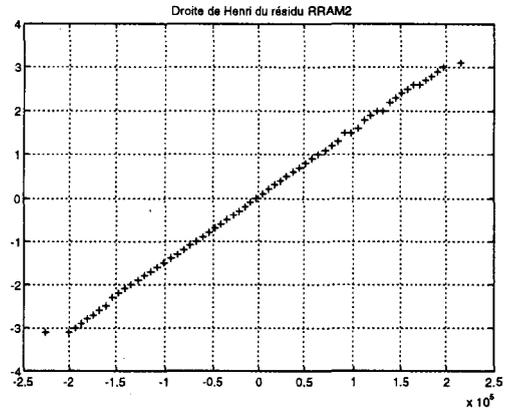
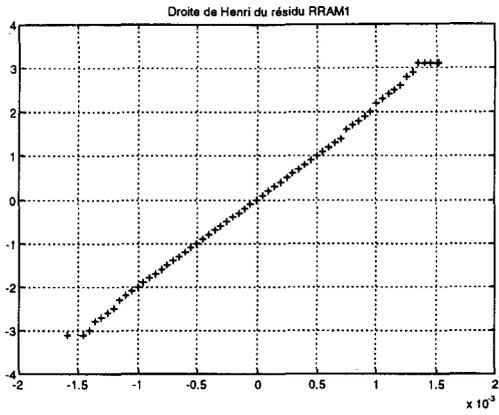
Structure des 23 résidus

ANNEXE 4 : Schéma-bloc du serrage hydraulique après évolution du modèle

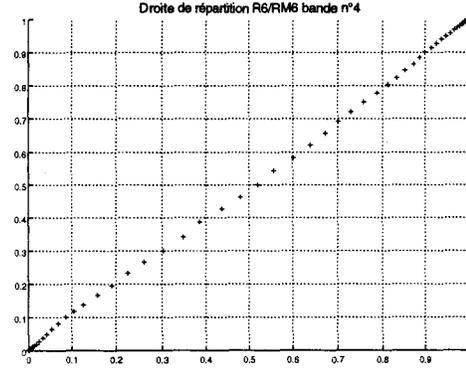
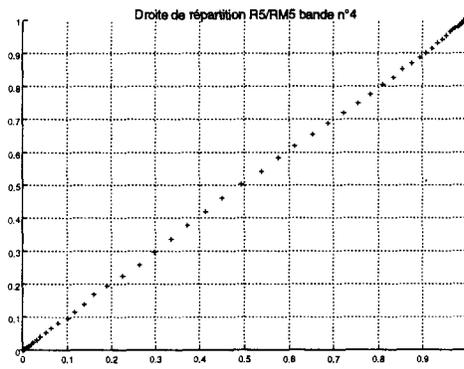
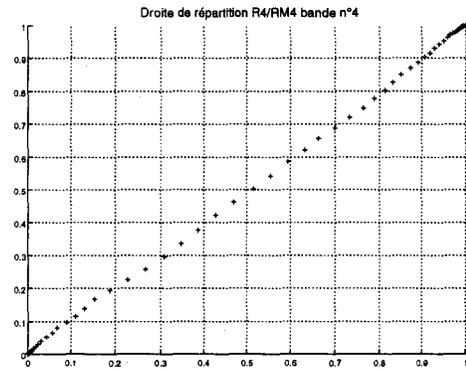
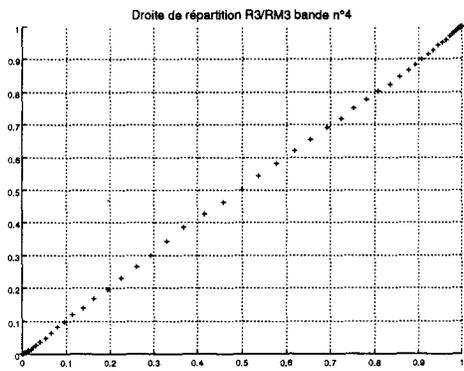
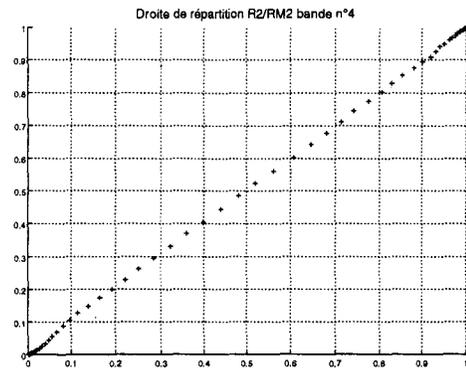
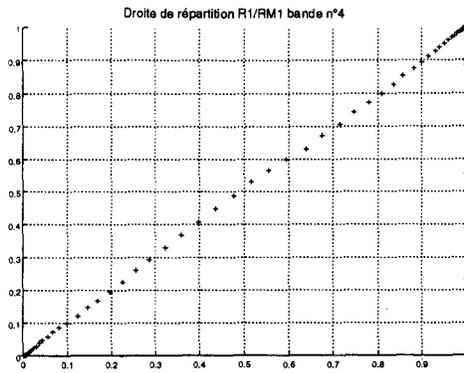


ANNEXE 5

Droites de Henry des résidus mesurés.



Droites de répartition entre résidus simulés et mesurés.



Droites de répartition entre résidus simulés et mesurés.

ANNEXE 6

EXPRESSION ANALYTIQUE DES 23 RELATIONS DE REDONDANCE DU SERRAGE HYDRAULIQUE

Tous les résidus sont présentés **sans saturation** sur I_s ($I_s < I_{s_{max}}$) et en **serrage** ($Q_n = Q_{n_b}$, $\Delta P = P_a - P_s$).

En **saturation** de la servo-valve, les résidus qui font intervenir l'expression $K_r (X_c - X_m)$ peuvent être obtenus en remplaçant ce terme par $I_{s_{max}}$.

En **desserrage**, il faut remplacer dans l'expression des résidus qui les font intervenir, ΔP par P_s , et Q_{n_b} par Q_{n_s} .

R1

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right) \left(\frac{\frac{SL}{\beta_c} p \cdot P_s + Q_v + Q_f}{\Delta P^{\frac{1}{2}}} \right)}{Q_{n_b}} = 0$$

R2

$$P_s - P_v - \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \left(\frac{\rho R L}{S} \right) Q_v = 0$$

R3

$$-K_r (X_c - X_m) + \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right) \left(\frac{\frac{SL}{\beta_c} p \cdot P_s + Q_v + Q_f}{\Delta P^{\frac{1}{2}}} \right)}{Q_{n_b}} = 0$$

R4

$$I_s - K_r (X_c - X_m) = 0$$

R5

$$Q_v - \left[\left[\frac{V_0 + AX}{\beta} \right] p \cdot P_v + K_p \cdot P_v + K_1 P_v + A p \cdot X \right] = 0$$

R6

$$2AP_v - Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) - 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} - P_{empi} - \mu_v P_v \text{sign}(p \cdot X) - F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) - fp \cdot X - Mp^2 \cdot X = 0$$

R7

$$\frac{\rho L}{S} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^2 Q_v + \left(\frac{\rho L}{S} K_1 Q_v - \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \left(P_s - \frac{\rho LR}{S} Q_v \right) - AX \right) p + Q_v - K_1 \left(P_s - \frac{\rho LR}{S} Q_v \right) = 0$$

R8

$$2A \left(P_s - \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL}{S} Q_v \right) - Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) - 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} - P_{empi} - \mu_v \text{sign}(p.X) \left(P_s - \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL}{S} Q_v \right) - F_{cste} \text{sign}(p.X) - fp.X - Mp^2.X = 0$$

R9

$$\left(- \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL}{S} \left(\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p + K_1 \right) - 1 \right) \frac{\left(Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p.X) + fp.X + Mp^2.X \right)}{2A - \mu_v \text{sign}(p.X)} + P_s - \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL}{S} ApX = 0$$

R10

$$P_s - P_v - \frac{\rho RL}{S} \left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \left[\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p P_v + K_1 P_v + ApX \right] = 0$$

R11

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Qn_b} \left\{ \frac{P_v \left[K_1 + \left(\frac{SL}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{\rho L^2}{\beta_c} K_1 R \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + K_1 \right) p^2 + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^3 \right] + X \left(Ap + \frac{\rho L^2}{\beta_c} Ap^2 (p + R) \right) + Q_f}{\left[P_v \left[\left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right) + \left(\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \frac{\rho LR}{S} + \frac{\rho L}{S} K_1 \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^2 \right] + \frac{\rho L}{S} X (ARp + Ap^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} = 0$$

R12

$$K_r (Xc - Xm) - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Qn_b} \frac{\frac{SL}{\beta_c} p P_s + \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p P_v + K_1 P_v + ApX + Q_f}{\sqrt{\Delta P}} = 0$$

R13

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Q n_b} \frac{\frac{SL}{\beta_c} p P_s + \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p P_v + K_1 P_v + ApX + Q_f}{\sqrt{\Delta P}} = 0$$

R14

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Q n_b} \frac{\frac{SL}{\beta_c} \left(\frac{\rho LR}{S} Q_v \left(\frac{1}{R} p + 1 \right) + P_v \right) p + Q_v + Q_f}{\sqrt{\frac{\rho LR}{S} Q_v \left(\frac{1}{R} p + 1 \right) + P_v}} = 0$$

R15

$$-K_r (X_c - X_m) + \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Q n_b} \frac{\frac{SL}{\beta_c} \left(\frac{\rho LR}{S} Q_v \left(\frac{1}{R} p + 1 \right) + P_v \right) p + Q_v + Q_f}{\sqrt{\frac{\rho LR}{S} Q_v \left(\frac{1}{R} p + 1 \right) + P_v}} = 0$$

R16

$$K_r (X_c - X_m) - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Q n_b} \left\{ \frac{P_v \left[K_1 + \left(\frac{SL}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{\rho L^2}{\beta_c} K_1 R \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + K_1 \right) p^2 + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^3 \right] + X \left(Ap + \frac{\rho L^2}{\beta_c} Ap^2 (p + R) \right) + Q_f}{\left[P_v \left[\left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right) + \left(\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \frac{\rho LR}{S} + \frac{\rho L}{S} K_1 \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^2 \right] + \frac{\rho L}{S} X (ARp + Ap^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} = 0$$

R17

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right)}{Q n_b} \frac{N_1}{D_1} = 0$$

avec

$$\begin{aligned}
 N_1 = & X \left\{ \frac{K_1 \cdot Mced}{D} + \left[\frac{Mced}{D} \left(\frac{SL + \rho L^2 K_1 R}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + A + K_1 \frac{f}{D} \right] p + \left[\frac{\rho L^2 RA}{\beta_c} + \frac{1}{D} \left(MK_1 + f \left(\frac{SL + \rho L^2 K_1 R}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + \frac{RMced \rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) \right) \right] p^2 \right. \\
 & + \left[\frac{\rho L^2 A}{\beta_c} + \frac{M}{D} \left(\frac{SL + \rho L^2 K_1 R}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + \frac{fR\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) + \frac{Mced \rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \right] p^3 + \left[\frac{MR\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) + \frac{f\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \right] p^4 \\
 & \left. + \left[\frac{M\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \right] p^5 \right\} \\
 & + Q_f + K_1 \left[Mced \left(S_0 - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) \right] \\
 & + \left[\left(\frac{SL}{\beta_c} + \frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{\rho L^2}{\beta_c} K_1 R \right) p + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(R \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + K_1 \right) p^2 + \frac{\rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^3 \right] \times \left[Mced \left(\Delta H_s - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) \right]
 \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}
 D_1^2 = & X_m \left\{ \frac{Mced}{D} \left(1 + \frac{K_1 R \rho L}{S} \right) + \left[\frac{\rho LAR}{S} + \frac{f}{D} \left(1 + \frac{K_1 R \rho L}{S} \right) + \frac{Mced}{D} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) \frac{\rho LR}{S} \right] p + \left[\frac{\rho LA}{S} + \frac{\rho L^2 RMced}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) + \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) \frac{f\rho LR}{DS} + \left(1 + \frac{K_1 R \rho L}{S} \right) \frac{Mced}{D} \right] p^2 \right. \\
 & + \left[\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) \frac{M\rho LR}{DS} + \frac{fR\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \right] p^3 + \left[\frac{MR\rho L^2}{D\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) \right] p^4 \left. \right\} \\
 & + \left(1 + \frac{\rho L K_1 R}{S} \right) \left[Mced \left(S_0 - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) \right] \\
 & + \frac{1}{D} \left[\left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K + \frac{K_1}{R} \right) \frac{\rho LR}{S} p + \frac{R\rho L^2}{\beta_c} \left(\frac{V_0 + AX}{\beta} + K \right) p^2 \right] \times \left[Mced \left(\Delta H_s - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) \right]
 \end{aligned}$$

où $D = 2A - \mu_v \text{sign}(pX_m)$

R18

$$K_r (X_c - X_m) - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln}{Qn} \left(1 + 2 \frac{\xi p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right) \left(\left(Kp + K_1 + \frac{V_0 + AX}{\beta} p \right) \left(\frac{Pempi + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2Fworb \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c sg(pX) + fpX + Mp^2 X}{2A - \mu_v sg(pX)} \right) + \frac{SL}{\beta_c} pP_s + ApX + Q_f \right) = 0$$

R19

$$I_s - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln}{Qn} \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right) \left(\left(Kp + K_1 + \frac{V_0 + AX}{\beta} p \right) \left(\frac{Pempi + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2Fworb \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c sg(pX) + fpX + Mp^2 X}{2A - \mu_v sg(pX)} \right) + \frac{SL}{\beta_c} pP_s + ApX + Q_f \right) = 0$$

R20

$$- \left(Kp + K_1 + \frac{V_0 + AX}{\beta} p \right) \left(\frac{Pempi + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2Fworb \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c sg(pX) + fpX + Mp^2 X}{2A - \mu_v sg(pX)} \right) - ApX + Q_v = 0$$

R21

$$K_r (X_c - X_m) - \sqrt{\Delta P n} \frac{\ln}{Qn} \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right) \frac{\left(\left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL^2}{\beta_c} p + 1 \right) Q_v + \frac{Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p.X) + fp.X + Mp^2.X}{2A - \mu_v \text{sign}(p.X)} \frac{SL}{\beta_c} p + Q_f}{\sqrt{\left(\left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho RL}{S} Q_v + \frac{Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p.X) + fp.X + Mp^2.X}{2A - \mu_v \text{sign}(p.X)} \right)}} = 0$$

R22

$$I_s - \sqrt{\Delta P n} \frac{\ln}{Q_n} \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2} \right) \frac{\left(\left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho R L^2}{\beta_c} p + 1 \right) Q_v + \frac{Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) + fp \cdot X + Mp^2 \cdot X}{2A - \mu \frac{\text{sign}(p \cdot X)}{v}} \frac{SL}{\beta_c} p + Q_f}{\sqrt{\left[\frac{1}{R} p + 1 \right] \frac{\rho R L}{S} Q_v + \frac{Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X) + fp \cdot X + Mp^2 \cdot X}{2A - \mu \frac{\text{sign}(p \cdot X)}{v}}}} = 0$$

R23

$$-K_r (X_c - X_m) + \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln}{Q_n b} \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2 \right) \frac{N_1}{D_1} = 0$$

Expressions Statiques des 23 résidus.

R1

$$I_s - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \cdot \frac{In}{Q_n} (Q_v + Q_f) = 0$$

R2

$$P_s - P_v - \left(\frac{\rho RL}{S} \right) Q_v = 0$$

R3

$$-K_r (X_c - X_m) + \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \cdot \frac{In}{Q_n} (Q_v + Q_f) = 0$$

R4

$$I_s - K_r (X_c - X_m) = 0$$

R5

$$Q_v - K_1 P_v = 0$$

R6

$$2AP_v - Mced \left(- \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + S_0 + \Delta H_s + X \right) - 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} - P_{empi} - \mu_v P_v \text{sign}(p.X) - F_{cste} \text{sign}(p.X) = 0$$

R7

$$Q_v - K_1 \left(P_s - \frac{\rho RL}{S} Q_v \right) = 0$$

R8

$$2A \left(P_s - \frac{\rho RL}{S} Q_v \right) - P_{empi} - Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) - 2F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) - \mu_v \text{sg}(pX) \left(P_s - \frac{\rho RL}{S} Q_v \right) - F_c \text{sg}(pX) = 0$$

R9

$$\left(K_1 \frac{\rho RL}{S} + 1 \right) \frac{\left(-P_{empi} - Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) - 2F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) - F_c \text{sg}(pX) \right)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} + P_s = 0$$

R10

$$P_s - \left(K_1 \frac{\rho RL}{S} + 1 \right) P_v = 0$$

R11

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \frac{K_1 P_v + Q_f}{Q_n}}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right)}} = 0$$

R12

$$K_r (X_c - X_m) - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln (K_1 P_v + Q_f)}{Q_n} = 0$$

R13

$$I_s - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln (K_1 P_v + Q_f)}{Q_n} = 0$$

R14

$$I_s - \sqrt{\Delta P n} \frac{\ln \frac{(Q_v + Q_f)}{\sqrt{\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v}}}{Q_n} = 0$$

R15

$$-K_r (X_c - X_m) + \sqrt{\Delta P n} \frac{\ln \frac{(Q_v + Q_f)}{\sqrt{\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v}}}{Q_n} = 0$$

R16

$$K_r (X_c - X_m) - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln \frac{K_1 P_v + Q_f}{Q_n}}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right)}} = 0$$

R17

$$I_s - \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot \ln}{Q_n b} \frac{Q_f + K_1 \left[\frac{Mced \left(X + S_0 - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \right]}{\sqrt{\frac{Mced \left(X + S_0 - \left(\frac{1}{Mced3} \right) Vit + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1 \right)}} = 0$$

R18

$$K_r (X_c - X_m) - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln}{Q_n} \left(K_1 \left[\frac{P_{empi} + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2 F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c \text{sg}(pX)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \right] + Q_f \right) = 0$$

R19

$$I_s - \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\ln}{Q_n} \left(K_1 \left[\frac{P_{empi} + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2 F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c \text{sg}(pX)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \right] + Q_f \right) = 0$$

R20

$$Q_v - K_1 \left[\frac{P_{empi} + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2 F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c \text{sg}(pX)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \right] = 0$$

R21

$$K_r (X_c - X_m) - \sqrt{\Delta P n} \frac{\ln}{Q_n} \frac{(Q_v + Q_f)}{\sqrt{\frac{\rho RL}{S} Q_v + \frac{P_{empi} + Mced \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{Vit}{Mced3} \right) + 2 F_{worb} \left(1 - \frac{Mced}{Mced2} \right) + F_c \text{sg}(pX)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)}}} = 0$$

R22

$$I_s - \sqrt{\Delta P n} \frac{In}{Qn} \frac{(Q_v + Q_f)}{\sqrt{\frac{\rho L R}{S} Q_v + \frac{P_{empi} + M_{ced} \left(X + \Delta H_s + S_0 - \frac{V_{it}}{M_{ced3}} \right) + 2 F_{worb} \left(1 - \frac{M_{ced}}{M_{ced2}} \right) + F_c \text{sg}(pX)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)}}}} = 0$$

R23

$$- K_r (X_c - X_m) + \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot In}{Qn_b} \frac{Q_f + K_1 \left[\frac{M_{ced} \left(X + S_0 - \left(\frac{1}{M_{ced3}} \right) V_{it} + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{M_{ced}}{M_{ced2}} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)} \right]}{\sqrt{\frac{M_{ced} \left(X + S_0 - \left(\frac{1}{M_{ced3}} \right) V_{it} + \Delta H_s \right) + 2 \left(1 - \frac{M_{ced}}{M_{ced2}} \right) F_{worb} + P_{empi} + F_{cste} \text{sign}(p \cdot X)}{2A - \mu_v \text{sg}(pX)}}}} \left(1 + \frac{\rho L R}{S} K_1 \right)$$

Expressions des sensibilités théoriques aux défaillances

	K_r	Q_f	R	f	β	μ_v	F_c	Q_n	ω_0	ξ	X	I_s	P_v	K_1	P_s	Q_v
R1		$\frac{\partial R_1}{\partial Q_f}$						$\frac{\partial R_1}{\partial Q_n}$				1			$\frac{\partial R_1}{\partial P_s}$	$\frac{\partial R_1}{\partial Q_v}$
R2			$-\frac{\rho L}{S} Q_v$										-1		1	$-\frac{\rho RL}{S}$
R3	$-(X_c - X_m)$	$-\frac{\partial R_1}{\partial Q_f}$						$-\frac{\partial R_1}{\partial Q_n}$							$-\frac{\partial R_1}{\partial P_s}$	$-\frac{\partial R_1}{\partial Q_v}$
R4	$-(X_c - X_m)$											1				
R5													$-K_1$	$-P_v$		1
R6						$-P_v \text{sg}(pX)$	$-\text{sg}(pX)$				$-M_{ced}$		$2A - \mu_v \text{sg}(pX)$			
R7			$K_1 \frac{\rho L}{S} Q_v$											$\frac{\partial R_7}{\partial K_1}$	$-K_1$	$1 + \frac{\rho RL}{S}$
R8			$\frac{\partial R_8}{\partial R}$			$\frac{\partial R_8}{\partial \mu_v}$	$-\text{sg}(pX)$				$-M_{ced}$				$2A - \mu_v \text{sg}(pX)$	$\frac{\partial R_8}{\partial Q_v}$
R9			$-\frac{K_1 \rho L}{S} P_{vc}$			$\frac{\partial R_9}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_9}{\partial F_c}$				$-M_{ced}$			$-\frac{\rho RL}{S} P_{vc}$	1	
R10			$-\frac{K_1 \rho L}{S} P_v$										$-1 - \frac{K_1 \rho LR}{S}$	$-\frac{\rho LR}{S} P_v$	1	
R11		$\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial R}$					$\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_n}$				1	$\frac{\partial R_{16}}{\partial P_v}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial K_1}$		
R12	$(X_c - X_m)$	$\frac{\partial R_1}{\partial Q_f}$						$\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n}$					$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_v}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial K_1}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_s}$	
R13		$\frac{\partial R_1}{\partial Q_f}$						$\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n}$				1	$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_v}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial K_1}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_s}$	

	K_f	Q_f	R	f	β	μ_v	F_c	Q_n	ω_0	ξ	X	I_s	P_v	K_1	P_s	Q_v
R14		$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial R}$					$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_n}$				1	$\frac{\partial R_{14}}{\partial P_v}$			$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_v}$
R15	$-(X_c - X_m)$	$-\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_f}$	$-\frac{\partial R_{14}}{\partial R}$					$-\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_n}$					$-\frac{\partial R_{14}}{\partial P_v}$			$-\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_v}$
R16	$(X_c - X_m)$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial R}$					$\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_n}$					$\frac{\partial R_{16}}{\partial P_v}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial K_1}$		
R17		$\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{17}}{\partial R}$			$\frac{\partial R_{17}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{17}}{\partial F_c}$	$\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_n}$?	1		$\frac{\partial R_{17}}{\partial K_1}$		
R18	$(X_c - X_m)$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial Q_f}$				$\frac{\partial R_{18}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial F_c}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial Q_n}$?			$\frac{\partial R_{18}}{\partial K_1}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial P_s}$	
R19		$\frac{\partial R_{18}}{\partial Q_f}$				$\frac{\partial R_{18}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial F_c}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial Q_n}$?	1		$\frac{\partial R_{18}}{\partial K_1}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial P_s}$	
R20						$\frac{\partial R_{20}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{20}}{\partial F_c}$?			$-P_{v_c}$		1
R21	$(X_c - X_m)$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial R}$			$\frac{\partial R_{21}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial F_c}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n}$?					$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_v}$
R22		$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_f}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial R}$			$\frac{\partial R_{21}}{\partial \mu_v}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial F_c}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n}$?	1				$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_v}$
R23	$-(X_c - X_m)$	$-\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_f}$	$-\frac{\partial R_{17}}{\partial R}$			$-\frac{\partial R_{17}}{\partial \mu_v}$	$-\frac{\partial R_{17}}{\partial F_c}$	$-\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_n}$?			$-\frac{\partial R_{17}}{\partial K_1}$		

Q_f	$\frac{\partial R_1}{\partial Q_f} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{In}{Q_n}$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_f} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v}} \frac{In}{Q_n}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_f} = \frac{-\sqrt{\Delta P n} \cdot In}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Q_n}$
	$\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_f} = \frac{-\sqrt{\Delta P n} \cdot In}{\sqrt{P_{vc} \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Q_n}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_f} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc}}} \frac{In}{Q_n}$	
R	$\frac{\partial R_8}{\partial R} = -\frac{\rho L}{S} Q_v (2A - \mu_v sg(pX))$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial R} = \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot Q_v (Q_v + Q_f) \cdot In \cdot \rho L}{\left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v\right)^{\frac{3}{2}} Q_n \cdot 2S}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial R} = \frac{(K_1 P_v + Q_f) \sqrt{\Delta P n} \cdot In \cdot \frac{\rho L}{S} K_1}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)}^{\frac{3}{2}} \cdot Q_n}$
	$\frac{\partial R_{17}}{\partial R} = \frac{(K_1 P_{vc} + Q_f) \sqrt{\Delta P n} \cdot In \cdot \frac{\rho L}{S} K_1}{\sqrt{P_{vc} \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)}^{\frac{3}{2}} \cdot Q_n}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial R} = \frac{\sqrt{\Delta P n} \cdot Q_v (Q_v + Q_f) \cdot In \cdot \rho L}{\left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc}\right)^{\frac{3}{2}} Q_n \cdot 2S}$	
μ_v	$\frac{\partial R_8}{\partial \mu_v} = \left(P_s - \frac{\rho RL}{S} Q_v\right) sg(p \cdot X)$	$\frac{\partial R_9}{\partial \mu_v} = -\left(K_1 \frac{\rho RL}{S} + 1\right) \frac{P_{vc} sg(p \cdot X)}{(2A - \mu_v sg(p \cdot X))}$	$\frac{\partial R_{17}}{\partial \mu_v} = \frac{\frac{1}{2} \left(-K_1 P_{vc} + Q_f\right) \sqrt{\Delta P n} \cdot In \cdot sg(pX)}{\left(2 \cdot A - \mu_v sg(pX)\right) \sqrt{P_{vc} \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Q_n}$
	$\frac{\partial R_{18}}{\partial \mu_v} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{In}{Q_n} K_1 \frac{P_{vc} sg(p \cdot X)}{(2A - \mu_v sg(p \cdot X))}$	$\frac{\partial R_{20}}{\partial \mu_v} = K_1 \frac{P_{vc} sg(p \cdot X)}{(2A - \mu_v sg(p \cdot X))}$	$\frac{\partial R_{21}}{\partial \mu_v} = \frac{In \cdot \sqrt{\Delta P n} \cdot P_{vc} (Q_v + Q_f) \cdot sg(pX)}{2Q_n \left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc}\right)^{\frac{3}{2}} (2A - \mu_v sg(pX))}$

F_c	$\frac{\partial R_9}{\partial F_c} = \frac{-\left(K_1 \frac{\rho RL}{S} + 1\right) P_{vc} \operatorname{sg}(pX)}{2A - \mu_v \operatorname{sg}(pX)}$ $\frac{\partial R_{20}}{\partial F_c} = \frac{-K_1 \operatorname{sg}(pX)}{2A - \mu_v \operatorname{sg}(pX)}$	$\frac{\partial R_{17}}{\partial F_c} = \frac{\frac{1}{2} \left(-K_1 P_{vc} + Qf\right) \sqrt{\Delta P n} \operatorname{In} \operatorname{sg}(pX)}{\left(2A - \mu_v \operatorname{sg}(pX)\right) \left(P_{vc}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Qn}$ $\frac{\partial R_{21}}{\partial F_c} = \frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} \cdot (Q_v + Q_f) \operatorname{sg}(pX)}{Qn \left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc}\right)^{\frac{3}{2}} 2A - \mu_v \operatorname{sg}(pX)}$	$\frac{\partial R_{18}}{\partial F_c} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn} K_1 \frac{\operatorname{sg}(p \cdot X)}{(2A - \mu_v \operatorname{sg}(p \cdot X))}$
Qn	$\frac{\partial R_1}{\partial Q_n} = \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn^2} (Q_v + Q_f)$ $\frac{\partial R_{16}}{\partial Q_n} = \frac{(K_1 P_v + Qf) \sqrt{\Delta P n} \operatorname{In}}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Qn^2}$ $\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n} = \frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} \cdot (Q_v + Q_f)}{Qn^2 \sqrt{\left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc}\right)}}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n} = \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn^2} (K_1 P_v + Qf)$ $\frac{\partial R_{17}}{\partial Q_n} = \frac{(K_1 P_v + Qf) \sqrt{\Delta P n} \operatorname{In}}{\sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Qn^2}$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_n} = \frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} \cdot (Q_v + Q_f)}{Qn^2 \sqrt{\left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v\right)}}$ $\frac{\partial R_{18}}{\partial Q_n} = \sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn^2} (K_1 P_{vc} + Qf)$
P_v	$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_v} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn} K_1$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial P_v} = -\frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} (Q_v + Q_f)}{2Qn \left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial P_v} = \frac{1}{2} \frac{(-K_1 P_v + Qf) \sqrt{\Delta P n} \operatorname{In}}{\sqrt{P_v^2 \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)} \cdot Qn}$
K_1	$\frac{\partial R_7}{\partial K_1} = \frac{\rho RL}{S} Q_v - P_s$ $\frac{\partial R_{17}}{\partial K_1} = \frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} \left(-K_1 P_{vc} + Qf\right) \cdot \frac{\rho RL}{S}}{2Qn \sqrt{P_{vc} \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)^{\frac{3}{2}}}}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial K_1} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn} P_v$ $\frac{\partial R_{18}}{\partial K_1} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{\operatorname{In}}{Qn} P_{vc}$	$\frac{\partial R_{16}}{\partial K_1} = \frac{\operatorname{In} \sqrt{\Delta P n} \left(-K_1 P_v + Qf\right) \cdot \frac{\rho RL}{S}}{2Qn \sqrt{P_v \left(1 + \frac{\rho LR}{S} K_1\right)^{\frac{3}{2}}}}$

P_s	$\frac{\partial R_1}{\partial P_s} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{P_s^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (Q_v + Q_f) \text{ desserrage}$ $\frac{\partial R_{12}}{\partial P_s} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{(P_a - P_s)^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (K_1 P_v + Q_f) \text{ serrage}$	$\frac{\partial R_1}{\partial P_s} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{(P_a - P_s)^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (Q_v + Q_f) \text{ serrage}$ $\frac{\partial R_{18}}{\partial P_s} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{P_s^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (K_1 P_{vc} + Q_f) \text{ desserrage}$	$\frac{\partial R_{12}}{\partial P_s} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{P_s^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (K_1 P_v + Q_f) \text{ desserrage}$ $\frac{\partial R_{18}}{\partial P_s} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\Delta P n}}{(P_a - P_s)^{\frac{3}{2}}} \frac{In}{Qn} (K_1 P_{vc} + Q_f) \text{ serrage}$
Q_v	$\frac{\partial R_1}{\partial Q_v} = -\sqrt{\frac{\Delta P n}{\Delta P}} \frac{In}{Qn}$ $\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_v} = -\frac{In \sqrt{\Delta P n} \cdot \frac{\rho RL}{S} (Q_v - Q_f) + P_{vc}}{2Qn \left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_{vc} \right)^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{\partial R_8}{\partial Q_v} = -\frac{\rho RL}{S} (2A - \mu_v \text{sg}(pX))$	$\frac{\partial R_{14}}{\partial Q_v} = -\frac{In \sqrt{\Delta P n} \cdot \frac{\rho RL}{S} (Q_v - Q_f) + P_v}{2Qn \left(\frac{\rho RL}{S} Q_v + P_v \right)^{\frac{3}{2}}}$

Tableau des sensibilités :

- 1- Structurelles
- 2- Statiques
- 3- Statiques déduites des sensibilités au point de fonctionnement
- 4- Statiques déduites des sensibilités au point de fonctionnement compte tenu des Non-linéarités.

	K_r	Q_f	R	f	β	μ_v	F_c	Q_n	ω_0	ξ	X	I_s	P_v	K_1	P_s	Q_v
R1		1111			1			11x1	1	1		1111			11x1	1111
R2			11xx										1111		11x1	1111
R3	11xx	1111			1			11x1	1	1					11x1	1111
R4	11xx											1111				
R5					1						1		1100	1111		1111
R6				1		1111	1111				1111		1111			
R7			1100		1						1			1111	1110	1111
R8			11xx	1		1111	1111				1111				1111	1111
R9			1100	1	1	1111	1111				1111			1111	1111	
R10			1100		1						1		1111	1111	1111	
R11		1111	1100		1			1101	1	1	1	1111	1100	1111		
R12	11xx	1111			1			1101	1	1	1		1100	1111	1101	
R13		1111			1			1101	1	1	1	1111	1100	1111	1101	
R14		1111	1111		1			11x1	1	1		1111	11xx			1111
R15	11xx	1111	1111		1			11x1	1	1			11xx			1111
R16	11xx	1111	1100		1			1101	1	1	1		1100	1111		
R17		1111	1100	1	1	1101	1101	1101	1	1	1	1111		1111		
R18	11xx	1111		1	1	1101	1101	1101	1	1	1			1111	1101	
R19		1111		1	1	1101	1101	1101	1	1	1	1111		1111	1101	
R20				1	1	1101	1101				1			1111		1111
R21	11xx	1111	1111	1	1	11xx	11xx	11x1	1	1	1					1111
R22		1111	1111	1	1	11xx	11xx	11x1	1	1	1	1111				1111
R23	11xx	1111	1100	1	1	1101	1101	1101	1	1	1			1111		

ANNEXE 7

Comparaison des sensibilités théoriques (avec non linéarités) et expérimentales par Page-Hinkley **pour les paramètres du cahier des charges**

	K_r	Q_f	R	f	β	μ_v	F_c	Q_{nb}	Q_{nh}	ω_0	ξ	X	I_s	P_v	K_1	P_s	Q_v
R1		11			01			11	11	01	01		11			11	11
R2			x0											11		11	11
R3	x1	11			00			11	11	01	01					11	11
R4	x1												11				
R5					00							00		00	11		11
R6				00		10	10					11		11			
R7			00		00							00			11	00	11
R8			x0	00		10	10					11				11	11
R9			00	00	00	10	10					11			11	11	
R10			00		00							00		11	11	11	
R11		11	00		00			11	11	00	00	00	11	00	11		
R12	x0	11			01-			11+	11-	00	00	00		00	11	11	
R13		11			01-			11	11	00	00	00	11	00	11	11	
R14		11	11		01+			11	11	01	01		11	x0			11
R15	x1	11	11		01			11	11	01	01			x1			11
R16	x0	11	00		01-			11+	11-	00	00	00		01	11		
R17		11	00	00	00	10	10	11	11	00	00	00	11		11		
R18	x0	11		00	01-	10	10	11+	11-	00	00	00			11	11	
R19		11		00	01-	10	10	11	11	00	00	00	11		11	11	
R20				00	00	10	10					00			11		11
R21	x1	11	11	01+	01	x1	x1	11	11	01	01	00					11
R22		11	11	01+	01+	x1	x1	11	11	01	01	00	11				11
R23	x0	11	00	00	01-	10	10	11+	11-	00	00	00			11		

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Nominal	Moyenne	4,32E-05	-2,30E+02	-4,96E-05	-6,47E-06	-2,42E-07	-4,45E+02	-4,25E-07	-8,06E+02	-3,31E+02	-4,33E+01	9,60E-05
	Ecart-type	1,31E-03	3,78E+05	1,17E-03	5,61E-04	4,29E-04	6,42E+04	4,23E-04	6,01E+05	4,54E+05	4,54E+05	1,78E-03
Qi												
	Variation de moyenne avec bruit	4,19E-04	1,55E+01	-4,19E-04	4,48E-11	-1,43E-08	-2,47E-02	-1,58E-08	2,43E+01	2,04E+01	2,04E+01	4,13E-04
	Variation de moyenne sans bruit	4,14E-04	1,88E+01	-4,14E-04	-1,02E-12	-1,33E-08	2,62E-01	-9,09E-09	2,98E+01	2,79E+01	2,78E+01	4,09E-04
	Var moyenne théorique avec bruit	4,12E-04	-	-4,12E-04	-	-	-	-	-	-	-	4,06E-04
	Var moyenne théorique sans bruit	4,04E-04	-	-4,04E-04	-	-	-	-	-	-	-	3,98E-04
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	14,80	0,00	-16,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,72
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	14,65	0,00	-16,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,63
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	14,57	-	-16,36	-	-	-	-	-	-	-	10,54
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	14,29	-	-16,04	-	-	-	-	-	-	-	10,35
Kr -												
	Variation de moyenne avec bruit	-4,83E-06	2,51E+01	8,08E-06	3,25E-06	-1,53E-08	4,66E-01	-1,34E-09	4,00E+01	1,07E+01	1,04E+01	3,18E-06
	Variation de moyenne sans bruit	-3,95E-06	2,90E+01	6,64E-06	2,69E-06	-1,05E-08	6,43E-01	-3,00E-09	4,62E+01	9,26E+00	8,85E+00	9,01E-07
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	3,25E-06	3,25E-06	-	-	-	-	-	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	2,69E-06	2,69E-06	-	-	-	-	-	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,17	0,00	0,32	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,14	0,00	0,26	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	0,13	0,27	-	-	-	-	-	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	0,11	0,22	-	-	-	-	-	-	-
Kr +												
	Variation de moyenne avec bruit	4,95E-06	-2,77E+01	-8,42E-06	-3,48E-06	1,62E-08	-5,21E-01	2,27E-09	-4,40E+01	-1,24E+01	-1,21E+01	-3,26E-06
	Variation de moyenne sans bruit	4,08E-06	-3,00E+01	-6,95E-06	-2,87E-06	1,09E-08	-6,87E-01	3,41E-09	-4,78E+01	-9,74E+00	-9,30E+00	-1,00E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-3,48E-06	-3,48E-06	-	-	-	-	-	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-2,87E-06	-2,87E-06	-	-	-	-	-	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,18	0,00	-0,33	-0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,08
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,14	0,00	-0,28	-0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-0,14	-0,29	-	-	-	-	-	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-0,11	-0,24	-	-	-	-	-	-	-
R -												
	Variation de moyenne avec bruit	1,22E-05	-1,33E+02	-1,22E-05	6,35E-11	-1,07E-08	-1,30E-01	1,09E-08	-2,09E+02	-1,32E+02	-1,32E+02	-5,51E-07
	Variation de moyenne sans bruit	9,06E-06	-1,21E+02	-9,06E-06	-8,34E-12	-1,59E-09	-1,61E-01	1,10E-08	-1,90E+02	-1,18E+02	-1,17E+02	1,78E-08
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-1,31E+02	-	-	-	-	0,00E+00	-2,06E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-1,21E+02	-	-	-	-	0,00E+00	-1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,43	-0,02	-0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,32	-0,01	-0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-0,02	-	-	-	-	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-0,01	-	-	-	-	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
Nominal	9,63E-05	8,98E-05	4,24E-05	-4,88E-05	1,02E-04	9,94E-05	9,88E-05	9,23E-05	-2,75E-07	4,88E-05	4,23E-05	-1,06E-04
	1,84E-03	1,92E-03	1,28E-03	1,14E-03	1,70E-03	1,82E-03	1,88E-03	1,94E-03	4,35E-04	1,14E-03	1,29E-03	1,75E-03
Qf												
	4,12E-04	4,12E-04	4,18E-04	-4,18E-04	4,13E-04	4,13E-04	4,12E-04	4,12E-04	-1,43E-08	4,18E-04	4,18E-04	-4,13E-04
	4,09E-04	4,09E-04	4,14E-04	-4,14E-04	4,09E-04	4,09E-04	4,09E-04	4,09E-04	-1,33E-08	4,14E-04	4,14E-04	-4,09E-04
	4,12E-04	4,12E-04	4,06E-04	-4,06E-04	-4,06E-04	4,05E-04	4,12E-04	4,12E-04	-	4,05E-04	4,05E-04	-4,05E-04
	4,04E-04	4,04E-04	3,99E-04	-4,04E-04	-3,98E-04	3,98E-04	4,04E-04	4,04E-04	-	3,99E-04	3,99E-04	-3,98E-04
	10,38	9,98	15,11	-17,02	11,23	10,50	10,19	9,83	0,00	16,99	15,10	-10,94
	10,30	9,90	14,97	-16,86	11,13	10,41	10,11	9,76	0,00	16,84	14,96	-10,85
	10,38	9,98	14,66	-16,52	-11,04	10,30	10,19	9,83	-	16,46	14,63	-10,73
	10,18	9,78	14,41	-16,44	-10,84	10,14	9,99	9,64	-	16,20	14,40	-10,56
Kr -												
	4,62E-07	3,71E-06	-4,72E-06	7,97E-06	-7,17E-08	3,22E-06	4,71E-07	3,72E-06	-1,53E-08	-7,94E-06	-4,69E-06	2,44E-08
	-1,74E-06	9,46E-07	-3,99E-06	6,68E-06	-1,79E-06	8,98E-07	-1,74E-06	9,44E-07	-1,05E-08	-6,68E-06	-3,99E-06	1,79E-06
	-3,25E-06	-	-	3,25E-06	-3,25E-06	-	-3,25E-06	-	-	-3,25E-06	-	3,25E-06
	-2,69E-06	-	-	2,69E-06	-2,69E-06	-	-2,69E-06	-	-	-2,69E-06	-	2,69E-06
	0,01	0,09	-0,17	0,32	0,00	0,08	0,01	0,09	0,00	-0,32	-0,17	0,00
	-0,04	0,02	-0,14	0,27	-0,05	0,02	-0,04	0,02	0,00	-0,27	-0,14	0,05
	-0,08	-	-	0,13	-0,09	-	-0,08	-	-	-0,13	-	0,09
	-0,07	-	-	0,11	-0,07	-	-0,07	-	-	-0,11	-	0,07
Kr +												
	-2,78E-07	-3,75E-06	4,78E-06	-8,25E-06	2,14E-07	-3,29E-06	-2,78E-07	-3,75E-06	1,62E-08	8,23E-06	4,75E-06	-1,83E-07
	1,83E-06	-1,04E-06	4,09E-06	-6,96E-06	1,86E-06	-1,00E-06	1,83E-06	-1,04E-06	1,08E-08	6,96E-06	4,09E-06	-1,87E-06
	3,48E-06	-	-	-3,48E-06	3,48E-06	-	3,48E-06	-	-	3,48E-06	-	-3,48E-06
	2,87E-06	-	-	-2,87E-06	2,87E-06	-	2,87E-06	-	-	2,87E-06	-	-2,87E-06
	-0,01	-0,09	0,17	-0,34	0,01	-0,08	-0,01	-0,09	0,00	0,33	0,17	0,00
	0,05	-0,03	0,15	-0,28	0,05	-0,03	0,05	-0,02	0,00	0,28	0,15	-0,05
	0,09	-	-	-0,14	0,09	-	0,09	-	-	0,14	-	-0,09
	0,07	-	-	-0,12	0,08	-	0,07	-	-	0,12	-	-0,08
R -												
	-4,73E-07	-4,73E-07	1,13E-05	-1,13E-05	-5,51E-07	-5,48E-07	-4,72E-07	-4,72E-07	-1,09E-08	1,12E-05	1,12E-05	5,48E-07
	-1,07E-07	-1,07E-07	8,33E-06	-8,33E-06	1,78E-08	2,26E-08	-1,08E-07	-1,08E-07	-1,72E-09	8,32E-06	8,32E-06	-2,26E-08
	-	-	2,07E-06	-2,07E-06	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	2,05E-06	2,05E-06	0,00E+00
	-	-	1,38E-06	-1,38E-06	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	1,38E-06	1,38E-06	0,00E+00
	-0,01	-0,01	0,41	-0,46	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,46	0,41	0,01
	0,00	0,00	0,30	-0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,30	0,00
	-	-	0,07	-0,08	0,00	0,00	-	-	-	0,08	0,07	0,00
	-	-	0,05	-0,06	0,00	0,00	-	-	-	0,06	0,05	0,00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Nominal	Moyenne	4,32E-05	-2,30E+02	-4,96E-05	-6,47E-06	-2,42E-07	-4,45E+02	-4,25E-07	-8,06E+02	-3,31E+02	-4,33E+01	9,60E-05
	Ecart-type	1,31E-03	3,78E+05	1,17E-03	5,61E-04	4,29E-04	6,42E+04	4,23E-04	6,01E+05	4,54E+05	4,54E+05	1,78E-03
R +												
	Variation de moyenne avec bruit	-8,11E-06	1,30E+02	8,11E-06	3,35E-11	6,68E-09	1,96E-01	-5,60E-09	2,04E+02	1,27E+02	1,27E+02	4,10E-07
	Variation de moyenne sans bruit	-6,24E-06	1,22E+02	6,24E-06	1,29E-11	2,30E-09	2,41E-01	-8,01E-09	1,92E+02	1,17E+02	1,17E+02	-2,34E-08
	Var moyenne théorique avec bruit	-	1,28E+02	-	-	-	-	0,00E+00	2,01E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	-	1,21E+02	-	-	-	-	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,29	0,02	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,22	0,01	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	0,02	-	-	-	-	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	0,01	-	-	-	-	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
f -												
	Variation de moyenne avec bruit	2,46E-07	7,64E+00	-2,46E-07	6,29E-11	6,90E-09	-1,89E+01	4,17E-08	-6,92E+00	2,63E+01	4,94E+00	1,77E-07
	Variation de moyenne sans bruit	1,48E-07	-3,33E+01	-1,48E-07	-3,96E-11	1,14E-09	4,59E+01	-1,58E-08	-6,39E+00	-2,34E+01	-3,46E+01	1,26E-08
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
f +												
	Variation de moyenne avec bruit	-7,56E-06	3,91E+00	7,56E-06	4,00E-11	7,30E-09	1,65E+02	-9,23E-09	1,72E+02	1,08E+02	8,35E-01	6,68E-07
	Variation de moyenne sans bruit	-5,80E-06	3,51E+00	5,80E-06	1,04E-11	2,95E-09	1,54E+02	-7,48E-09	1,60E+02	1,02E+02	-1,36E+00	1,63E-07
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,27	0,00	0,30	0,00	0,00	0,12	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,21	0,00	0,23	0,00	0,00	0,11	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-	-	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-
β -												
	Variation de moyenne avec bruit	8,83E-07	1,94E+03	-8,83E-07	8,91E-11	4,97E-07	-3,14E+03	4,46E-07	-9,49E+01	1,40E+02	2,01E+03	4,17E-06
	Variation de moyenne sans bruit	4,56E-06	1,89E+03	-4,56E-06	-8,75E-12	4,85E-07	-3,13E+03	4,33E-07	-1,70E+02	8,23E+01	1,95E+03	1,46E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,03	0,24	-0,04	0,00	0,05	-2,27	0,05	-0,01	0,01	0,20	0,11
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,16	0,23	-0,18	0,00	0,05	-2,27	0,05	-0,01	0,01	0,20	0,04
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

Nominal	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
	9,63E-05	8,98E-05	4,24E-05	-4,88E-05	1,02E-04	9,94E-05	9,88E-05	9,23E-05	-2,75E-07	4,88E-05	4,23E-05	-1,06E-04
	1,84E-03	1,92E-03	1,28E-03	1,14E-03	1,70E-03	1,82E-03	1,88E-03	1,94E-03	4,35E-04	1,14E-03	1,29E-03	1,75E-03
R+												
	5,64E-07	5,64E-07	-8,07E-06	8,07E-06	4,10E-07	4,11E-07	5,70E-07	5,70E-07	6,85E-09	-8,03E-06	-8,03E-06	-4,11E-07
	1,18E-07	1,18E-07	-6,13E-06	6,13E-06	-2,34E-08	-2,70E-08	1,20E-07	1,20E-07	2,43E-09	-6,13E-06	-6,13E-06	2,70E-08
	-	-	-1,37E-06	1,37E-06	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-1,36E-06	-1,36E-06	0,00E+00
	-	-	-9,53E-07	9,53E-07	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-9,52E-07	-9,52E-07	0,00E+00
	0,01	0,01	-0,29	0,33	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	-0,33	-0,29	-0,01
	0,00	0,00	-0,22	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,25	-0,22	0,00
	-	-	-0,05	0,06	0,00	0,00	-	-	-	-0,06	-0,05	0,00
	-	-	-0,03	0,04	0,00	0,00	-	-	-	-0,04	-0,03	0,00
f-												
	-1,79E-08	-1,79E-08	5,95E-07	-5,95E-07	1,77E-07	1,64E-07	9,21E-08	9,22E-08	4,35E-08	2,74E-07	2,75E-07	-1,64E-07
	7,38E-09	7,34E-09	3,89E-08	-3,90E-08	1,26E-08	-6,65E-08	-1,37E-08	-1,38E-08	-1,54E-08	1,59E-07	1,59E-07	6,65E-08
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	0,00	0,00	0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
f+												
	4,98E-07	4,98E-07	-6,82E-06	6,82E-06	6,68E-07	7,63E-07	8,20E-07	8,20E-07	3,64E-09	-7,44E-06	-7,44E-06	-7,63E-07
	1,55E-07	1,55E-07	-5,19E-06	5,19E-06	1,63E-07	4,78E-08	7,66E-08	7,66E-08	3,39E-09	-5,65E-06	-5,65E-06	-4,78E-08
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	0,01	0,01	-0,25	0,28	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-0,30	-0,27	-0,02
	0,00	0,00	-0,19	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,23	-0,20	0,00
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
	-	-	-	-	-	0,00E+00						
β-												
	5,60E-06	5,60E-06	3,82E-06	-3,82E-06	4,17E-06	5,16E-06	6,79E-06	6,79E-06	6,54E-07	4,17E-06	4,17E-06	-5,16E-06
	5,45E-07	5,45E-07	6,86E-06	-6,86E-06	1,46E-06	2,68E-06	1,60E-06	1,60E-06	6,40E-07	7,10E-06	7,10E-06	-2,68E-06
	0,00E+00											
	0,00E+00											
	0,14	0,14	0,14	-0,16	0,11	0,13	0,17	0,16	0,07	0,17	0,15	-0,14
	0,01	0,01	0,25	-0,28	0,04	0,07	0,04	0,04	0,07	0,29	0,26	-0,07
	0,00E+00											
	0,00E+00											

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Nominal	Moyenne	4,32E-05	-2,30E+02	-4,96E-05	-6,47E-06	-2,42E-07	-4,45E+02	-4,25E-07	-8,06E+02	-3,31E+02	-4,33E+01	9,60E-05
	Ecart-type	1,31E-03	3,78E+05	1,17E-03	5,61E-04	4,29E-04	6,42E+04	4,23E-04	6,01E+05	4,54E+05	4,54E+05	1,78E-03
β +												
	Variation de moyenne avec bruit	-1,22E-05	-3,84E+02	1,22E-05	6,42E-11	-8,57E-08	4,68E+02	-2,97E-07	-1,34E+02	-3,81E+01	-2,96E+02	1,97E-06
	Variation de moyenne sans bruit	-1,61E-05	-3,22E+02	1,61E-05	2,46E-11	-1,59E-07	4,64E+02	-2,38E-07	-4,15E+01	-4,21E+01	-2,95E+02	1,04E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,43	-0,05	0,48	0,00	-0,01	0,34	-0,03	-0,01	0,00	-0,03	0,05
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,57	-0,04	0,64	0,00	-0,02	0,34	-0,03	0,00	0,00	-0,03	0,03
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Muv												
	Variation de moyenne avec bruit	-7,29E-06	-1,61E+02	7,29E-06	6,53E-11	-1,29E-08	1,35E+02	-2,07E-08	-1,17E+02	-7,40E+01	-1,74E+02	7,41E-07
	Variation de moyenne sans bruit	-6,22E-06	-4,65E+01	6,22E-06	-1,24E-11	-7,97E-08	3,99E+01	-9,73E-08	-3,32E+01	-4,98E+01	-7,80E+01	2,40E-07
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-	-	-	-5,78E+00	-	-3,59E+02	-7,23E+01	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-	-	-	-7,14E+02	-	7,40E+02	-4,74E+02	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,26	-0,02	0,29	0,00	0,00	0,10	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	0,02
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,22	-0,01	0,25	0,00	-0,01	0,03	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,01
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-	-	-	0,00	-	-0,03	-0,01	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-	-	-	-0,52	-	0,06	-0,05	-	-
Fc												
	Variation de moyenne avec bruit	-7,67E-06	-1,04E+02	7,67E-06	8,10E-11	-2,59E-08	-6,91E+01	-3,13E-08	-2,32E+02	-1,49E+02	-1,21E+02	7,21E-07
	Variation de moyenne sans bruit	-6,74E-06	2,35E+02	6,74E-06	-4,41E-11	-6,15E-08	-4,96E+02	-9,11E-08	-1,27E+02	-1,11E+02	2,09E+02	1,87E-07
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-	-	-	-6,13E+01	-	-6,13E+01	-3,91E+01	-	-
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-	-	-	-8,38E+02	-	-8,38E+02	-5,34E+02	-	-
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,27	-0,01	0,30	0,00	0,00	-0,05	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	0,02
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,24	0,03	0,27	0,00	-0,01	-0,36	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,00
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-	-	-	-0,04	-	0,00	0,00	-	-
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-	-	-	-0,61	-	-0,06	-0,05	-	-
ξ -												
	Variation de moyenne avec bruit	1,01E-05	-1,03E+02	-1,01E-05	3,11E-11	1,73E-08	-1,70E+00	2,95E-08	-1,64E+02	-7,70E+01	-7,58E+01	-3,34E-06
	Variation de moyenne sans bruit	8,48E-06	-7,08E+01	-8,48E-06	-2,33E-11	2,84E-09	-1,28E+00	2,68E-08	-1,12E+02	-4,72E+01	-4,62E+01	-1,65E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,36	-0,01	-0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,09
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,30	-0,01	-0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,04
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

Nominal	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
	9,63E-05	8,98E-05	4,24E-05	-4,88E-05	1,02E-04	9,94E-05	9,88E-05	9,23E-05	-2,75E-07	4,88E-05	4,23E-05	-1,06E-04
	1,84E-03	1,92E-03	1,28E-03	1,14E-03	1,70E-03	1,82E-03	1,88E-03	1,94E-03	4,35E-04	1,14E-03	1,29E-03	1,75E-03
β+												
	-8,29E-07	-8,28E-07	-1,71E-05	1,71E-05	1,97E-06	8,96E-07	-1,55E-06	-1,55E-06	-2,19E-07	-1,72E-05	-1,72E-05	-8,96E-07
	9,47E-07	9,47E-07	-1,80E-05	1,80E-05	1,04E-06	2,67E-07	3,34E-07	3,34E-07	-2,93E-07	-1,82E-05	-1,82E-05	-2,67E-07
	0,00E+00											
	0,00E+00											
	-0,02	-0,02	-0,62	0,70	0,05	0,02	-0,04	-0,04	-0,02	-0,70	-0,62	-0,02
	0,02	0,02	-0,65	0,73	0,03	0,01	0,01	0,01	-0,03	-0,74	-0,66	-0,01
	0,00E+00											
	0,00E+00											
Muv												
	4,97E-07	4,97E-07	-6,63E-06	6,63E-06	7,41E-07	8,35E-07	8,13E-07	8,14E-07	8,99E-10	-7,17E-06	-7,17E-06	-8,35E-07
	2,23E-07	2,23E-07	-5,67E-06	5,67E-06	2,40E-07	5,24E-08	1,10E-07	1,10E-07	-7,85E-08	-6,22E-06	-6,22E-06	-5,24E-08
	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,20E-07	3,20E-07	0,00E+00
	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,17E-07	5,17E-07	0,00E+00
	0,01	0,01	-0,24	0,27	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-0,29	-0,26	-0,02
	0,01	0,01	-0,20	0,23	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,25	-0,22	0,00
	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00
Fc												
	5,05E-07	5,05E-07	-6,95E-06	6,95E-06	7,21E-07	8,61E-07	8,62E-07	8,62E-07	-1,08E-08	-7,57E-06	-7,57E-06	-8,61E-07
	1,39E-07	1,39E-07	-6,18E-06	6,18E-06	1,87E-07	-1,63E-07	-8,76E-08	-8,77E-08	-7,17E-08	-6,78E-06	-6,78E-06	1,63E-07
	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,78E-07	-6,78E-07	0,00E+00
	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,09E-06	-1,09E-06	0,00E+00
	0,01	0,01	-0,25	0,28	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-0,31	-0,27	-0,02
	0,00	0,00	-0,22	0,25	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,28	-0,24	0,00
	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,02	0,00
	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,04	0,00
ξ-												
	-3,85E-06	-3,85E-06	8,53E-06	-8,53E-06	-3,34E-06	-3,36E-06	-3,87E-06	-3,87E-06	1,71E-08	8,45E-06	8,45E-06	3,36E-06
	-1,70E-06	-1,70E-06	7,13E-06	-7,13E-06	-1,64E-06	-1,64E-06	-1,70E-06	-1,70E-06	2,59E-09	7,12E-06	7,12E-06	1,64E-06
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	-0,10	-0,09	0,31	-0,35	-0,09	-0,09	-0,10	-0,09	0,00	0,34	0,30	0,09
	-0,04	-0,04	0,26	-0,29	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	0,00	0,29	0,26	0,04
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Nominal	Moyenne	4,32E-05	-2,30E+02	-4,96E-05	-6,47E-06	-2,42E-07	-4,45E+02	-4,25E-07	-8,06E+02	-3,31E+02	-4,33E+01	9,60E-05
	Ecart-type	1,31E-03	3,78E+05	1,17E-03	5,61E-04	4,29E-04	6,42E+04	4,23E-04	6,01E+05	4,54E+05	4,54E+05	1,78E-03
ω⁺												
	Variation de moyenne avec bruit	-7,74E-06	7,05E+01	7,74E-06	5,80E-11	-1,81E-08	1,12E+00	-2,33E-08	1,12E+02	4,44E+01	4,36E+01	2,61E-06
	Variation de moyenne sans bruit	-6,50E-06	5,77E+01	6,50E-06	-2,53E-11	-5,76E-09	1,10E+00	-2,10E-08	9,17E+01	3,35E+01	3,26E+01	1,24E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,27	0,01	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,07
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,23	0,01	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
ω⁰												
	Variation de moyenne avec bruit	-7,71E-06	1,58E+02	7,71E-06	7,58E-11	-1,01E-08	2,58E+00	-3,24E-08	2,50E+02	1,27E+02	1,25E+02	2,78E-06
	Variation de moyenne sans bruit	-6,73E-06	1,10E+02	6,73E-06	-4,87E-11	5,74E-09	2,00E+00	-3,41E-08	1,75E+02	8,61E+01	8,46E+01	1,14E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,27	0,02	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,07
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,24	0,01	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
ω⁰ +												
	Variation de moyenne avec bruit	1,17E-05	-2,91E+02	-1,17E-05	3,37E-11	-2,74E-08	-5,15E+00	1,54E-08	-4,62E+02	-2,73E+02	-2,69E+02	-3,78E-06
	Variation de moyenne sans bruit	9,58E-06	-1,67E+02	-9,58E-06	5,58E-11	-3,40E-08	-2,96E+00	3,39E-08	-2,65E+02	-1,57E+02	-1,55E+02	-1,47E-06
	Var moyenne théorique avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,41	-0,04	-0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,03	-0,03	-0,10
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,34	-0,02	-0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,00E+00	-	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
ω^b												
	Variation de moyenne avec bruit	-2,59E-05	-5,18E+01	2,59E-05	5,69E-11	6,43E-09	-8,30E-01	1,42E-08	-8,21E+01	-6,15E+01	-6,08E+01	-2,17E-05
	Variation de moyenne sans bruit	-2,22E-05	-2,04E+01	2,22E-05	-4,31E-11	6,42E-09	-2,86E-01	5,77E-09	-3,24E+01	-3,38E+01	-3,36E+01	-1,98E-05
	Var moyenne théorique avec bruit	-8,72E-06	-	8,72E-06	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	-1,43E-05	-	1,43E-05	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,91	-0,01	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,56
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,79	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,52
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-0,31	-	0,35	-	-	-	-	-	-	-	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-0,50	-	0,57	-	-	-	-	-	-	-	0,00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

Nominal	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
	9,63E-05	8,98E-05	4,24E-05	-4,88E-05	1,02E-04	9,94E-05	9,88E-05	9,23E-05	-2,75E-07	4,88E-05	4,23E-05	-1,06E-04
	1,84E-03	1,92E-03	1,28E-03	1,14E-03	1,70E-03	1,82E-03	1,88E-03	1,94E-03	4,35E-04	1,14E-03	1,29E-03	1,75E-03
$\xi +$												
	3,17E-06	3,17E-06	-7,13E-06	7,13E-06	2,61E-06	2,64E-06	3,19E-06	3,19E-06	-1,80E-08	-7,08E-06	-7,08E-06	-2,64E-06
	1,29E-06	1,29E-06	-5,97E-06	5,97E-06	1,24E-06	1,24E-06	1,29E-06	1,29E-06	-5,57E-09	-5,97E-06	-5,97E-06	-1,24E-06
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,08	0,08	-0,26	0,29	0,07	0,07	0,08	0,08	0,00	-0,29	-0,26	-0,07
	0,03	0,03	-0,22	0,24	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	-0,24	-0,22	-0,03
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
$\omega 0 -$												
	3,81E-06	3,81E-06	-6,96E-06	6,96E-06	2,78E-06	2,80E-06	3,84E-06	3,84E-06	-9,85E-09	-6,88E-06	-6,88E-06	-2,80E-06
	1,13E-06	1,13E-06	-5,71E-06	5,71E-06	1,14E-06	1,13E-06	1,14E-06	1,14E-06	6,11E-09	-5,71E-06	-5,71E-06	-1,13E-06
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,10	0,09	-0,25	0,28	0,08	0,07	0,10	0,09	0,00	-0,28	-0,25	-0,07
	0,03	0,03	-0,21	0,23	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	-0,23	-0,21	-0,03
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
$\omega 0 +$												
	-4,92E-06	-4,92E-06	8,40E-06	-8,40E-06	-3,78E-06	-3,80E-06	-4,97E-06	-4,97E-06	-2,79E-08	8,23E-06	8,23E-06	3,80E-06
	-1,45E-06	-1,45E-06	6,32E-06	-6,32E-06	-1,47E-06	-1,47E-06	-1,45E-06	-1,45E-06	-3,45E-08	6,31E-06	6,31E-06	1,47E-06
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	-0,12	-0,12	0,30	-0,34	-0,10	-0,10	-0,12	-0,12	0,00	0,33	0,30	0,10
	-0,04	-0,04	0,23	-0,26	-0,04	-0,04	-0,04	-0,03	0,00	0,26	0,23	0,04
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00							
$Qnb -$												
	-2,14E-05	-2,14E-05	-2,58E-05	2,58E-05	-2,17E-05	-2,17E-05	-2,14E-05	-2,14E-05	6,34E-09	-2,58E-05	-2,58E-05	2,17E-05
	-1,99E-05	-1,99E-05	-2,24E-05	2,24E-05	-1,98E-05	-1,98E-05	-1,99E-05	-1,99E-05	6,40E-09	-2,24E-05	-2,24E-05	1,98E-05
	0,00E+00	0,00E+00	-8,68E-06	8,68E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-8,67E-06	-8,67E-06	0,00E+00
	0,00E+00	0,00E+00	-1,41E-05	1,41E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-1,41E-05	-1,41E-05	0,00E+00
	-0,54	-0,52	-0,93	1,05	-0,59	-0,55	-0,53	-0,51	0,00	-1,05	-0,93	0,58
	-0,50	-0,48	-0,81	0,91	-0,54	-0,50	-0,49	-0,47	0,00	-0,91	-0,81	0,53
	0,00	0,00	-0,31	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-0,35	-0,31	0,00
	0,00	0,00	-0,51	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-0,57	-0,51	0,00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Nominal	Moyenne	4,32E-05	-2,30E+02	-4,96E-05	-6,47E-06	-2,42E-07	-4,45E+02	-4,25E-07	-8,06E+02	-3,31E+02	-4,33E+01	9,60E-05
	Ecart-type	1,31E-03	3,78E+05	1,17E-03	5,61E-04	4,29E-04	6,42E+04	4,23E-04	6,01E+05	4,54E+05	4,54E+05	1,78E-03
Qnb +												
	Variation de moyenne avec bruit	2,38E-05	5,19E+01	-2,38E-05	5,84E-11	-6,13E-09	7,77E-01	-1,32E-08	8,23E+01	6,14E+01	6,08E+01	1,98E-05
	Variation de moyenne sans bruit	2,04E-05	2,38E+01	-2,04E-05	-1,97E-11	-7,25E-09	3,26E-01	-5,92E-09	3,77E+01	3,61E+01	3,59E+01	1,81E-05
	Var moyenne théorique avec bruit	6,50E-06	-	-6,50E-06	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	1,08E-05	-	-1,08E-05	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,84	0,01	-0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,52
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,72	0,00	-0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,23	-	-0,26	-	-	-	-	-	-	-	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,38	-	-0,43	-	-	-	-	-	-	-	0,00
Qnh -												
	Variation de moyenne avec bruit	1,61E-05	7,31E+01	-1,61E-05	5,61E-11	-2,08E-08	1,17E+00	-1,41E-08	1,16E+02	6,76E+01	6,68E+01	2,01E-05
	Variation de moyenne sans bruit	1,41E-05	5,03E+01	-1,41E-05	-8,81E-12	-1,67E-08	9,48E-01	-8,52E-09	7,99E+01	4,28E+01	4,21E+01	1,67E-05
	Var moyenne théorique avec bruit	6,97E-06	-	-6,97E-06	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	1,15E-05	-	-1,15E-05	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,57	0,01	-0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,52
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	0,50	0,01	-0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,43
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	0,25	-	-0,28	-	-	-	-	-	-	-	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	0,41	-	-0,46	-	-	-	-	-	-	-	0,00
Qnh +												
	Variation de moyenne avec bruit	-1,51E-05	-7,82E+01	1,51E-05	4,99E-11	2,20E-08	-1,33E+00	1,56E-08	-1,24E+02	-7,27E+01	-7,18E+01	-1,92E-05
	Variation de moyenne sans bruit	-1,33E-05	-5,08E+01	1,33E-05	-2,74E-11	1,73E-08	-9,97E-01	8,91E-09	-8,07E+01	-4,36E+01	-4,30E+01	-1,59E-05
	Var moyenne théorique avec bruit	-6,60E-06	-	6,60E-06	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	-5,57E-06	-	5,57E-06	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	-0,53	-0,01	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,50
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,47	-0,01	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,41
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-0,23	-	0,26	-	-	-	-	-	-	-	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-0,20	-	0,22	-	-	-	-	-	-	-	0,00
K1												
	Variation de moyenne avec bruit	1,22E-06	5,54E+00	-1,22E-06	3,63E-11	7,96E-05	-1,79E+00	7,96E-05	6,91E+00	2,09E+04	2,09E+04	3,74E-04
	Variation de moyenne sans bruit	-8,34E-07	9,22E+00	8,34E-07	-3,15E-11	7,96E-05	-1,49E+00	7,96E-05	1,30E+01	2,10E+04	2,10E+04	3,70E-04
	Var moyenne théorique avec bruit	-	-	-	-	7,97E-05	-	7,97E-05	-	2,09E+04	2,09E+04	0,00E+00
	Var moyenne théorique sans bruit	-	-	-	-	7,97E-05	-	7,97E-05	-	2,09E+04	2,09E+04	
	Ecart réduit, pratique, avec bruit	0,04	0,00	-0,05	0,00	8,61	0,00	8,74	0,00	2,14	2,14	9,71
	Ecart réduit, pratique, sans bruit	-0,03	0,00	0,03	0,00	8,61	0,00	8,74	0,00	2,14	2,14	9,63
	Ecart réduit, théorique, avec bruit	-	-	-	-	8,62	-	8,74	-	2,14	2,14	0,00
	Ecart réduit, théorique, sans bruit	-	-	-	-	8,62	-	8,74	-	2,14	2,14	0,00

Comparaison des sensibilités théoriques et pratiques

Nominal	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
9,63E-05	8,98E-05	4,24E-05	-4,88E-05	1,02E-04	9,94E-05	9,88E-05	9,23E-05	-2,75E-07	4,88E-05	4,23E-05	-1,06E-04	0,00E+00
1,84E-03	1,92E-03	1,28E-03	1,14E-03	1,70E-03	1,82E-03	1,88E-03	1,94E-03	4,35E-04	1,14E-03	1,29E-03	1,75E-03	0,00E+00
Qnb +												
	1,95E-05	1,95E-05	2,38E-05	-2,38E-05	1,98E-05	1,98E-05	1,95E-05	1,95E-05	-6,04E-09	2,38E-05	2,38E-05	-1,98E-05
	1,81E-05	1,81E-05	2,06E-05	-2,06E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	-7,24E-09	2,06E-05	2,06E-05	-1,81E-05
	0,00E+00	0,00E+00	6,44E-06	-6,44E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	6,43E-06	6,43E-06	0,00E+00
	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-05	-1,06E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	1,06E-05	1,06E-05	0,00E+00
	0,49	0,47	0,86	-0,97	0,54	0,50	0,48	0,47	0,00	0,97	0,86	-0,53
	0,46	0,44	0,74	-0,84	0,49	0,46	0,45	0,43	0,00	0,84	0,74	-0,48
	0,00	0,00	0,23	-0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,26	0,23	0,00
	0,00	0,00	0,38	-0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,43	0,38	0,00
Qnh -												
	2,03E-05	2,03E-05	1,62E-05	-1,62E-05	2,01E-05	2,01E-05	2,03E-05	2,03E-05	-2,08E-08	1,62E-05	1,62E-05	-2,01E-05
	1,67E-05	1,67E-05	1,42E-05	-1,42E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	-1,67E-08	1,42E-05	1,42E-05	-1,67E-05
	0,00E+00	0,00E+00	6,95E-06	-6,95E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	6,95E-06	6,95E-06	0,00E+00
	0,00E+00	0,00E+00	1,15E-05	-1,15E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	1,15E-05	1,15E-05	0,00E+00
	0,51	0,49	0,58	-0,66	0,55	0,51	0,50	0,49	0,00	0,66	0,58	-0,53
	0,42	0,41	0,51	-0,58	0,45	0,42	0,41	0,40	0,00	0,58	0,51	-0,44
	0,00	0,00	0,25	-0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,28	0,25	0,00
	0,00	0,00	0,42	-0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,47	0,42	0,00
Qnh +												
	-1,94E-05	-1,94E-05	-1,52E-05	1,52E-05	-1,92E-05	-1,92E-05	-1,94E-05	-1,94E-05	2,20E-08	-1,53E-05	-1,53E-05	1,92E-05
	-1,60E-05	-1,60E-05	-1,34E-05	1,34E-05	-1,59E-05	-1,59E-05	-1,60E-05	-1,60E-05	1,73E-08	-1,34E-05	-1,34E-05	1,59E-05
	0,00E+00	0,00E+00	-6,56E-06	6,56E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-6,56E-06	-6,56E-06	0,00E+00
	0,00E+00	0,00E+00	-5,55E-06	5,55E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-5,54E-06	-5,54E-06	0,00E+00
	-0,49	-0,47	-0,55	0,62	-0,52	-0,49	-0,48	-0,46	0,00	-0,62	-0,55	0,51
	-0,40	-0,39	-0,48	0,54	-0,43	-0,41	-0,39	-0,38	0,00	-0,54	-0,48	0,42
	0,00	0,00	-0,24	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-0,27	-0,24	0,00
	0,00	0,00	-0,20	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-0,23	-0,20	0,00
K1												
	3,70E-04	3,70E-04	2,32E-06	-2,32E-06	3,74E-04	3,74E-04	3,70E-04	3,70E-04	7,96E-05	2,31E-06	2,31E-06	-3,74E-04
	3,70E-04	3,70E-04	-1,60E-07	1,60E-07	3,70E-04	3,70E-04	3,70E-04	3,70E-04	7,96E-05	-1,49E-07	-1,49E-07	-3,70E-04
	3,72E-04	3,72E-04	-	-	0,00E+00	0,00E+00	3,66E-04	3,66E-04	7,97E-05	-	-	0,00E+00
	3,66E-04	3,66E-04	-	-	-	-	3,61E-04	3,61E-04	7,97E-05	-	-	-
	9,33	8,97	0,08	-0,09	10,17	9,51	9,16	8,83	8,49	0,09	0,08	-9,91
	9,31	8,95	-0,01	0,01	10,08	9,43	9,14	8,82	8,49	-0,01	-0,01	-9,82
	9,37	9,00	-	-	0,00	0,00	9,05	8,73	8,49	-	-	0,00
	9,22	8,86	-	-	0,00	0,00	8,92	8,61	8,49	-	-	0,00

ANNEXE 9

Valeurs des défaillances pour le cahier des charges à 20 %

La valeur nominale du paramètre est indiquée en gras.

- Qf = **0**; 10 l/mn.
- Pa = 128; **160** et 192 bars.
- Kr = 32; **40** et 48.
- K = **0**; 4e-11 N/m.
- K₁ = **0**, 2,2.10⁻¹¹ m³/Pa.s
- R = 25,77 ; **32,21** ; 38,68 s⁻¹.
- f = 5.10⁵ ; **3.10⁶** 2.10⁷ N.s/m.
- β = 1,248.10⁹ ; **1,56.10⁹** et 1,872.10⁹ Pascals.
- μ_v = 0; **0,266** Pa/s.
- Fcste = 0; **80.10⁴** N.
- ξ = 0,7 ; **0,9** ; 1,1
- ω₀ = 328 ; **410** ; 492 rad/s
- Qnb = 3,02.10⁻³ ; **3,78.10⁻³** ; 4,54 .10⁻³ m³/s
- Qnh = 2.10⁻³ ; **2,5.10⁻³** ; 3.10⁻³ m³/s
- Mced = 3,226.10⁹ ; **4,032.10⁹** ; 4,839.10⁹ N/mm
- Mced2 = 5,117.10⁹ ; **6,396.10⁹** ; 7,675.10⁹ N/mm
- Mced3 = -105023 ; **-87519** ; -70015 s⁻¹
- S₀ = 0,89.10⁻³ **1,11.10⁻³** 1,33.10⁻³ m
- ρ = 0,664 .10³ ; **0,83 .10³** ; 0,996 .10³ kg/m³
- M = 6,4.10⁴ ; **8.10⁴** ; 9,6.10⁴ kg

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Qf en m3/s	0	8,83E-05										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,1407993	0,1087361	0,1556691	-	0,0432156	-	-	0,1068773	0,0943309	0,0864312
Instant de première détection en s			21,16	21,23	20,76	-	21,36	-	-	21,25	21,15	21,2
Durée totale de détection en s			3,03	2,34	3,35	-	0,93	-	-	2,3	2,03	1,86
Maximum des durées de détection continue en			2,95	2,33	3,35	-	0,93	-	-	2,3	2,03	1,72
Kr en A/m	40	36,5										
Signature Théorique			-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr en A/m	40	43,5										
Signature Théorique			-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,1138476	0,1110595	0,114777	-	0,0483271	-	0,0060409	0,1092007	0,1013011	0,0938662
Instant de première détection en s			21,44	21,2	21,2	-	21,25	-	21,47	21,2	20,94	21,13
Durée totale de détection en s			2,45	2,39	2,47	-	1,04	-	0,13	2,35	2,18	2,02
Maximum des durées de détection continue en			2,45	2,36	2,45	-	1,01	-	0,1	2,35	2,14	1,84
R en s-1	32,21	25,23										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,1421933	0,1728625	0,1519517	-	0,0859665	-	0,0418216	0,170539	0,1519517	0,151487
Instant de première détection en s			21,33	20,82	21,12	-	21	-	21,29	20,84	20,81	20,81
Durée totale de détection en s			3,06	3,72	3,27	-	1,85	-	0,9	3,67	3,27	3,26
Maximum des durées de détection continue en			2,76	3,72	3,03	-	1,83	-	0,77	3,67	3,27	3,26
R en s-1	32,21	38,99										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f en N.s/m	3,00E+06	5,85E+05										
Signature Théorique			-	-	-	-	-	1	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0562268	0,0241636	-	-	0,9344796	-	-	-	0,03671
Instant de première détection en s			-	21,82	21,9	-	-	20,01	-	-	-	21,75
Durée totale de détection en s			-	1,21	0,52	-	-	19,51	-	-	-	0,79
Maximum des durées de détection continue en			-	1,09	0,25	-	-	20,1	-	-	-	0,78

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
Qf en m3/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	0,4609665	0,454461	0,41171	0,1542751	0,152881	0,554368	0,4498141	0,4479554	0,4135688	0,0357807	0,152881	0,1542751	0,5223048
	21,37	20,58	21,49	20,79	20,76	20,27	21,38	20,58	21,5	21,37	20,76	20,79	20,32
	9,92	9,77	8,86	3,32	3,29	11,77	9,68	9,64	8,9	0,77	3,29	3,32	11,21
	9,11	6,1	8,34	3,32	3,29	10,27	9,08	5,92	8,34	0,65	3,29	3,32	7,04
Kr en A/m													
	-	1	-	-	1	1	-	1	-	-	1	-	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr en A/m													
	-	1	-	-	1	1	-	1	-	-	1	-	1
	-	-	-	0,1259294	0,1054833	-	-	-	-	0,0427509	0,1022305	0,1254647	-
	-	-	-	21,18	21,2	-	-	-	-	21,36	21,21	21,18	-
	-	-	-	2,71	2,27	-	-	-	-	0,92	2,2	2,7	-
	-	-	-	2,71	2,23	-	-	-	-	0,92	2,2	2,7	-
R en s-1													
	1	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	1	1
	-	-	-	0,1421933	0,135223	-	-	-	-	0,0757435	0,133829	0,1407993	-
	-	-	-	21,19	21,17	-	-	-	-	21,12	21,18	21,2	-
	-	-	-	3,06	2,91	-	-	-	-	1,63	2,88	3,03	-
	-	-	-	2,92	2,91	-	-	-	-	1,6	2,88	2,91	-
R en s-1													
	1	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f en N.s/m													
	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	0,0032528	0,0018587	-	-	-	-	-	-	0,0018587	-
	-	-	-	23,05	21,93	-	-	-	-	-	-	23,05	-
	-	-	-	0,07	0,04	-	-	-	-	-	-	0,04	-
	-	-	-	0,07	0,04	-	-	-	-	-	-	0,03	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
f en N.s/m	3,00E+06	6,10E+07										
Signature Théorique			-	-	-	-	-	1	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s	1,56E+09	1,170E+09										
Signature Théorique			1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,1375465	0,0078996	0,1394052	-	-	0,9986059	0,0144052	0,0060409	0,0250929	0,0227695
Instant de première détection en s			20,1	31,68	20,12	-	-	20,01	39,21	31,69	38,96	39,03
Durée totale de détection en s			2,96	0,17	3	-	-	19,48	0,31	0,13	0,54	0,49
Maximum des durées de détection continue en s			2,24	0,15	2,23	-	-	17,45	0,3	0,12	0,52	0,48
β en Pa/s	1,56E+09	2,075E+09										
Signature Théorique			1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	0,9972119	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	20,01	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	19,45	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	17,4	-	-	-	-
μ en Pa/s	0	0,0057										
Signature Théorique			-	-	-	-	-	1	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_c en N	0	2,20E+04										
Signature Théorique			-	-	-	-	-	1	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	0,0018587	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	36,07	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	-
ξ (s.u.)	0,9	0,74										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,1180297	0,1473048	0,1319703	-	0,0785316	-	0,0404275	0,1463755	0,1310409	0,1263941
Instant de première détection en s			21,48	20,88	21,19	-	21	-	21,24	20,89	20,78	20,81
Durée totale de détection en s			2,54	3,17	2,84	-	1,69	-	0,87	3,15	2,82	2,72
Maximum des durées de détection continue en s			2,54	3,17	2,84	-	1,62	-	0,82	3,15	2,78	2,72

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
f en N.s/m													
	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	0,1644981	0,1556691	-	-	-	-	-	0,1552045	0,1640335	-
	-	-	-	20,01	20,04	-	-	-	-	-	20,04	20,01	-
	-	-	-	3,43	3,35	-	-	-	-	-	3,34	3,43	-
	-	-	-	2,82	2,61	-	-	-	-	-	2,61	2,81	-
β en Pa/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
μv en Pa/s													
	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fc en N													
	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ε (s.u.)													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	0,1273234	0,1105948	-	-	-	-	0,0697026	0,1087361	0,1245353	-
	-	-	-	21,24	21,21	-	-	-	-	21,12	21,21	21,26	-
	-	-	-	2,74	2,38	-	-	-	-	1,5	2,34	2,68	-
	-	-	-	2,7	2,35	-	-	-	-	1,49	2,33	2,68	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	Valeur Nominal	Valeur de parr	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
ξ (s.u.)	0,9	1,063										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	330										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	600										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,072026	0,133829	0,0901487	-	0,0868959	-	0,0469331	0,1333643	0,1208178	0,1096654
Instant de première détection en s			21,88	21,16	21,81	-	20,95	-	21,24	21,17	20,93	21,01
Durée totale de détection en s			1,55	2,88	1,94	-	1,87	-	1,01	2,87	2,6	2,36
Maximum des durées de détection continue en			1,03	2,88	1,74	-	1,82	-	0,78	2,87	2,6	2,36
Qnb en m3/s	3,78E-03	3,44E-03										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnh en m3/s	3,78E-03	4,12E-03										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,0120818	0,0599442	0,063197	-	0,0134758	-	-	0,0506506	0,0450743	0,0362454
Instant de première détection en s			21,9	21,8	21,81	-	21,45	-	-	21,82	21,49	21,73
Durée totale de détection en s			0,26	1,29	1,36	-	0,29	-	-	1,09	0,97	0,78
Maximum des durées de détection continue en			0,18	1,11	1,12	-	0,14	-	-	0,94	0,88	0,75
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,29E-03										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
ξ (s.u.)													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω_0 en rad/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω_0 en rad/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	0,0636617	0,0576208	-	-	-	-	0,0785316	0,0506506	0,0590149	-
	-	-	-	21,86	21,85	-	-	-	-	21,01	21,87	21,87	-
	-	-	-	1,37	1,24	-	-	-	-	1,69	1,09	1,27	-
	-	-	-	0,83	1,05	-	-	-	-	1,66	0,87	0,82	-
Q_{nb} en m ³ /s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q_{nb} en m ³ /s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	0,0604089	0,0469331	-	-	-	-	0,0083643	0,0436803	0,054368	-
	-	-	-	21,81	21,81	-	-	-	-	21,48	21,83	21,81	-
	-	-	-	1,3	1,01	-	-	-	-	0,18	0,94	1,17	-
	-	-	-	0,95	0,9	-	-	-	-	0,09	0,86	0,66	-
Q_{nh} en m ³ /s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,72E-03										
Signature Théorique			1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,0283457	0,0669145	0,0669145	-	0,0153346	-	-	0,0627323	0,0520446	0,0483271
Instant de première détection en s			21,87	21,74	21,75	-	21,45	-	-	21,77	21,46	21,48
Durée totale de détection en s			0,61	1,44	1,44	-	0,33	-	-	1,35	1,12	1,04
Maximum des durées de détection continue en			0,27	1,44	1,42	-	0,15	-	-	1,17	0,96	0,94
K1 en N/m.s	0	2,20E-11										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	-	1	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			0,0645911	0,1045539	0,0776022	-	0,1096654	-	0,0822491	0,1036245	0,089684	0,0803903
Instant de première détection en s			21,85	21,28	21,71	-	20,86	-	21,01	21,3	21,19	21,2
Durée totale de détection en s			1,39	2,25	1,67	-	2,36	-	1,77	2,23	1,93	1,73
Maximum des durées de détection continue en			0,71	2,25	1,67	-	2,34	-	1,51	2,23	1,75	1,58

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec les 23 résidus

Paramètres	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
Qnh en m3/s													
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
	-	-	-	0,0655204	0,0483271	-	-	-	-	0,0111524	0,0460037	0,0650558	-
	-	-	-	21,79	21,81	-	-	-	-	21,47	21,81	21,8	-
	-	-	-	1,41	1,04	-	-	-	-	0,24	0,99	1,4	-
	-	-	-	1,41	0,93	-	-	-	-	0,13	0,9	1,4	-
K1 en N/m.s													
	1	1	1	-	-	1	1	1	1	1	-	-	1
	0,3856877	0,2699814	0,3461896	0,0776022	0,0613383	0,4131041	0,3856877	0,2546468	0,3327138	0,1036245	0,0580855	0,0757435	0,4024164
	21,69	21,15	21,78	21,71	21,75	20,97	21,7	21,15	21,92	20,91	21,79	21,72	21,02
	8,3	5,81	7,45	1,67	1,32	8,88	8,3	5,48	7,16	2,23	1,25	1,63	8,66
	8,01	4,38	2,14	1,62	1,12	5,84	8,01	3,94	2,59	2	1,08	1,61	5,8

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 13 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R5	R6	R7	R11	R12	R13	R16	R17	R18
Qf en m3/s	0	8,83E-05										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0432156	-	-	0,4609665	0,454461	0,41171	0,554368	0,4498141	0,4479554
Instant de première détection en s			-	21,36	-	-	21,37	20,58	21,49	20,27	21,38	20,58
Durée totale de détection en s			-	0,93	-	-	9,92	9,77	8,86	11,77	9,68	9,64
Maximum des durées de détection continue en			-	0,93	-	-	9,11	6,1	8,34	10,27	9,08	5,92
Kr en A/m	40	36,5										
Signature Théorique			1	-	-	-	-	1	-	1	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr en A/m	40	43,5										
Signature Théorique			1	-	-	-	-	1	-	1	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0483271	-	0,0060409	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	21,25	-	21,47	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	1,04	-	0,13	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	1,01	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R en s-1	32,21	25,23										
Signature Théorique			-	-	-	1	1	-	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0859665	-	0,0418216	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	21	-	21,29	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	1,85	-	0,9	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	1,83	-	0,77	-	-	-	-	-	-
R en s-1	32,21	38,99										
Signature Théorique			-	-	-	1	1	-	-	1	1	-
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f en N.s/m	3,00E+06	5,85E+05										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	-	-	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,9344796	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	20,01	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	19,51	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	20,1	-	-	-	-	-	-	-

Paramètres	R19	R20	R23
Qf en m3/s			
	1	-	1
	0,4135688	0,0357807	0,5223048
	21,5	21,37	20,32
	8,9	0,77	11,21
	8,34	0,65	7,04
Kr en A/m			
	-	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
Kr en A/m			
	-	-	1
	-	0,0427509	-
	-	21,36	-
	-	0,92	-
	-	0,92	-
R en s-1			
	-	-	1
	-	0,0757435	-
	-	21,12	-
	-	1,63	-
	-	1,6	-
R en s-1			
	-	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
f en N.s/m			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 13 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R5	R6	R7	R11	R12	R13	R16	R17	R18
f en N.s/m	3,00E+06	6,10E+07										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	-	-	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s	1,56E+09	1,170E+09										
Signature Théorique			-	1	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,9986059	0,0144052	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	20,01	39,21	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	19,48	0,31	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	17,45	0,3	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s	1,56E+09	2,075E+09										
Signature Théorique			-	1	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,9972119	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	20,01	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	19,45	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	17,4	-	-	-	-	-	-	-
μ en Pa/s	0	0,0057										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	-	-	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_c en N	0	2,20E+04										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	-	-	-	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,0018587	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	36,07	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-
ξ (s.u.)	0,9	0,74										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0785316	-	0,0404275	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	21	-	21,24	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	1,69	-	0,87	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	1,62	-	0,82	-	-	-	-	-	-

Paramètres	R19	R20	R23
f en N.s/m			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
β en Pa/s			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
β en Pa/s			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
μv en Pa/s			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
Fc en N			
	1	1	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
ξ (s.u.)			
	1	-	1
	-	0,0697026	-
	-	21,12	-
	-	1,5	-
	-	1,49	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 13 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de parr	R4	R5	R6	R7	R11	R12	R13	R16	R17	R18
ξ (s.u.)	0,9	1,063										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	330										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	600										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0868959	-	0,0469331	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	20,95	-	21,24	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	1,87	-	1,01	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	1,82	-	0,78	-	-	-	-	-	-
Qnb en m3/s	3,78E-03	3,44E-03										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnb en m3/s	3,78E-03	4,12E-03										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0134758	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	21,45	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,29E-03										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Paramètres	R19	R20	R23
ξ (s.u.)			
	1	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
ω_0 en rad/s			
	1	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
ω_0 en rad/s			
	1	-	1
	-	0,0785316	-
	-	21,01	-
	-	1,69	-
	-	1,66	-
Q_{nb} en m ³ /s			
	1	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
Q_{nb} en m ³ /s			
	1	-	1
	-	0,0083643	-
	-	21,48	-
	-	0,18	-
	-	0,09	-
Q_{nh} en m ³ /s			
	1	-	1
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 13 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R5	R6	R7	R11	R12	R13	R16	R17	R18
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,72E-3										
Signature Théorique			-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,0153346	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	21,45	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
K1 en N/m.s	0	2,20E-11										
Signature Théorique			-	1	-	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,1096654	-	0,0822491	0,3856877	0,2699814	0,3461896	0,4131041	0,3856877	0,2546468
Instant de première détection en s			-	20,86	-	21,01	21,69	21,15	21,78	20,97	21,7	21,15
Durée totale de détection en s			-	2,36	-	1,77	8,3	5,81	7,45	8,88	8,3	5,48
Maximum des durées de détection continue en			-	2,34	-	1,51	8,01	4,38	2,14	5,84	8,01	3,94

Paramètres	R19	R20	R23
Qnh en m3/s			
	1	-	1
	-	0,0111524	-
	-	21,47	-
	-	0,24	-
	-	0,13	-
K1 en N/m.s			
	1	1	1
	0,3327138	0,1036245	0,4024164
	21,92	20,91	21,02
	7,16	2,23	8,66
	2,59	2	5,8

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 10 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R6	R11	R12	R13	R16	R17	R18	R19	R23
Qf en m3/s	0	8,83E-05										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,46096654	0,45446097	0,41171004	0,55436803	0,44981413	0,44795539	0,41356877	0,52230483
Instant de première détection en s			-	-	21,37	20,58	21,49	20,27	21,38	20,58	21,5	20,32
Durée totale de détection en s			-	-	9,92	9,77	8,86	11,77	9,68	9,64	8,9	11,21
Maximum des durées de détection continue en			-	-	9,11	6,1	8,34	10,27	9,08	5,92	8,34	7,04
Kr en A/m	40	36,5										
Signature Théorique			1	-	-	1	-	1	-	1	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr en A/m	40	43,5										
Signature Théorique			1	-	-	1	-	1	-	1	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R en s-1	32,21	25,23										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	1	1	-	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R en s-1	32,21	38,99										
Signature Théorique			-	-	1	-	-	1	1	-	-	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f en N.s/m	3,00E+06	5,85E+05										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,93447955	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	20,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	19,51	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	20,1	-	-	-	-	-	-	-	-

Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 10 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R6	R11	R12	R13	R16	R17	R18	R19	R23
f en N.s/m	3,00E+06	6,10E+07										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s	1,56E+09	1,170E+09										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,99860595	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	20,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	19,48	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	17,45	-	-	-	-	-	-	-	-
β en Pa/s	1,56E+09	2,075E+09										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,9972119	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	20,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	19,45	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	17,4	-	-	-	-	-	-	-	-
uv en Pa/s	0	0,0057										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fc en N	0	2,20E+04										
Signature Théorique			-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	0,00185874	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	36,07	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
ξ (s.u.)	0,9	0,74										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

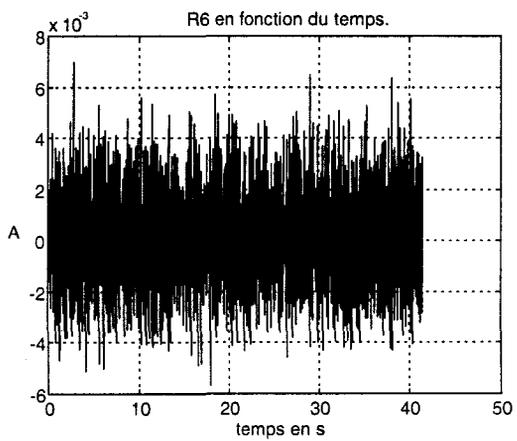
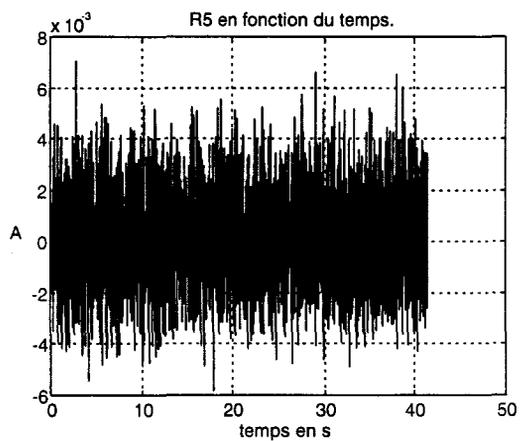
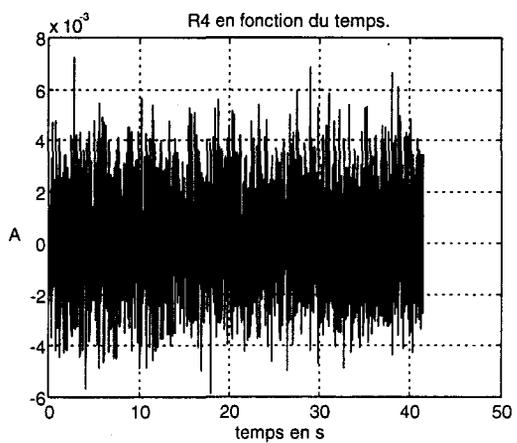
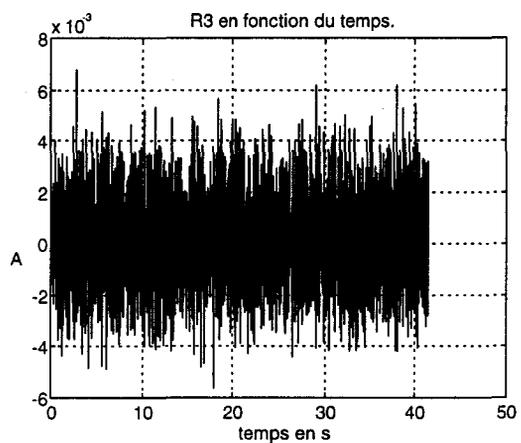
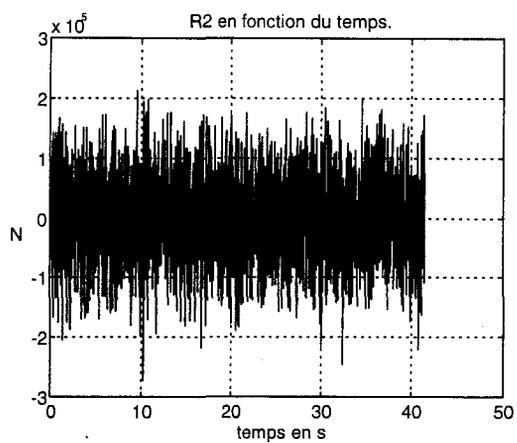
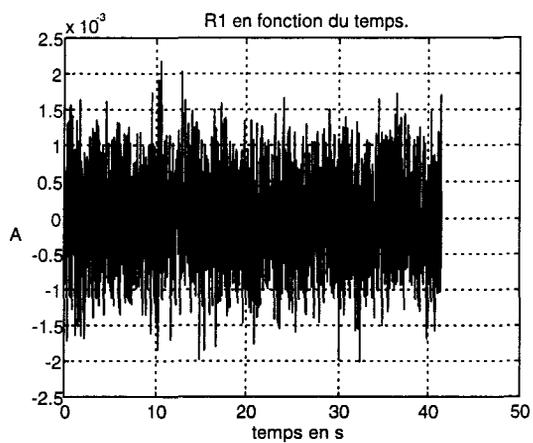
Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 10 résidus

Paramètres	Valeur Nomina	Valeur de pann	R4	R6	R11	R12	R13	R16	R17	R18	R19	R23
ξ (s.u.)	0,9	1,063										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	330										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ω en rad/s	410	600										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnb en m3/s	3,78E-03	3,44E-03										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnb en m3/s	3,78E-03	4,12E-03										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,29E-03										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

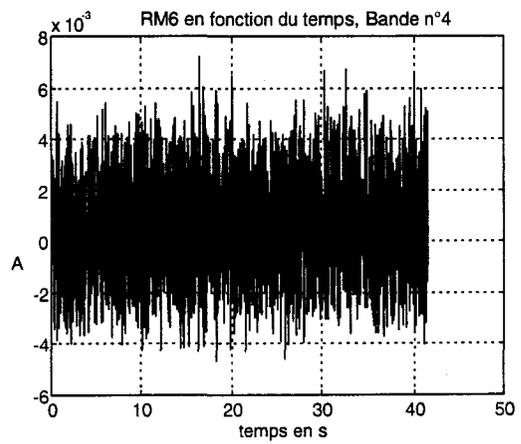
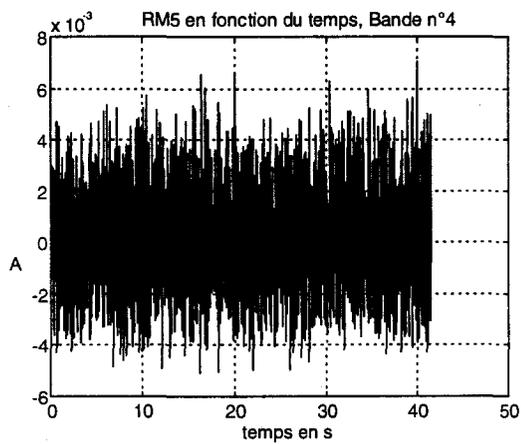
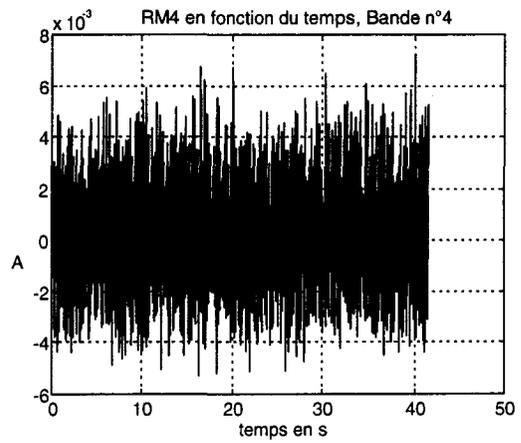
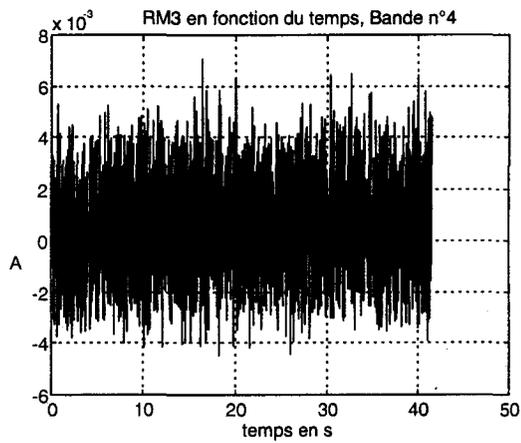
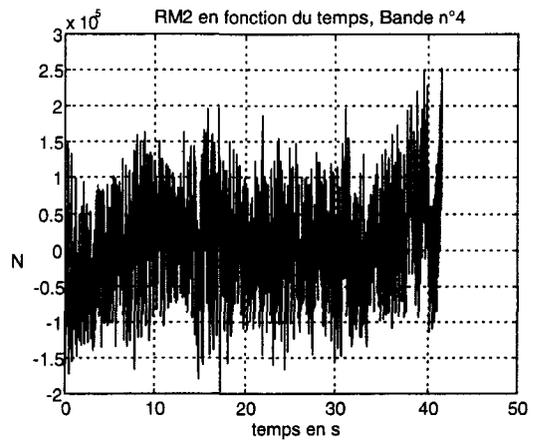
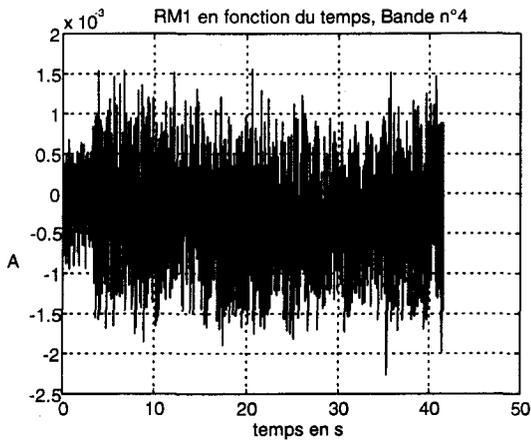
Test de Brandt pour l'instrumentation complémentaire avec 10 résidus

Paramètres	Valeur Nominal	Valeur de panne	R4	R6	R11	R12	R13	R16	R17	R18	R19	R23
Qnh en m3/s	2,50E-03	2,72E-3										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Instant de première détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durée totale de détection en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K1 en N/m.s	0	2,20E-11										
Signature Théorique			-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Moyenne (Décision(2001:4152))			-	-	0,38568773	0,26998141	0,34618959	0,41310409	0,38568773	0,25464684	0,33271375	0,40241636
Instant de première détection en s			-	-	21,69	21,15	21,78	20,97	21,7	21,15	21,92	21,02
Durée totale de détection en s			-	-	8,3	5,81	7,45	8,88	8,3	5,48	7,16	8,66
Maximum des durées de détection continue en s			-	-	8,01	4,38	2,14	5,84	8,01	3,94	2,59	5,8

Allures des résidus de simulation pour l'instrumentation initiale pour la bande n°4.



Allures des résidus de mesures pour l'instrumentation initiale pour la bande n°4.



BIBLIOGRAPHIE

- [APPE 83] : Appel U., A. V. Brandt, 'Adaptative Sequential Segmentation of Piecewise Stationary Time Series.', *Inf.Sci.*, 29, 1983.
- [BASS 86] : Basseville M, A. Benveniste, 'Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems.', LNCIS no. 77, Springer Berlin.
- [BASS 88] : Basseville M., 'Detecting Changes in Signals and Systems - A Survey.', *Automatica*, Vol. 24, No 3, pp 309-326, 1988.
- [BASS 93] : Basseville M., I. Nikiforov , 'Detection of Abrupt Changes.' , 1993.
- [BAUE 92] Bauer P.A., Cassani O., "Etude de sensibilités du modèle de serrage hydraulique.", Note LAMEF 92.N.1010, IRSID, Maizières-les-Metz, France, Feb. 1992.
- [BORN 92] Borne P., G. Dauphin-Tanguy, J-P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, "Modélisation et identification des processus." Tome1, Editions Technip, Paris 1992.
- [BORN 95] Borne P., F. Rotella, "Théorie et pratique du calcul matriciel." Editions Technip, Paris 1995.
- [CARP 96] Carpentier T., R. Litwak, "Algorithms and Criteria for Sensors Location in view of Supervision.", *CESA'96*, Vol 2, pp 684-689, Lille, France, 9-12 July 1996.
- [CASS 92a] Cassar J.P., M. Staroswiecki, P.Declerck: "Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and isolation procedures.", *System Science XI*, Wroclaw, Poland, September 1992.
- [CASS 92b] Cassar J.P., M. Staroswiecki, R. Ferhati, "Multivalued Logic Voting Scheme for Residuals Evaluation in Failure Detection and Isolation Systems", *IFAC/IMACS, Symposium on Artificial Intelligent in Real Time Control*, Delft, Netherlands, June 1992.
- [CASS 94a] Cassar J.P., R.G. Litwak, V. Cocquempot, M. Staroswiecki, "Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour des procédés industriels complexes.", *Revue Européenne de Diagnostic et Sureté de Fonctionnement*, Volume 4, n°2/1994, pp 179-202.
- [CASS 94b] Cassar J.P., R. Ferhati, R. Woinet, "Fault Detection and Isolation System Design for a Refinery Unit.", *Safe Process'94 IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, Espoo, Finland, June 13-15, 1994, pp 183-188.
- [CASS 94c] Cassar J.P., M. Staroswiecki, "Advanced Design of the Decision procedure in Failure Detection and Isolation Systems", in *Safeprocess'94*, pp 380-385, June 13-16 1994, Espoo, Finland.
- [CASS 97] Cassar J.P., M. Staroswiecki, " A Structural Approach for the Design of Failure Detection and Identification Systems", in "Control of Industrial Systems", Belfort, France, 20 - 22 mai 1997, pp. 329 - 334
- [CHOW 84] Chow E.Y., A.S. Willsky, "Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems.", *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-29 n°7, July 1984.
- [CLAR 67] Clarke D.W., "Generalized Least Squares Estimation of Parameters of a Dynamic Model.", 1st IFAC Symposium on Identification in Automatic Control Systems, Prague, 1967.
- [COCQ 93] Cocquempot V., "Surveillance des Processus Industriels Complexes: Génération et Optimisation des Relations de Redondance Analytique.", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 18 février 1993.
- [COMT 97] Comtet-Varga G., "Surveillance des systèmes non-linéaires. Application à la machine asynchrone", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 02 décembre 1997.
- [DECL 91] Declerck P., "Analyse structurale et fonctionnelle des grands systèmes. Application à une centrale PWR 900 MW.", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 20 décembre 1991.

- [DELM 96] Delmaire G., "Comparaison des méthodes d'identification paramétrique et de l'espace de parité pour la détection et la localisation de défaillances dans les systèmes automatisés.", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, France, 22 Janvier 1996.
- [DING 89] Ding, X., P.M. Frank, "Fault Detection via Adaptive Observers based on Orthogonal Functions.", IFAC-IMACS-IFORS Symposium on Advanced Information Processing in Automatic Control, AIPAC'89, Nancy, France, 3-7 July 1989.
- [DING 90] Ding X. and Frank P.M., "Fault detection via factorisation approach.", Syst. Control Letters, vol 14, pp 431-436.
- [DIOP 95] Diop S., J.W. Grizzle, A. Stephanopoulou, "On Numerical Differentiation Observers.", Développement récents en non-linéaire, Cachan, 15-16 Juin 1995, pp 25-41.
- [DULM 58] Dulmage A.L., N.S. Mendelshon, "Covering of bipartite graphs.", Canadian journal of mathematic, vol 10, 1958, pp 517-534.
- [FRAN 88] Frank P.M., B. Köppen, J. Wünnenberg, "General Solution of the Robustness Problem in Linear Fault Detection Filters." Proceeding of the Conference ECC 91, Grenoble, France, July 2-5, 1991, pp 1407-1412.
- [GEHI 94] Géhin A-L., "Analyse fonctionnelle et modèle générique des capteurs intelligents. Application à la surveillance de l'anesthésie.", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Janvier 1994.
- [GERT 88] Gertler J.J., "Survey on model base failure detection and isolation in complex plants.", IEEE Control System Magazine, December 1988, pp 3-11.
- [GEVE 95] : Gevers M., "Identification for control", Plenary lecture, ACAPS 95, Budapest, June 1995, pp 1-12.
- [GOND 79] Gondran M., M. Minoux, "Graphes et Algorithmes", Eyrolles, Paris 1979.
- [GUER 97] Guernez C., M. Petitot, J.P. Cassar, M. Staroswiecki, "Fault Detection and Isolation on Non Linear Polynomial Systems", 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics, Berlin, Allemagne, 24 - 29 Août 1997
- [HINK 71] : Hinkley D. V., "Inference about the Change-Point from Cumulative sum tests". Biometrika, 58, pp 509-523, 1971.
- [HOLZ 92] Holz P., "Détection d'évènements dans les signaux temporels - Application à la surveillance d'un train de laminage à chaud.", Mémoire CNAM, Université de Nancy I, Metz le 20 Mars 1992.
- [HUYN 91] Huynh C. T., B. Cordier, J. Ph. Cassar, M. Staroswiecki, E. Herbault, "Supervision System Design for a Petroleum Application.", Safe Process'91 IFAC Symposium, Baden-Baden, Germany, September 1991, pp 289-294.
- [ISER 84] Isermann R., "Process Fault Detection Based on Modeling Estimation Methods. A Survey.", Automatica, vol. 20 n°4, pp 387-404, 1984.
- [ISER 96] Isermann R., P. Ballé, "Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes.", IFAC'96, Vol. N, pp 1-12, June 30-July 5 1996, San Francisco, USA.
- [KOBU 92] Kobushi T., F. Nashimura, D. Yoshika, K. Hanasaki, H. Katofushi, "Fault localisation expert system for hydraulic screw-down of tandem cold mill at Kashima Steel Works.", The Sumimoto Search, n° 50, July 1992.
- [LJUN 87] Ljung L., "System Identification. Theory for the User.", Prentice Hall, Information and System Sciences Series, Englewoods Cliffs, New Jersey, 1987.
- [LUON 96] Luong M. "Conception optimale de l'architecture d'un système d'instrumentation sous contraintes de diagnostic, de fiabilité et de disponibilité", Thèse de doctorat, Institut National de Polytechnique de Lorraine, Décembre 1996.

- [NIKI 86] : Nikiforov I. V., 'Sequential Detection of Changes in Dynamic Systems.', in Basseville M, A. Benveniste, 'Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems.', Chapter 7, pp 216-258, LNCIS no. 77, Springer Berlin.
- [PAGE 54] : Page E. S., Continuous Inspection Schemes. *Biometrika*, 41, pp 100-115, 1954.
- [PATT 89a] Patton R.J., P.M. Frank, R.N. Clark, "Fault Diagnosis in Dynamical Systems, Theory and Application.", Prentice Hall, 1989.
- [PATT 89b] Patton R.J., S.M. Kang'ethe, "Sensor fault detection in dynamic system using Robust Observers.", AIPAC'89 IFAC, Symposium on Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, Juillet 1989.
- [PETE 89] Peter K. And R. Isermann, "Parameter-adaptative Control based on Continuous-time Process Models", 3rd IFAC Symposium on Adaptative Systems in Control and Signal Processing, Glasgow, (UK), 1989.
- [PETI 94a] Petit B., J. Aussillous, F. Druart, G. Dussart, B. Vinatier, "Overall Analysis of Thickness Success in Sollac Hot Strip Mills.", METEC Congress 94, 6th International Rolling Conference, Düsseldorf, June 20-22, 1994.
- [PETI 94b] Petit B., "Bilan du Groupe Epaisseur pour le TAB Français.", Rapport Interne IRSID, Avril 1994.
- [PETI 97] Petit B., "Modélisation d'une cage horizontale pour le laminage de produits plats à chaud : cédage au centre et méthodologie associée.", Rapport CESSID de formation, Janvier 1997.
- [POTT 77] Potter J.E., M.C. Suman, "Thresholdless redundancy management with array of skewed instrument.", *Electronic Flight Control System*, Agadograph, 224, 1977, pp 15-25.
- [RAGO 90] : Ragot J., Darouach M, Maquin D., Bloch G. 'Validation de données et diagnostic.', Hermès, Paris, 1990.
- [ROY 70] Roy B., "Algèbre moderne et théories des graphes", Dunod, Paris, 1970.
- [SAPO 90] Saporta G., 'Probabilités, analyse de données et statistiques.', Editions Technip, Paris, 1990.
- [SCHE 94] Schei T.S., 'Automatic Tuning of PID Controllers Based on Transfer Function Estimation.', *Automatica*, Vol.30, n°12, pp 1983-1939, 1994.
- [SPRÖ 92] Sprösser T., "Contribution à l'étude des méthodes de détection de défauts par redondance analytique.", Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, 16 Décembre 1992.
- [STAR 89] Staroswiecki M., P. Declerck, "Analytical Redundancy in non Linear Interconnected Systems by Means of Structural Analysis.", AIPAC'89 IFAC Symposium on Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, France, 3-5 July, 1989, p II 23-27.
- [STAR 94] Staroswiecki M., M. Bayart, "Actioneurs Intelligents", Hermès, Paris, 1994.
- [VDH 95] : Van Den Hof P. M. J., R. J. P. Schrama, "Identification and Control - Closed-loop Issues", *Automatica*, vol 31, n° 12, 1995, pp 1751-1770.
- [VOZE 94] : Vozel B., " Etude comparative d'algorithmes récursifs de détection de ruptures spectrales.", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, Université de Nantes, 17 février 1994.
- [WILL 76a] : Willsky A. S., "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems." *Automatica*, 12, pp 601-611, 1976.
- [WILL 76b] : Willsky A. S., H. L. Jones, 'A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems.', *IEEE Trans. Automatic Control*, 21, 1976, pp108-112.

