



**HAL**  
open science

# Approche du bruit magnétomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative

Malloum Soultan

► **To cite this version:**

Malloum Soultan. Approche du bruit magnétomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative. Mécanique [physics.med-ph]. INSA de Lyon, 2002. Français. NNT : . tel-00006593

**HAL Id: tel-00006593**

**<https://theses.hal.science/tel-00006593>**

Submitted on 27 Jul 2004

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

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

*Thèse*



Approche du bruit magnétomécanique,  
application au suivi de la fatigue en  
flexion rotative



*Présentée devant*

L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

*Pour obtenir*

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Microstructure et comportement mécanique  
et macroscopique des matériaux-Génie des matériaux

École doctorale : Matériaux de Lyon

*Par*

**Malloum SOULTAN**

Soutenue le 06 Décembre 2002 devant la Commission d'examen

**Jury MM.**

---

	M. BARKA	Maître Assistant (Université de N'Djaména)
Directeur	J. CHICOIS	Maître de Conférences HC (INSA de Lyon)
Rapporteur	J. DEGAUQUE	Professeur (INSA de Toulouse)
Rapporteur	P. FLEISCHMANN	Professeur (INSA de Rennes)
	X. KLEBER	Maître de Conférences (INSA de Lyon)
Président	A. VINCENT	Professeur (INSA de Lyon)

**Laboratoire GEMPPM de l'INSA de Lyon.**



## ***INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON***

### *Directeur :*

STORCK A.

### *Professeurs :*

AUDISIO S.	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
BABOT D.	CONT. NON DESTR. PAR RAYONNEMENT IONISANTS
BABOUX J.C.	GEMPPM***
BALLAND B.	PHYSIQUE DE LA MATIERE
BAPTISTE P.	PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS
BARBIER D.	PHYSIQUE DE LA MATIERE
BASTIDE J.P.	LAEPSI****
BAYADA G.	MODELISATION MATHEMATIQUE ET CALCUL SCIENTIFIQUE
BENADDA B.	LAEPSI****
BETEMPS M.	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
BIENNIER F.	PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS
BLANCHARD J.M.	LAEPSI****
BOISSON C.	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
BOIVIN M. (Prof. émérite)	MECANIQUE DES SOLIDES
BOTTA H.	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Développement Urbain
BOTTA-ZIMMERMANN M. (Mme)	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Développement Urbain
BOULAYE G. (Prof. émérite)	INFORMATIQUE
BOYER J.C.	MECANIQUE DES SOLIDES
BRAU J.	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Thermique du bâtiment
BREMOND G.	PHYSIQUE DE LA MATIERE
BRISAUD M.	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
BRUNET M.	MECANIQUE DES SOLIDES
BRUNIE L.	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
BUREAU J.C.	CEGELY*
CAVAILLE J.Y.	GEMPPM***
CHANTE J.P.	CEGELY*- Composants de puissance et applications
CHOCAT B.	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Hydrologie urbaine
COMBESURE A.	MECANIQUE DES CONTACTS
COUSIN M.	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures
DAUMAS F. (Mme)	CETHIL – Energétique et Thermique
DOUTHEAU A.	CHIMIE ORGANIQUE
DUFOUR R.	MECANIQUE DES STRUCTURES
DUPUY J.C.	PHYSIQUE DE LA MATIERE
EMPTOZ H.	RECONNAISSANCE DES FORMES ET VISION
ESNOUF C.	GEMPPM***
EYRAUD L. (Prof. émérite)	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
FANTOZZI G.	GEMPPM***
FAVREL J.	PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS
FAYARD J.M.	BIOLOGIE APPLIQUEE
FAYET M.	MECANIQUE DES SOLIDES
FERRARIS-BESSO G.	MECANIQUE DES STRUCTURES
FLAMAND L.	MECANIQUE DES CONTACTS
FLORY A.	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
FOUGERES R.	GEMPPM***
FOUQUET F.	GEMPPM***
FRECON L.	INFORMATIQUE
GERARD J.F.	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
GERMAIN P.	LAEPSI****
GIMENEZ G.	CREATIS**
GOBIN P.F. (Prof. émérite)	GEMPPM***
GONNARD P.	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
GONTRAND M.	CEGELY*- Composants de puissance et applications
GOUTTE R. (Prof. émérite)	CREATIS**
GOUJON L.	GEMPPM***
GOURDON R.	LAEPSI****
GRANGE G.	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
GUENIN G.	GEMPPM***
GUICHARDANT M.	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
GUILLOT G.	PHYSIQUE DE LA MATIERE
GUINET A.	PRODUCTIQUE ET INFORMATIQUE DES SYSTEMES MANUFACTURIERS
GUYADER J.L.	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
GUYOMAR D.	GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE

<b>HEIBIG A.</b>	LAB. MATHEMATIQUE APPLIQUEES LYON
<b>JACQUET RICHARDET G.</b>	MECANIQUE DES STRUCTURES
<b>JAYET Y.</b>	GEMPPM***
<b>JOLION J.M.</b>	RECONNAISSANCE DES FORMES ET VISION
<b>JULLIEN J.F.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures
<b>JUTARD A. (Prof. émérite)</b>	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>KASTNER R.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Géotechnique
<b>KOULOUMDJIAN J.</b>	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
<b>LAGARDE M.</b>	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
<b>LALANNE M. (Prof. émérite)</b>	MECANIQUE DES STRUCTURES
<b>LALLEMAND A.</b>	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Energétique et thermique
<b>LALLEMAND M. (Mme)</b>	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Energétique et thermique
<b>LAREAL P.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Géotechnique
<b>LAUGIER A.</b>	PHYSIQUE DE LA MATIERE
<b>LAUGIER C.</b>	BIOCHIMIE ET PHARMACOLOGIE
<b>LEJEUNE P.</b>	GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
<b>LUBRECHT A.</b>	MECANIQUE DES CONTACTS
<b>MAZILLE H.</b>	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
<b>MERLE P.</b>	GEMPPM***
<b>MERLIN J.</b>	GEMPPM***
<b>MIGNOTTE A. (Mle)</b>	INGENIERIE, INFORMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>MILLET J.P.</b>	PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
<b>MIRAMOND M.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Hydrologie urbaine
<b>MOREL R.</b>	MECANIQUE DES FLUIDES
<b>MOSZKOWICZ P.</b>	LAEPSI****
<b>MOURA A.</b>	GEMPPM***
<b>NARDON P. (Prof. émérite)</b>	BIOLOGIE APPLIQUEE
<b>NIEL E.</b>	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>NORTIER P.</b>	DREP
<b>ODET C.</b>	CREATIS**
<b>OTTERBEIN M. (Prof. émérite)</b>	LAEPSI****
<b>PASCAULT J.P.</b>	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
<b>PAVIC G.</b>	VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
<b>PELLETIER J.M.</b>	GEMPPM***
<b>PERA J.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Matériaux
<b>PERRIAT P.</b>	GEMPPM***
<b>PERRIN J.</b>	ESCHIL – Equipe Sciences Humaines de l'Insa de Lyon
<b>PINARD P. (Prof. émérite)</b>	PHYSIQUE DE LA MATIERE
<b>PINON J.M.</b>	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
<b>PONCET A.</b>	PHYSIQUE DE LA MATIERE
<b>POUSIN J.</b>	MODELISATION MATHEMATIQUE ET CALCUL SCIENTIFIQUE
<b>PREVOT P.</b>	GRACIMP – Groupe de Recherche en Apprentissage, Coopération et Interfaces Multimodales pour la Productique
<b>PROST R.</b>	CREATIS**
<b>RAYNAUD M.</b>	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Transferts Interfaces et Matériaux
<b>REDARCE H.</b>	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>REYNOUARD J.M.</b>	UNITE DE RECHERCHE EN GENIE CIVIL - Structures
<b>RIGAL J.F.</b>	MECANIQUE DES SOLIDES
<b>RIEUTORD E. (Prof. émérite)</b>	MECANIQUE DES FLUIDES
<b>ROBERT-BAUDOY J. (Mme) (Prof. émérite)</b>	GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES
<b>ROUBY D.</b>	GEMPPM***
<b>ROUX J.J.</b>	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON – Thermique de l'Habitat
<b>RUBEL P.</b>	INGENIERIE DES SYSTEMES D'INFORMATION
<b>RUMELHART C.</b>	MECANIQUE DES SOLIDES
<b>SACADURA J.F.</b>	CENTRE DE THERMIQUE DE LYON - Transferts Interfaces et Matériaux
<b>SAUTEREAU H.</b>	MATERIAUX MACROMOLECULAIRES
<b>SCAVARDA S.</b>	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>SOUROUILLE J.L.</b>	INGENIERIE INFORMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>THOMASSET D.</b>	AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
<b>UBEDA S.</b>	CENTRE D'INNOV. EN TELECOM ET INTEGRATION DE SERVICES
<b>THUDEROZ C.</b>	ESCHIL – Equipe Sciences Humaines de l'Insa de Lyon
<b>UNTERREINER R.</b>	CREATIS**
<b>VELEX P.</b>	MECANIQUE DES CONTACTS
<b>VIGIER G.</b>	GEMPPM***
<b>VINCENT A.</b>	GEMPPM***
<b>VRAY D.</b>	CREATIS**
<b>VUILLERMOZ P.L. (Prof. émérite)</b>	PHYSIQUE DE LA MATIERE

*Directeurs de recherche C.N.R.S. :*

<b>BERTHIER Y.</b>	MECANIQUE DES CONTACTS
<b>CONDEMINÉ G.</b>	UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE
<b>COTTE-PATAT N. (Mme)</b>	UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE
<b>FRANCIOSI P.</b>	GEMPPM***
<b>MANDRAND M.A. (Mme)</b>	UNITE MICROBIOLOGIE ET GENETIQUE
<b>POUSIN G.</b>	BIOLOGIE ET PHARMACOLOGIE

**ROCHE A.**  
**SEGUELA A.**

MATERIAUX MACROMOLECULAIRES  
GEMPPM\*\*\*

*Directeurs de recherche I.N.R.A. :*

**FEBVAY G.**  
**GRENIER S.**  
**RAHBE Y.**

BIOLOGIE APPLIQUEE  
BIOLOGIE APPLIQUEE  
BIOLOGIE APPLIQUEE

*Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :*

**PRIGENT A.F. (Mme)**  
**MAGNIN I. (Mme)**

BIOLOGIE ET PHARMACOLOGIE  
CREATIS\*\*

\* **CEGELY** CENTRE DE GENIE ELECTRIQUE DE LYON

\*\* **CREATIS** CENTRE DE RECHERCHE ET D'APPLICATIONS EN TRAITEMENT DE L'IMAGE ET DU SIGNAL

\*\*\***GEMPPM** GROUPE D'ETUDE METALLURGIE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATERIAUX

\*\*\*\***LAEPSI** LABORATOIRE D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES PROCEDES ET SYSTEMES INDUSTRIELS

## Ecoles Doctorales et Diplômes d'Etudes Approfondies

### habilités pour la période 1999-2003

ECOLES DOCTORALES n° code national	RESPONSABLE PRINCIPAL	CORRESPONDANT INSA	DEA INSA n° code national	RESPONSABLE DEA INSA
<b>CHIMIE DE LYON</b>  (Chimie, Procédés, Environnement)  EDA206	M. D. SINOUC UCBL1 04.72.44.62.63 Sec 04.72.44.62.64 Fax 04.72.44.81.60	<b>M. R. GOURDON</b> 87.53 Sec 84.30 Fax 87.17	Chimie Inorganique <b>910643</b>	
			Sciences et Stratégies Analytiques <b>910634</b>	
			Sciences et Techniques du Déchet <b>910675</b>	M. R. GOURDON Tél 87.53 Fax 87.17
<b>ECONOMIE, ESPACE ET MODELISATION DES COMPORTEMENTS</b>  (E <sup>2</sup> MC)  EDA417	M.A. BONNAFOUS LYON 2 04.72.72.64.38 Sec 04.72.72.64.03 Fax 04.72.72.64.48	<b>Mme M. ZIMMERMANN</b> 84.71 Fax 87.96	Villes et Sociétés <b>911218</b>	Mme M. ZIMMERMANN Tél 84.71 Fax 87.96
			Dimensions Cognitives et Modélisation <b>992678</b>	M. L. FRECON Tél 82.39 Fax 85.18
<b>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b>  (E.E.A.)  EDA160	M. G. GIMENEZ INSA DE LYON 83.32 Fax 85.26		Automatique Industrielle <b>910676</b>	M. M. BETEMPS Tél 85.59 Fax 85.35
			Dispositifs de l'Electronique Intégrée <b>910696</b>	M. D. BARBIER Tél 85.47 Fax 60.81
			Génie Electrique de Lyon <b>910065</b>	M. J.P. CHANTE Tél 87.26 Fax 85.30
			Images et Systèmes <b>992254</b>	Mme I. MAGNIN Tél 85.63 Fax 85.26
<b>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</b>  (E2M2)  EDA403	<b>M. J.P FLANDROIS</b> UCBL1 04.78.86.31.50 Sec 04.78.86.31.52 Fax 04.78.86.31.49	<b>M. S. GRENIER</b> 79.88 Fax 85.34	Analyse et Modélisation des Systèmes Biologiques <b>910509</b>	M. S. GRENIER Tél 79.88 Fax 85.34
<b>INFORMATIQUE ET INFORMATION POUR LA SOCIETE</b>  (EDIIS)  EDA 407	M. J.M. JOLION INSA DE LYON 87.59 Fax 80.97		Documents Multimédia, Images et Systèmes d'Information Communicants <b>992774</b>	M. A. FLORY Tél 84.66 Fax 85.97
			Extraction des Connaissances à partir des Données <b>992099</b>	M. J.F. BOULICAUT Tél 89.05 Fax 87.13
			Informatique et Systèmes Coopératifs pour l'Entreprise <b>950131</b>	M. A. GUINET Tél 85.94 Fax 85.38
<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</b>  (EDISS)  EDA205	<b>M. A.J. COZZONE</b> UCBL1 04.72.72.26.72 Sec 04.72.72.26.75 Fax 04.72.72.26.01	<b>M. M. LAGARDE</b> 82.40 Fax 85.24	Biochimie <b>930032</b>	M. M. LAGARDE Tél 82.40 Fax 85.24
<b>MATERIAUX DE LYON</b>  UNIVERSITE LYON 1  EDA 034	M. J. JOSEPH ECL 04.72.18.62.44 Sec 04.72.18.62.51 Fax 04.72.18.60.90	<b>M. J.M. PELLETIER</b> 83.18 Fax 84.29	Génie des Matériaux : Microstructure, Comportement Mécanique, Durabilité <b>910527</b>	M. J.M.PELLETIER Tél 83.18 Fax 85.28
			Matériaux Polymères et Composites <b>910607</b>	M. H. SAUTEREAU Tél 81.78 Fax 85.27
			Matière Condensée, Surfaces et Interfaces <b>910577</b>	M. G. GUILLOT Tél 81.61 Fax 85.31
<b>MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE FONDAMENTALE</b>  (Math IF)  EDA 409	M. NICOLAS UCBL1 04.72.44.83.11 Fax 04.72.43.00.35	<b>M. J. POUSIN</b> 88.36 Fax 85.29	Analyse Numérique, Equations aux dérivées partielles et Calcul Scientifique <b>910281</b>	M. G. BAYADA Tél 83.12 Fax 85.29
<b>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b>  (MEGA)  EDA162	M. J. BATAILLE ECL 04.72.18.61.56 Sec 04.72.18.61.60 Fax 04.78.64.71.45	<b>M. G.DALMAZ</b> 83.03 Fax 04.72.89.09.80	Acoustique <b>910016</b>	M. J.L. GUYADER Tél 80.80 Fax 87.12
			Génie Civil <b>992610</b>	M. J.J.ROUX Tél 84.60 Fax 85.22
			Génie Mécanique <b>992111</b>	M. G. DALMAZ Tél 83.03 Fax 04.78.89.09.80
			Thermique et Energétique <b>910018</b>	M. J. F. SACADURA Tél 81.53 Fax 88.11

En grisé : Les Ecoles doctorales et DEA dont l'INSA est établissement principal

## **AVANT-PROPOS**

*Un accord de coopération inter-universitaire lie l'Université de N'Djaména à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA de Lyon). Dans ce cadre, en tant qu'enseignant à la Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, j'ai déjà préparé et obtenu un DEA en matériaux à l'INSA de Lyon. Par la suite, il m'a été proposé de préparer une thèse au sein de l'équipe Plasticité-Endommagement du Groupe d'Etude de Métallurgie Physique et Physique des Matériaux (GEMPPM) sur un sujet pouvant permettre un développement expérimental dans mon pays. Ce travail a été possible grâce à une bourse de thèse en alternance (trois fois trois mois) de la coopération française, un financement sur l'accord inter-universitaire et une contribution de l'Université de N'Djaména. Je suis très reconnaissant à toutes les personnes qui ont rendu cette collaboration possible.*

*J'exprime ma gratitude à Messieurs les Professeurs R. FOUGERES et J.Y. CAVAILLE, directeurs successifs du GEMPPM, pour m'avoir accueilli avec bienveillance dans leur laboratoire.*

*Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de thèse, Monsieur J. CHICOIS, pour tout ce qu'il m'a apporté, sur tous les plans. Il n'a cessé durant ces quelques années passées ensemble en France et au Tchad, de me faire profiter de ses connaissances et expériences. Je lui serai toujours reconnaissant de l'amitié, de la sympathie et de la confiance qu'il m'a toujours témoignées. Rien que pour ses conseils, son soutien permanent, son paternalisme je referai ce travail.*

*Je voudrais adresser mes remerciements à Monsieur le Professeur A. VINCENT, responsable du Groupe Métaux et Alliages et à Monsieur X. KLEBER qui ont bien voulu co-encadrer ce travail et m'avoir sans cesse prodigué leurs judicieux conseils. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance. Je n'oublie pas Monsieur G. LORMAND pour ses conseils dans le domaine de la programmation.*

*Je suis très reconnaissant envers Messieurs les Professeurs J. DEGAUQUE et P. FLEISCHMANN, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse et de participer au Jury.*

*Je remercie Monsieur Mahamat BARKA, secrétaire général de l'Université de N'Djaména pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en acceptant d'être membre du jury. De même, je remercie tous mes collègues enseignants de la Faculté des Sciences et Exactes et Appliquées qui de près ou de loin m'ont aidé dans ce travail.*

*Il m'est agréable de témoigner toute ma gratitude à Mme V. CHASSERGUE, secrétaire du Groupe pour sa disponibilité, pour sa sympathie et pour tous les services qu'elle m'a rendus toujours avec le sourire. Monsieur K. BENAZIZA, technicien du Groupe, mérite également ma reconnaissance.*

*Enfin, je ne saurai finir sans remercier tout le personnel du GEMPPM (chercheurs, techniciens, secrétaires) qui, de près ou de loin, a contribué à ce travail, ainsi que mes collègues (les deux Christine, David, Hervé, Henri, Jean Christophe, Jérôme, Laurent, Mahmoud, Stéphane) pour l'ambiance amicale que j'ai trouvée durant mes séjours au sein de l'équipe.*



# Table des matières



<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	17
<b>CHAPITRE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	21
<b>1 INTRODUCTION :</b> .....	25
<b>2 MAGNÉTISME EN L'ABSENCE D'EXCITATION</b> .....	25
2.1 MAGNETISME A L'ECHELLE ATOMIQUE .....	25
2.2 MAGNETISME A L'ECHELLE DE L'AGREGAT D'ATOMES. ....	26
2.3 FERROMAGNETISME A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE .....	27
2.3.1 <i>Energie d'échange</i> .....	28
2.3.2 <i>Energie d'anisotropie magnétocristalline</i> .....	29
2.3.3 <i>Energie magnétoélastique</i> .....	30
2.3.4 <i>Energie magnétostatique</i> .....	31
2.3.5 <i>Energies des parois</i> .....	33
2.4 MODELISATION :.....	34
2.5 OBSERVATION DES DOMAINES ET DES PAROIS .....	35
2.5.1 <i>Méthode des poudres</i> .....	35
2.5.2 <i>Effet magnéto-optique KERR</i> .....	35
2.6 MAGNETISME DANS LE CAS DU FER A BAS CARBONE .....	36
<b>3 EXCITATION MAGNÉTIQUE AXIALE</b> .....	38
3.1 PROCESSUS DE MAGNETISATION .....	38
3.1.1 <i>Courbe de première aimantation</i> .....	38
3.1.2 <i>Cycle d'hystéresis</i> .....	39
3.2 BRUIT BARKHAUSEN .....	40
<b>4 EXCITATION PAR UNE CONTRAINTE MÉCANIQUE AXIALE</b> .....	43
4.1 INTERACTION CONTRAINTE / MICROSTRUCTURE MAGNETIQUE.....	43
4.2 BRUIT MAGNETOMECHANIQUE .....	45
<b>5 PRINCIPAUX RÉSULTATS NÉCESSAIRES À L'INTERPRÉTATION DE NOS EXPÉRIENCES</b> .....	47
5.1 ETUDES MENEES AUX MOYENS DE LA MESURE BARKHAUSEN .....	47
5.1.1 <i>Influence de la microstructure</i> .....	47
5.1.2 <i>Influence des précipitations</i> .....	49
5.1.3 <i>Influence de l'état de contrainte</i> .....	50
5.2 RESULTATS OBTENUS PAR MESURE DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE (BMM).....	52
5.2.1 <i>Traction monotone dans le domaine élastique</i> .....	53
5.2.2 <i>Application d'une contrainte cyclique Traction Compression</i> .....	54
5.2.3 <i>caractérisation de la déformation plastique par BMM</i> .....	55
5.2.4 <i>Caractérisation de la fatigue par BMM</i> .....	55
5.2.5 <i>Contrainte cyclique de cisaillement</i> .....	56
<b>6 RESULTATS RELATIFS A LA FATIGUE DES ACIERS</b> .....	57

6.1	ASPECTS MICROSTRUCTURURAUX .....	57
6.1.1	<i>Fatigue des aciers type « Basse température »</i> .....	58
6.1.2	<i>fatigue des aciers type « Haute température »</i> .....	59
6.2	CARACTERISATION DE LA FATIGUE PAR BRUIT FERROMAGNETIQUE .....	59
6.3	RESULTAT DU SUIVI EN FATIGUE PAR MESURE DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE. ....	61
7	CONCLUSION.....	62
<b>CHAPITRE II : APPROCHES GENERALES SUR LE BRUIT MAGNETOMECHANIQUE.....</b>		<b>63</b>
1	INTRODUCTION.....	67
2	ESSAIS SUR MACHINE DE FATIGUE EN UTILISANT LA CHAÎNE DE MESURE BARKHAUSEN.....	67
2.1	CONDITIONS EXPERIMENTALES COMMUNES .....	67
2.2	FAISABILITE ET REPRODUCTIBILITE DE L'ESSAI .....	67
2.3	INFLUENCE DE LA VITESSE DE SOLlicitATION.....	71
2.4	INFLUENCE DE L'ETAT METALLURGIQUE SUR LE BMM.....	73
2.4.1	<i>Echantillons et microstructures</i> .....	73
2.4.2	<i>Mesures magnétomécaniques</i> .....	74
2.4.3	<i>Mesures Barkhausen</i> .....	75
2.4.4	<i>Mesures de pouvoir thermo-électrique (PTE)</i> .....	78
2.4.5	<i>Récapitulatif et Interprétations</i> .....	79
2.4.6	<i>Remarques et interprétations</i> .....	79
2.4.7	<i>Conclusion</i> .....	81
3	OBSERVATION DES DOMAINES : EFFET DES CONTRAINTES. ....	82
3.1	RAPPEL SUR L'INTERPRETATION DES IMAGES OBTENUES AU MOYEN DU MICROSCOPE A EFFET KERR. ....	82
3.2	EFFET DE L'APPLICATION D'UNE CONTRAINTE IN SITU SOUS LE MICROSCOPE A EFFET KERR .....	83
3.3	EFFET D'UNE DEFORMATION PLASTIQUE SUR LA STRUCTURE MICROMAGNETIQUE ET OBSERVATION AU MICROSCOPE A EFFET KERR APRES DECHARGEMENT . ....	86
3.3.1	<i>Caractérisation de l'état initial</i> .....	86
3.3.2	<i>Etat déformé plastiquement à 0,38% caractérisation immédiatement après déchargement plan d'incidence parallèle à l'axe de l'éprouvette.</i> .....	86
3.3.3	<i>Etat déformé plastiquement à 0,38%, plan d'incidence perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.</i> .....	87
3.3.4	<i>Conclusion</i> .....	88
4	INTERPRETATION ET MODÉLISATION QUALITATIVE.....	89
4.1	INTRODUCTION.....	89
4.2	UTILISATION D'UN MODELE A TROIS DIMENSIONS.....	91
4.3	INTERPRETATION QUALITATIVE DES OBSERVATIONS .....	91
4.3.1	<i>Essai sous contrainte de traction</i> .....	92
4.3.2	<i>Essai sous contrainte de compression</i> .....	93

<i>Essai après déformation plastique</i> .....	94
4.4 EXEMPLE DE MODELISATION PERMETTANT D'ILLUSTER LA MODIFICATION DE L'ORIENTATION DE DOMAINES PRINCIPAUX PAR CREATION ET MOUVEMENTS DES PAROIS DE BLOCH A 90° .....	95
<b>5 CONCLUSION</b> .....	97
<b>CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL MATERIAUX UTILISES</b> .....	99
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	103
<b>2 CHAINE DE MESURE</b> .....	104
2.1 CHAINE DE MESURE DU BRUIT MAGNETO MECANIQUE .....	104
2.1.1 <i>Chaîne Barkhausen – Chaîne Magnétomécanique (les différences)</i> .....	104
2.2 DESCRIPTIF DE NOTRE EQUIPEMENT DE MESURE DE BRUIT MAGNETOMECHANIQUE.....	106
2.2.1 <i>Capteurs</i> .....	107
2.2.2 <i>Préamplificateur</i> .....	108
2.2.3 <i>Ampli filtre</i> .....	109
2.2.4 <i>Mesure de la valeur efficace</i> .....	111
2.2.5 <i>Acquisition</i> .....	112
<b>3 MOYEN D'EXCITATION MECANIQUE</b> .....	114
3.1 PRINCIPE DES ESSAIS DE FLEXION ROTATIVE .....	114
3.2 MACHINE DE FLEXION ROTATIVE .....	115
3.2.1 <i>Principe</i> .....	116
3.2.2 <i>Etalonnage</i> .....	117
3.3 EPROUVETTES .....	118
<b>4 MATÉRIAUX CONSTITUANT LES EPROUVETTES</b> .....	119
4.1 FER ARMC0.....	119
4.1.1 <i>Analyse chimique</i> .....	119
4.1.2 <i>Micrographie optique</i> .....	119
4.1.3 <i>Propriétés mécanique</i> .....	120
4.2 ACIER XC55 .....	120
4.2.1 <i>Analyse Chimique</i> .....	120
4.2.2 <i>Micrographie</i> .....	120
4.2.3 <i>Propriétés mécaniques</i> .....	120
<b>5 OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE MESURE</b> .....	121
5.1 LES MASSES.....	121
5.2 CHOIX DU FILTRE (OPTIMISATION DU RAPPORT SIGNAL/BRUIT) .....	121
5.2.1 <i>Origine du bruit</i> .....	121
5.2.2 <i>Etude des bruits</i> .....	122
5.3 INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION SUR LE BRUIT.....	124
5.4 ULTIME VERIFICATION .....	125
<b>6 CONCLUSION</b> .....	125

<b>CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE LA FATIGUE.....</b>	<b>127</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>131</b>
<b>2 PARAMETRES DE L'ESSAI DE FATIGUE.....</b>	<b>131</b>
2.1 COURBE DE WÖLHER.....	131
2.2 METHODES EN ESCALIER OU METHODE DIXON ET MOOD.....	132
2.3 EVOLUTION MICROSTRUCTURALE.....	133
<b>3 MESURES MAGNÉTOMÉCANIQUES ; LES DIFFERENTS PARAMETRES. 134</b>	
3.1 LA TEMPERATURE.....	136
3.1.1 <i>température induite par la déformation</i> .....	136
3.1.2 <i>Évolution des différents bruits en fonction de la température</i> .....	137
3.2 INFLUENCE DE LA VITESSE D'APPLICATION DE LA CONTRAINTE.....	138
3.3 AMPLITUDE DU SIGNAL EN FONCTION DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE.....	140
3.4 ESSAI COMPLEMENTAIRE : SUPERPOSITION D'UN CHAMP MAGNETIQUE CONSTANT DANS LE SENS LONGITUDINAL DE L'EPROUVETTE.....	142
<b>4 SUIVI EN FATIGUE.....</b>	<b>144</b>
4.1 RESULTATS - INTERPRETATIONS.....	144
4.1.1 <i>Résultats</i> .....	144
4.1.2 <i>Interprétations</i> .....	147
<b>5 CONCLUSION.....</b>	<b>149</b>
<b>CHAPITRE V : APPROCHE NUMERIQUE DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE.....</b>	<b>151</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>155</b>
<b>2 MODÉLISATIONS ANTÉRIEURES DÉVELOPPÉES DANS NOTRE LABORATOIRE.....</b>	<b>156</b>
2.1 MODELE DE C. GATELIER [3] ET J. CATTY [4].....	156
2.2 MODELE DE X. KLEBER [63].....	156
<b>3 cas du magnétomécanique : les energies.....</b>	<b>157</b>
3.1 ENERGIE MAGNETOSTATIQUE.....	158
3.2 ENERGIE ELASTIQUE EMMAGASINEE, DUE AUX REGIONS DEFORMEES.....	162
3.3 ENERGIE DES PAROIS.....	163
3.4 CONCLUSION.....	165

<b>4</b>	<b>PRÉSENTATION DU MODÈLE ET DES HYPOTHÈSES</b> .....	166
4.1	FORCE DE RAPPEL .....	166
4.2	FORCE MOTRICE.....	166
4.3	ANCRAGES.....	166
4.4	RESUME DES HYPOTHESES DE NOTRE MODELE .....	167
4.5	APPLICATION DU MODELE. ....	168
4.5.1	<i>Calculs préliminaires</i> .....	168
4.5.2	<i>Programme principal</i> .....	168
4.5.3	<i>Résultat type</i> .....	169
4.6	RESULTATS ET ANALYSES. ....	170
4.6.1	<i>Reconstitution d'un signal magnétomécanique</i> .....	170
4.6.2	<i>Influence de l'amplitude des ancrages</i> .....	172
4.6.3	<i>Influence du nombre d'ancrages</i> .....	173
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	174
	 <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	175
	 <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	181
	 <b>ANNEXES</b> .....	187
	 <b>RESUME FRANÇAIS ANGLAIS</b> .....	197



# **INTRODUCTION GENERALE**



Dans l'industrie, de nombreuses pièces de révolution sont en rotation (arbres). Elles sont très souvent soumises à des efforts de flexion importants (le poids par exemple). Citons : arbres de turbines ou d'alternateur, vilebrequins de moteurs thermiques, arbres d'hélices de bateaux etc. L'effort appliqué induit des contraintes de traction d'un côté et de compression de l'autre, en général maximales en surface. La rotation de la pièce par rapport à la direction fixe de flexion crée une sollicitation appelée la « flexion rotative ». Si le chargement est important, un effet de fatigue du matériau peut apparaître et aboutir à la rupture de la pièce avec toutes les conséquences de la rupture d'une pièce en rotation. L'ingénieur est donc conduit soit à surdimensionner l'arbre, ce qui revient à l'alourdir et à augmenter son inertie d'où une baisse des performances, soit à un remplacement préventif qui entraîne un coût plus élevé.

Dans la logique d'une pièce légère donc fortement chargée et d'un remplacement préventif, le plus tard possible, mais avant rupture, il serait très intéressant de pouvoir évaluer durant le fonctionnement le "potentiel restant" de la vie du matériau. C'est un challenge important et de nombreuses équipes de recherche gravitant autour du Contrôle Non Destructif, dont notre laboratoire (le GEMPPM) mènent des études dans ce sens. Plusieurs méthodes plus ou moins destructives et pénalisantes peuvent être utilisées : arrêt de la structure et prélèvement d'échantillon (carottage) pour un examen microscopique, ou issues du contrôle non destructif : US, Barkhausen, ... Notre travail s'intègre dans une démarche visant à évaluer les méthodes issues du ferromagnétisme.

Pour une pièce en matériau magnétique (cas du fer et des aciers), la méthode proposée envisage un suivi, in situ, pendant le fonctionnement (sans arrêt ni prélèvement), de l'évolution microstructurale qui précède la rupture. Elle est basée sur le phénomène magnétomécanique. Un capteur fixe de type Barkhausen, judicieusement placé mais sans contact, près du métal et par rapport à la contrainte devrait permettre de mesurer le bruit magnétomécanique induit par la contrainte continûment variable. Si un phénomène de fatigue apparaissait, il devrait s'accompagner d'une modification du bruit mesuré. Si préalablement, une corrélation a été établie, sur éprouvette, entre l'évolution du bruit et le potentiel de vie restant. Il serait alors possible de prévenir la rupture.

Très peu d'études ont été menées dans ce sens, le présent travail constitue une première approche d'une part pour mieux connaître le phénomène magnétomécanique, ses origines, ses possibilités et ses limites ; d'autre part pour montrer la faisabilité de la mesure et son application au suivi de la fatigue en flexion rotative pour le cas du fer doux.

Dans un premier chapitre, nous rappellerons les principes physiques nécessaires à la compréhension de la mesure puis nous analyserons des résultats proches de notre étude tant sur les mécanismes d'endommagement par fatigue que sur les mesures magnétomécaniques.

Dans le deuxième chapitre, avant de commencer l'étude de la caractérisation microstructurale en fatigue endurance par mesure en continu du bruit magnétomécanique, il nous est apparu nécessaire de nous approprier cette technique et d'inventorier ses possibilités. Nous avons dans un premier temps repris et complété des essais réalisés dans notre laboratoire puis afin de faciliter l'interprétation, nous avons été conduit à approfondir

l'analyse des mécanismes physiques mis en jeu et développé un modèle qualitatif à 3 dimensions.

Le troisième chapitre présente le dispositif d'essai d'une part de sollicitation en flexion rotative, d'autre part de mesure du bruit magnétomécanique. Partant de l'équipement Barkhausen, nous avons été conduits à définir puis réaliser un équipement spécifique plus performant et plus sensible.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux sur des éprouvettes en fer doux soumises à une sollicitation en flexion rotative. L'interprétation sera menée en terme d'interaction microstructure magnétique microstructure cristalline en mettant à profit les résultats développés dans le chapitre II.

Le cinquième chapitre porte sur une approche numérique du bruit magnétomécanique. Plusieurs tentatives de modélisation appliquées au bruit Barkhausen ont été développées dans le laboratoire en particulier celle de Xavier KLEBER. En nous inspirant de cette démarche, nous proposons un modèle à une dimension qui rend compte des mouvements (sauts), d'une paroi à  $90^\circ$ , induits par une contrainte et se déplaçant dans un milieu pourvu d'obstacles plus ou moins ancrants. Ce modèle a été appliqué, à titre illustratif, pour retrouver l'évolution de la signature magnétomécanique en fonction de la nature du matériau, de la vitesse de sollicitation d'une pièce soumise à un essai de flexion rotative.

Enfin, la conclusion résume l'ensemble des résultats et dégage de nombreuses perspectives de poursuites de ce travail exploratoire.

# **Chapitre I**

# **Etudes Bibliographiques**



# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>MAGNETISME EN L'ABSENCE D'EXCITATION</b> .....	<b>25</b>
2.1	MAGNETISME A L'ECHELLE ATOMIQUE .....	25
2.2	MAGNETISME A L'ECHELLE DE L'AGREGAT D'ATOMES .....	26
2.3	FERROMAGNETISME A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE .....	27
2.3.1	<i>Energie d'échange</i> .....	28
2.3.2	<i>Energie d'anisotropie magnétocristalline</i> .....	29
2.3.3	<i>Energie magnétoélastique</i> .....	30
2.3.4	<i>Energie magnétostatique</i> .....	31
2.3.5	<i>Energie des parois</i> .....	33
2.4	MODELISATION .....	34
2.5	OBSERVATION DES DOMAINES ET DES PAROIS .....	35
2.5.1	<i>Méthode des poudres</i> .....	35
2.5.2	<i>Effet magnéto-optique KERR</i> .....	35
2.6	MAGNETISME DANS LE CAS PARTICULIER DU FER A BAS CARBONE.....	36
<b>3</b>	<b>EXCITATION MAGNETIQUE AXIALE</b> .....	<b>38</b>
3.1	PROCESSUS DE MAGNETISATION .....	38
3.1.1	<i>Courbe de première aimantation</i> .....	38
3.1.2	<i>Cycle d'hystéresis</i> .....	39
3.2	BRUIT BARKHAUSEN .....	40
<b>4</b>	<b>EXCITATION PAR UNE CONTRAINTE MECANIQUE AXIALE</b> .....	<b>43</b>
4.1	INTERACTION CONTRAINTE / MICROSTRUCTURE MAGNETIQUE.....	43
4.2	BRUIT MAGNETOMECHANIQUE .....	45
<b>5</b>	<b>PRINCIPAUX RESULTATS NECESSAIRES A L'INTERPRETATION DE NOS EXPÉRIENCES</b> .....	<b>47</b>
5.1	ETUDES MENEES AUX MOYENS DE LA MESURE BARKHAUSEN .....	47
5.1.1	<i>Influence de la microstructure</i> .....	47
5.1.2	<i>Influence des précipitations</i> .....	49
5.1.3	<i>Influence de l'état de contrainte</i> .....	50
5.2	RESULTATS OBTENUS PAR MESURES DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE (BMM).....	52
5.2.1	<i>Traction monotone dans le domaine élastique</i> .....	53
5.2.2	<i>Application d'une contrainte cyclique Traction Compression</i> .....	54
5.2.3	<i>caractérisation de la déformation plastique par BMM</i> .....	55
5.2.4	<i>Caractérisation de la fatigue par BMM</i> .....	55
5.2.5	<i>Contrainte cyclique de cisaillement</i> .....	56
<b>6</b>	<b>RESULTATS RELATIFS A LA FATIGUE DES ACIERS</b> .....	<b>57</b>
6.1	ASPECTS MICROSTRUCTURURAUX .....	57
6.1.1	<i>Fatigue des aciers type « Basse température »</i> .....	58
6.1.2	<i>fatigue des aciers type « Haute température »</i> .....	59
6.2	CARACTERISATION DE LA FATIGUE PAR BRUIT FERROMAGNETIQUE .....	59
6.3	RESULTAT DU SUIVI EN FATIGUE PAR MESURE DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE .....	61
<b>7</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>62</b>



## 1 INTRODUCTION

Notre étude vise à utiliser le phénomène magnétomécanique pour estimer le potentiel restant de pièces en alliage ferreux, soumises à une sollicitation de fatigue en flexion rotative. Cette partie bibliographique porte donc d'une part sur la caractérisation des matériaux ferromagnétiques à différentes échelles, en l'absence d'excitation extérieure, puis sous excitation magnétique et enfin sous excitation mécanique (effet d'une contrainte sur la structure magnétique). Nous rappelons ensuite les principaux résultats obtenus dans le Laboratoire GEMPPM d'une part par mesure Barkhausen et d'autre part par Méthode magnétomécanique. Enfin, nous rappelons certains résultats conduisant à l'interprétation de l'endommagement par fatigue des aciers.

## 2 MAGNETISME EN L'ABSENCE D'EXCITATION

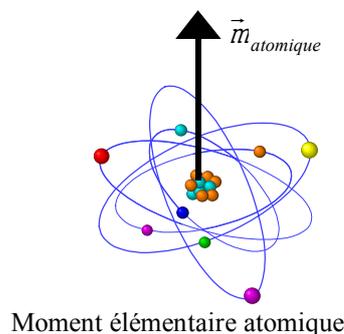
Pour comprendre et interpréter l'évolution de la structure magnétique d'un matériau, il est nécessaire de remonter à l'échelle atomique, puis progressivement de passer à l'échelle de l'arrangement d'atomes puis du cristal et enfin de la pièce. Notre étude portant sur des alliages ferreux (fer doux et acier), nous ne rappelons que le cas du ferromagnétisme. L'essentiel de cette partie est tiré d'ouvrages généraux [1], [2], [8].

### 2.1 MAGNETISME A L'ECHELLE ATOMIQUE

Toute substance matérielle est formée d'un ensemble d'atomes. Chaque atome est composé d'un noyau autour duquel gravite un certain nombre d'électrons. Les particules constituant le noyau et les électrons sont chargées et perpétuellement en mouvement, ce qui crée des moments magnétiques qui sont à l'origine des propriétés magnétiques des corps.

Le moment magnétique électronique provient d'une part des mouvements des électrons autour du noyau sur leurs orbites et d'autre part de la rotation spinale de chaque électron ; l'ordre de grandeur est de  $10^{-23}$  A.m<sup>2</sup>.

Le moment magnétique dû aux mouvements des composants du noyau est beaucoup plus faible. Chaque atome possède donc un moment magnétique élémentaire dont la direction et le module dépendent de l'environnement particulier de l'atome (nature et position, ...) Fig. 1-1.



**Figure I-1** : *Le moment magnétique élémentaire au niveau atomique*

Du point de vue magnétique, chaque atome peut donc être considéré comme un petit aimant élémentaire. Pour le fer, il se trouve que ce moment magnétique élémentaire est particulièrement important.

## 2.2 MAGNETISME A L'ECHELLE DE L'AGREGAT D'ATOMES

Lorsque des atomes s'assemblent, les moments magnétiques de chacun d'eux interagissent plus ou moins entre eux ce qui conduit, en magnétisme, à classer les matériaux en cinq grandes catégories : les diamagnétiques, les paramagnétiques, les ferromagnétiques, les ferrimagnétiques et les antiferromagnétiques.

Nous ne détaillerons pas ces différentes catégories qui ne nous intéressent pas directement pour notre étude. Des descriptions plus détaillées peuvent être trouvées dans les Thèses de C. GATELIER [3] et J. CATTY [4].

Les alliages ferreux étant ferromagnétiques à basse température (en dessous de la température de CURIE) et paramagnétique au-dessus, nous ne rappelons que ces deux cas (Figure I-2).

**Le paramagnétisme :** Si les interactions entre les moments magnétiques des atomes sont faibles devant l'agitation thermique, les interactions deviennent négligeables. En l'absence d'excitation extérieure, une répartition aléatoire des moments magnétiques élémentaires est obtenue. Dans le cas d'une excitation magnétique extérieure, les moments magnétiques atomiques tendent à s'aligner le long des lignes de champ magnétique extérieur. L'aimantation est proportionnelle à l'excitation appliquée  $H$  :

$$\vec{M} = c\vec{H} \quad (1)$$

$c$  représente la susceptibilité magnétique (nombre sans dimension).

Le paramagnétisme est sensible à la température. La susceptibilité initiale est positive et devient infinie au zéro absolu. Elle décroît lorsque la température augmente.

**Le ferromagnétisme :** Si la température est relativement faible et si les moments atomiques des atomes sont relativement importants (cas du fer et du nickel à température ambiante), lors d'un rassemblement d'atomes (agrégat), les moments magnétiques ont tendance à s'arranger parallèlement entre eux et il en résulte pour l'agrégat une aimantation spontanée.

L'induction magnétique  $\vec{B}$  représente l'état magnétique en fonction de l'environnement magnétique exprimé par le champ  $\vec{H}$  et de son état d'aimantation exprimé par  $\vec{M}$

$$\vec{B} = m_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

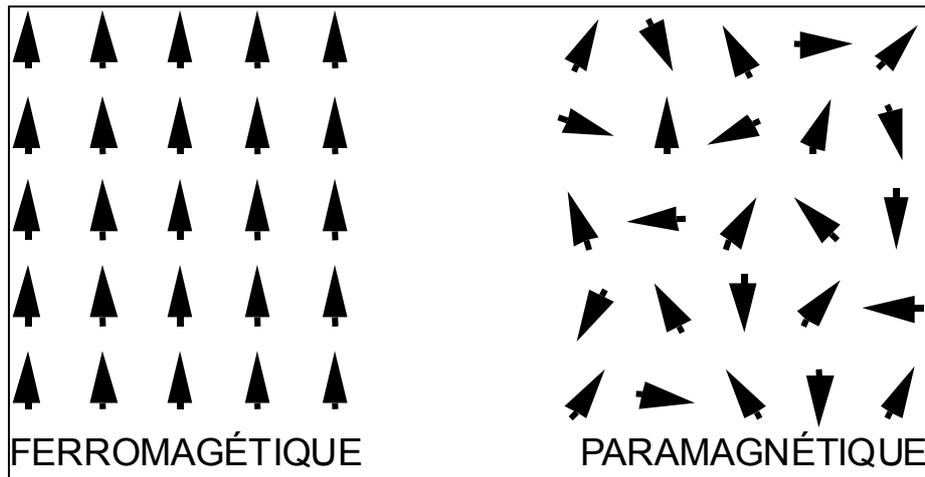
Avec  $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry.m<sup>-1</sup>, la perméabilité du vide.

La perméabilité  $m$ , relie l'induction magnétique résultante au champ magnétique appliqué :

$$\vec{B} = m\vec{H} = m_0(1 + c)\vec{H} = m_0 m_r \vec{H} \quad (3)$$

Avec  $m_r$ , perméabilité relative (sans dimension).

L'aimantation spontanée dépend de la température ; elle décroît si la température augmente. Au-dessus de la température de CURIE, le matériau retrouve un comportement paramagnétique.



**Figure I-2** : Type de magnétisme (cas du fer).

### 2.3 FERROMAGNETISME A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE

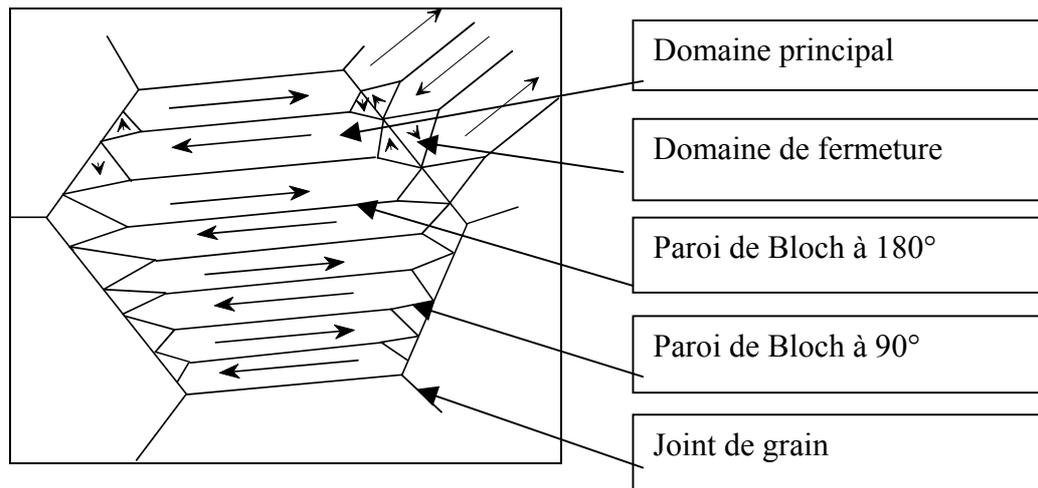
Pour le Fer, qui cristallise dans le système cubique centré, l'alignement des moments magnétiques se fait évidemment dans des directions présentant une grande densité d'atomes : directions de type (1,0,0) appelées «directions de facile aimantation ».

Il faut noter que, pour un même cristal cubique centré, il existe trois directions équivalentes. Un cristal ferromagnétique devrait donc être caractérisé par une aimantation spontanée. Or, les échantillons macroscopiques même monocristallins peuvent être complètement désaimantés. Pour expliquer ce phénomène, P. WEISS [5] introduit le concept de domaines. (Cf. figure I-3).

A ce stade, la matière ferromagnétique présente donc une **microstructure magnétique** à une échelle légèrement inférieure à celle cristalline. Elle est composée de domaines élémentaires appelés **domaines de WEISS** au sein desquels l'aimantation est orientée selon l'une ou l'autre des directions de facile aimantation.

En l'absence de champ appliqué et de toute autre sollicitation extérieure, il y a statistiquement équipartition du volume des domaines entre les diverses directions ; à l'échelle macroscopique, l'aimantation résultante est donc bien nulle, comme il est observé.

Ce concept, introduit par WEISS, s'est avéré correspondre à la structure réellement observée depuis par différentes techniques. Nous décrirons certaines de ces techniques dans le paragraphe 2-5. La Figure I-3 représente un cristal de fer ; il est divisé en vastes domaines principaux de direction de magnétisations antiparallèles. Ils sont terminés par des domaines plus petits dits de fermeture. Les domaines sont séparés par des parois (**parois de BLOCH**). Quand les directions de magnétisation des domaines contigus sont antiparallèles, on dit que la paroi est à 180° quand les directions sont perpendiculaires on dit que la paroi est à 90°.



**Figure I-3 :** Représentation schématique de la microstructure magnétique d'un cristal décomposé en domaines.

Ce type de structure fréquemment observé correspond donc à un équilibre stable de la matière donc à un minimum énergétique.

L'arrangement en domaines magnétiques dicte le comportement magnétique macroscopique des matériaux ferromagnétiques. Ceci résulte de l'interaction et de la minimisation de plusieurs énergies : énergie d'échange, énergie d'anisotropie magnétocristalline, énergie magnétostatique, énergie magnétoélastique, énergie des parois.

### 2.3.1 Energie d'échange

L'énergie d'échange correspond à l'alignement des moments magnétiques atomiques. Cette énergie se calcule à l'échelle atomique, elle est très faible en comparaison des autres énergies. Elle ne contribue pas (ou très peu) aux propriétés magnétiques microscopiques de la matière. En revanche, parce que c'est une énergie à longue portée, elle joue un rôle fondamental puisque c'est elle qui est à l'origine du ferromagnétisme. L'interaction d'échange est une interaction d'origine électrostatique qui a été introduite en 1929 par HEISENBERG. D'après BOZORTH [6], sous certaines hypothèses l'énergie d'interaction  $E_{ech}$  des atomes  $i, j$  portant les spins  $S_i, S_j$  s'écrit :

$$E_{ech} = -2J\vec{S}_i\vec{S}_j \quad (4)$$

où  $J$  est l'intégrale d'échange qui est relié au recouvrement des distributions de charges des atomes  $i, j$ . cette équation (4) est appelée modèle d'Heisenberg.

Cette expression peut s'écrire également :

$$E_{ech} = JS^2j^2 \quad (5)$$

où  $j$  représente un angle entre deux spins et  $S$  : nombre quantique de spins.

L'énergie d'échange totale d'une ligne de N atomes est donnée approximativement par :

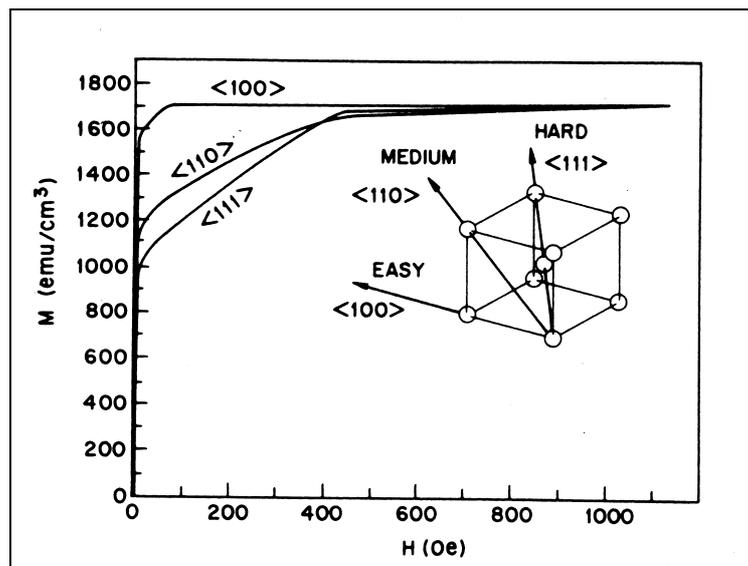
$$E_{ech} = \frac{JS^2P^2}{N^2} \quad (6)$$

Cette énergie d'échange augmente s'il apparaît un défaut de parallélisme entre les moments magnétiques. Elle est minimale lorsque les moments sont parallèles.

### 2.3.2 Energie d'anisotropie magnétocristalline

L'énergie d'anisotropie magnétocristalline relie la direction d'alignement des moments magnétiques avec les directions cristallines. Ces directions cristallines sont appelées directions de facile aimantation. Pour le fer (cubique centré à la température ambiante), les directions de facile aimantation sont les arêtes du cube, c'est-à-dire les directions cristallographiques (100), (010), (001). Cette anisotropie de l'aimantation se traduit par l'existence d'un minimum pour ces directions.

HONDA et KAYA [7] ont montré que le fer est plus facile à aimanter dans les directions de type (100) que dans les directions (110) ou (111).



**Figure I-4:** Courbes d'aimantation du fer suivant les trois directions différentes (HONDA et KAYA [7]).

Pour une direction quelconque de cosinus directeurs  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  par rapport aux arêtes du cube et pour un volume donné, cette énergie peut être mise sous la forme suivante :

$$E_a = K_1(a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2) + K_2 a_1^2 a_2^2 a_3^2 \quad (7)$$

$K_1$  et  $K_2$  les coefficients appelés constantes d'anisotropie. Elles sont homogènes à des énergies volumiques positives ou négatives, variables avec la température.

Pour le fer à température ambiante d'après CHIKAZUMI [8] :

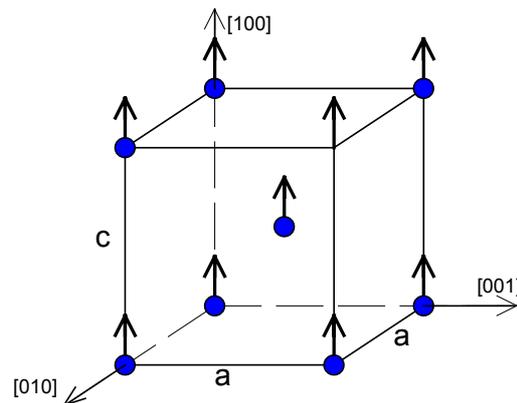
$$K_1 = 4,5 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$$

$$K_2 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$$

### 2.3.3 Energie magnétoélastique

Avant d'introduire la notion d'énergie magnétoélastique, il faut rappeler le phénomène de **magnétostriction**. Très schématiquement, un atome est généralement considéré comme occupant un volume sphérique. Dans le cas des matériaux présentant un fort moment magnétique, il semble plus vraisemblable de considérer que le volume qu'il occupe est légèrement ovoïde plus ou moins allongé (cas du fer) ou aplati (cas du nickel) dans la direction principale de magnétisation. Ces directions étant alignées dans des directions cristallines, il en résulte une légère déformation de la maille, qui se traduit pour un monocristal par une déformation macroscopique. C'est la magnétostriction. Elle est positive pour le fer c'est à dire que la maille est légèrement allongée dans le sens de la magnétisation ( $c > a$ ) (Figure I-5). Elle est négative pour le nickel c'est à dire que la maille est légèrement aplatie ( $c < a$ ). Si une conservation du volume est admise à cette échelle, l'effet Poisson entraîne une déformation opposée dans les autres directions.

Les processus d'aimantation s'accompagnent donc d'une déformation spontanée. Il s'agit souvent de déformation très faible, mais qu'on ne peut ignorer. Ces déformations locales (pour chaque domaine) induisent des contraintes élastiques de compatibilité. L'existence de contraintes et de déformations dans le cristal fait apparaître une énergie de type élastique. C'est l'énergie magnétoélastique.



**Figure I-5 :** Distorsion de la maille cubique dans le fer  $c > a$

Ce phénomène peut être caractérisé dans le cas du fer par un coefficient de déformation :

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L_0}, \Delta L \text{ variation de la longueur dans la direction de magnétisation.}$$

D'après LEE [9] pour le fer, le coefficient  $\lambda$  est positif quand les moments magnétiques sont dans la direction de facile aimantation [100] avec  $\lambda_{100} = 20 \cdot 10^{-6}$  alors que dans la direction [111],  $\lambda$  est négatif avec  $\lambda_{111} = -21,6 \cdot 10^{-6}$ .

L'énergie du cristal par unité de volume est donc la somme de contributions : l'énergie élastique proprement dite et l'énergie magnétoélastique.

- Rappelons la formule générale de l'énergie élastique

$$Eel = \frac{1}{2} C_{11} (e_{11}^2 + e_{22}^2 + e_{33}^2) + 2C_{44} (e_{12}^2 + e_{23}^2 + e_{31}^2) + C_{12} (e_{11}e_{22} + e_{22}e_{33} + e_{33}e_{11}) \quad (8)$$

$C_{11}$  : module de traction;

$C_{12}$  et  $C_{44}$  : module de cisaillement.

- l'énergie magnétoélastique induite par la déformation du cristal s'écrit

$$Emel = B_1 (e_{11}a_1^2 + e_{22}a_2^2 + e_{33}a_3^2) + 2B_2 (e_{12}a_1a_2 + e_{23}a_2a_3 + e_{31}a_3a_1) + B_3 (e_{11} + e_{22} + e_{33}) \quad (9)$$

$B_1, B_2, B_3$  : constantes ;  $a_1, a_2, a_3$  : cosinus directeurs de l'aimantation

$$Emelt = Eel + Emel.$$

La déformation correspondante est déterminée en imposant que cette énergie soit minimale :

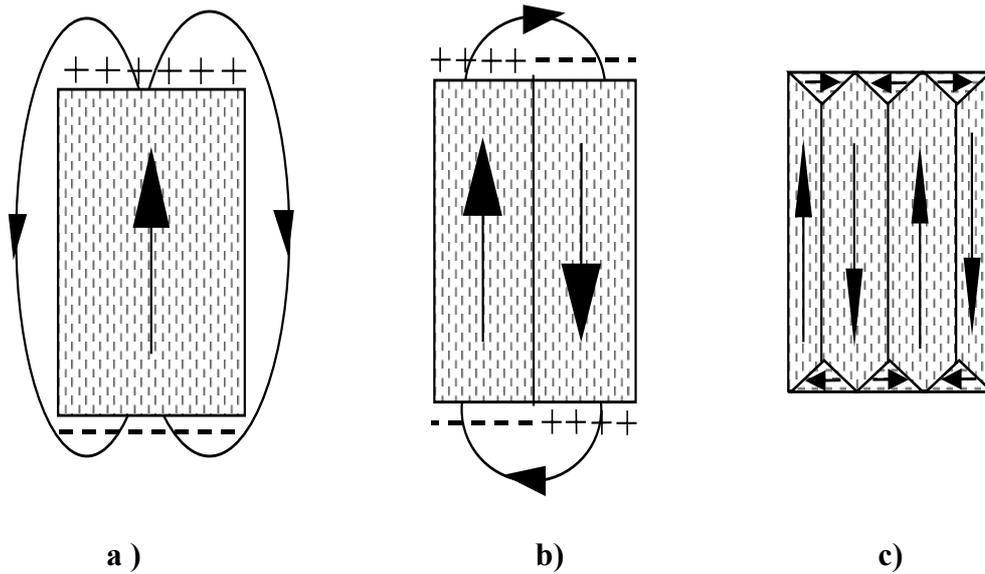
$$\frac{\partial Emelt}{\partial e_{ij}} = 0 \quad \text{soit}$$

$$e_{ii} = \frac{-B_1(a_i^2 - \frac{1}{3})}{C_{11} - C_{12}} \quad e_{ij} = \frac{-B_2 a_i a_j}{2C_{44}} \quad (10)$$

La magnétisation d'un matériau ferromagnétique entraîne donc une déformation et corrélativement une modification de son énergie interne. Réciproquement, l'application d'une déformation va modifier l'énergie élastique du matériau et induire une modification de l'équilibre énergétique et donc de la microstructure magnétique : c'est l'**effet magnétoélastique** qui est à la base des mesures que nous envisageons.

### 2.3.4 Energie magnétostatique

C'est cette énergie qui explique l'apparition des domaines de WEISS. Si le matériau ne comportait qu'un seul domaine, cas a) de la figure I-6, il apparaîtrait à ses extrémités des charges magnétiques (champ démagnétisant) et des lignes de champs extérieures de fermeture. La fragmentation en domaines principaux antiparallèles, cas b), diminue déjà considérablement les lignes de champs extérieures, enfin l'apparition des domaines de fermeture, cas c), les font pratiquement disparaître. La subdivision d'un matériau ferromagnétique en domaines provoque donc une diminution de l'énergie magnétostatique, mais corrélativement l'apparition d'un plus grand nombre de domaines s'accompagne de la création de parois (zones de désordre) et correspond donc à une augmentation de l'énergie d'échange ce qui limitera le nombre de domaines.



**Figure I-6 :** Exemples de configurations résultant des compromis de différentes énergies.

Le champ effectif  $\vec{H}_{ef}$ , qui agit sur l'aimantation du matériau est donné par :

$$\vec{H}_{ef} = \vec{H}_a + \vec{H}_d \quad (11)$$

$H_a$  : champ magnétique appliqué.

$\vec{H}_d$  : champ démagnétisant

$$\text{avec } H_d = -\frac{1}{m_0} N\vec{M}$$

$m_0$  est la perméabilité du vide

$N$  : facteur démagnétisant se situant entre 0 et 1 dont le calcul n'est pas simple et dépend de la forme de l'échantillon.

L'interaction entre l'aimantation et le champ démagnétisant que l'échantillon crée lui-même introduit une énergie magnétostatique :

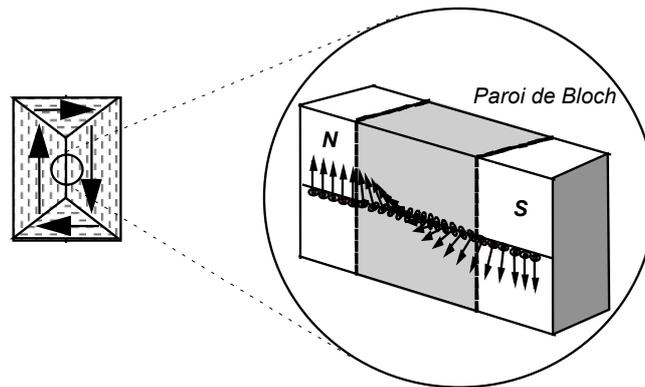
$$E_m = -\frac{1}{2} \int \vec{M}\vec{H}_d dV \quad (12)$$

L'aimantation choisit naturellement la direction de l'échantillon pour laquelle le coefficient  $N$  est minimal. En conséquence, la forme d'un échantillon peut être source d'anisotropie. C'est le cas, par exemple de plaques de faible épaisseur pour lesquelles l'aimantation spontanée a tendance à s'orienter parallèlement aux grandes surfaces. Le champ démagnétisant et l'énergie magnétostatique sont alors plus faibles. Par contre l'orientation de l'aimantation perpendiculaire à la surface est défavorable.

Le calcul global de  $E_m$  est toujours laborieux car l'intégral se porte sur tout le volume.

### 2.3.5 Energie des parois

De la configuration magnétique en domaines de WEISS d'un cristal, décrite précédemment, il résulte l'apparition de zones tampons, entre les domaines, plus ou moins larges, à l'intérieur desquelles l'aimantation tourne : ce sont les *parois de Bloch*, qui mettent également en jeu un compromis entre les énergies précitées.



**Figure I-7** : Domaines de Weiss et parois de Bloch à 180°

Dans un cristal de symétrie cubique, tel que le fer, il existe deux sortes de parois : *parois à 180°* et *parois à 90°*. Il est généralement admis qu'une paroi à 180° correspond à la juxtaposition de deux parois à 90° et qu'elle est donc deux fois plus épaisse. Des mesures au microscope électronique donnent une épaisseur de l'ordre d'une centaine d'atomes pour une paroi à 180° ; Ce qui revient à dire, qu'à l'intérieur de la paroi, la désorientation d'un atome à l'autre est relativement faible (minimisation de l'énergie d'échange).

L'équilibre entre les différentes énergies mises en jeu dans les parois étant très compliqué, le problème est généralement traité de manière globale en introduisant une **Energie superficielle des parois**, comme l'a montré NEEL [10].

Deux grandeurs caractérisent une paroi de Bloch : son épaisseur ou largeur et l'élévation d'énergie locale, à laquelle donne lieu la configuration des moments qu'elle contient. Cette élévation d'énergie est évaluée par rapport à l'état de saturation qui règne notamment au sein des domaines jouxtant la paroi. Elle est normalement donnée par unité de surface, désignée par  $g$  sous le nom d'énergie superficielle. Dans le cas du fer étudié par NEEL [11], elle s'exprime par l'expression suivante :

$$g = 2p\sqrt{AK} \quad (15)$$

Avec  $A = 2JS^2$  ;

$J$  : Intégrale d'échange

$S$  : nombre quantique de spin.

$K$  : coefficient d'anisotropie

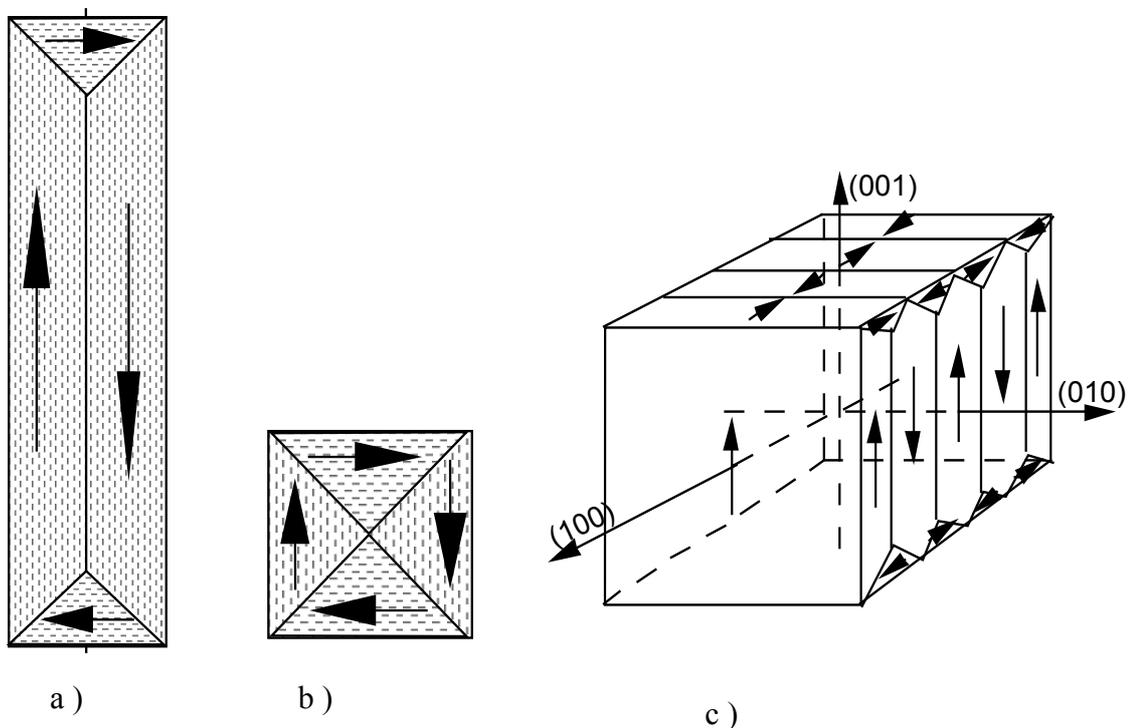
**Tableau I-1 :** Energies superficielles et Epaisseurs de parois de Bloch dans le fer d'après LILLEY [12]

Plan	Parois Type	Densité d'énergie $10^3 \text{ J.m}^{-2}$	Epaisseur $D (\text{Å})$
(001)	90°	0.62	408
(001)	180°	1.24	1418
(110)	90°	1.07	516
(110)	180°	1.71	728
(111)	90°	0.74	408

## 2.4 MODELISATION

L'introduction des différentes énergies permet bien de justifier les microstructures magnétiques observées expérimentalement. Par contre, la prise en compte dans des modélisations de type « mathématiques » de toutes ces énergies reste encore extrêmement complexe, en particulier pour expliquer les modifications des microstructures magnétiques sous l'effet de sollicitations extérieures (magnétiques ou mécaniques).

Le plus souvent, ces considérations ont conduit à utiliser une modélisation graphique très simplifiée, sensée représenter un cristal ferromagnétique (figure I-8).



**Figure I-8 :** Modèles de représentation d'un cristal magnétique

La figure I-8 représente les différents modèles :

- a) Modèle rectangulaire permettant d'introduire la notion de domaines principaux, de domaines de fermeture et les différents types de parois.
- b) : Modèle carré permettant d'introduire l'effet statistique d'une équipartition des domaines mais peu représentatif car uniquement constitué de parois à 90°
- c) : Modèle volumique, plus proche de la réalité mais plus complexe.

Le modèle à deux dimensions (quatre domaines) est très pratique pour expliquer « avec les mains » par exemple : l'existence du cycle d'hystérésis et du bruit BARKHAUSEN, par contre un modèle à trois dimensions est plus réaliste pour certaines explications (cas de la magnétostriction et du bruit magnétomécanique).

## 2.5 OBSERVATION DES DOMAINES ET DES PAROIS

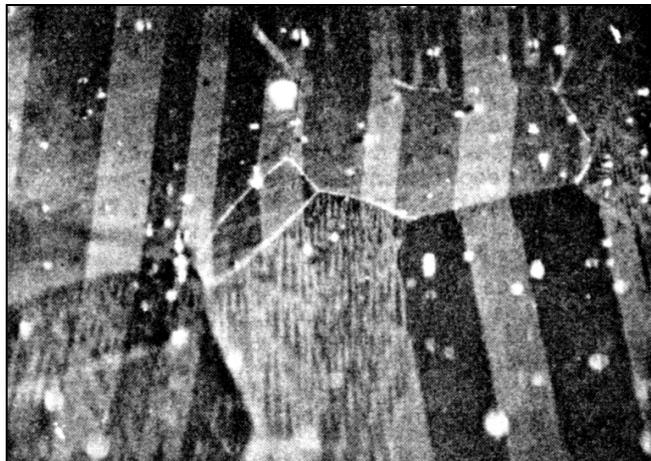
De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour visualiser les domaines magnétiques : la méthode des poudres, l'effet magnéto-optique KERR, la topographie X, l'effet Faraday, la microscopie électronique et les techniques neutroniques [13].

### 2.5.1 Méthode des poudres

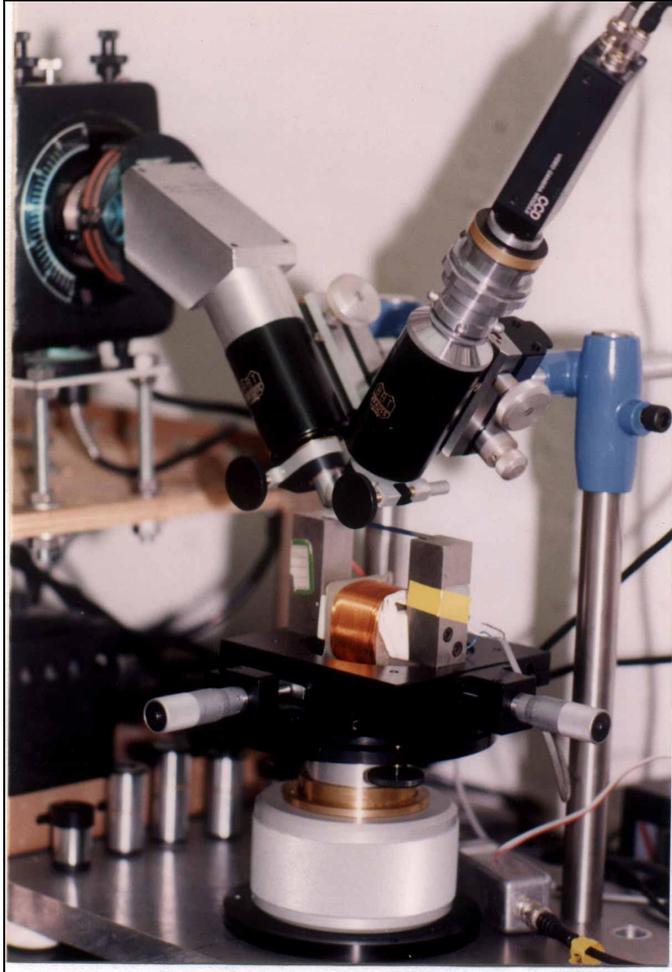
La plus facile à mettre en œuvre ; il s'agit de recouvrir l'échantillon de poudres magnétiques très fines qui s'organisent suivant les lignes de champs en fonction de l'orientation du magnétisme sous-jacent. Elle ne s'applique que pour des grossissements très faibles (taille des grains de la poudre) et ne permet pas de visualiser les domaines en cours d'évolution.

### 2.5.2 Effet magnéto-optique KERR

Cet effet traduit l'action sur une lumière polarisée de l'aimantation d'un miroir. Si une surface magnétique dans notre cas, est éclairée obliquement par une lumière judicieusement polarisée, elle subit, lors de la réflexion, une légère rotation de sa polarisation due à l'état magnétique de la surface. Un analyseur croisé permet de mettre en évidence cette rotation et de contraster ainsi l'image réfléchie qui révèle la microstructure magnétique de la surface.



**Photo I-1** : *Microstructure magnétique observée au microscope à effet Kerr*



**Photo I-2 :** *Microscope effet Kerr GEMPPM/INSA*

Dans notre laboratoire, durant son travail de DEA, J. SARETE [14], a construit un tel microscope. Son grossissement (80 fois) a été choisi pour permettre d'observer les domaines magnétiques d'échantillons en aciers. Seuls certains grains correctement orientés par rapport à la lumière incidente sont visibles.

L'effet KERR permet également de déterminer la direction de magnétisation car seul apparaîtront les domaines dont les directions de magnétisation sont parallèles au plan d'incidence. L'équipement du laboratoire est également doté d'un inducteur qui permet d'appliquer un champ magnétique en cours d'observation et d'une petite machine non représentée sur la photo I-2 permettant d'appliquer une contrainte de traction ou de compression in situ sous le microscope.

Cet équipement très performant permet de mettre en évidence les modifications de la microstructure magnétique lors de l'application de sollicitations extérieures magnétiques

ou mécaniques.

Le seul gros problème réside dans la préparation de la surface des échantillons qui est extrêmement difficile et très longue. Un dépôt d'une substance diélectrique permet d'améliorer le contraste mais ne permet plus l'indexation des directions d'aimantation.

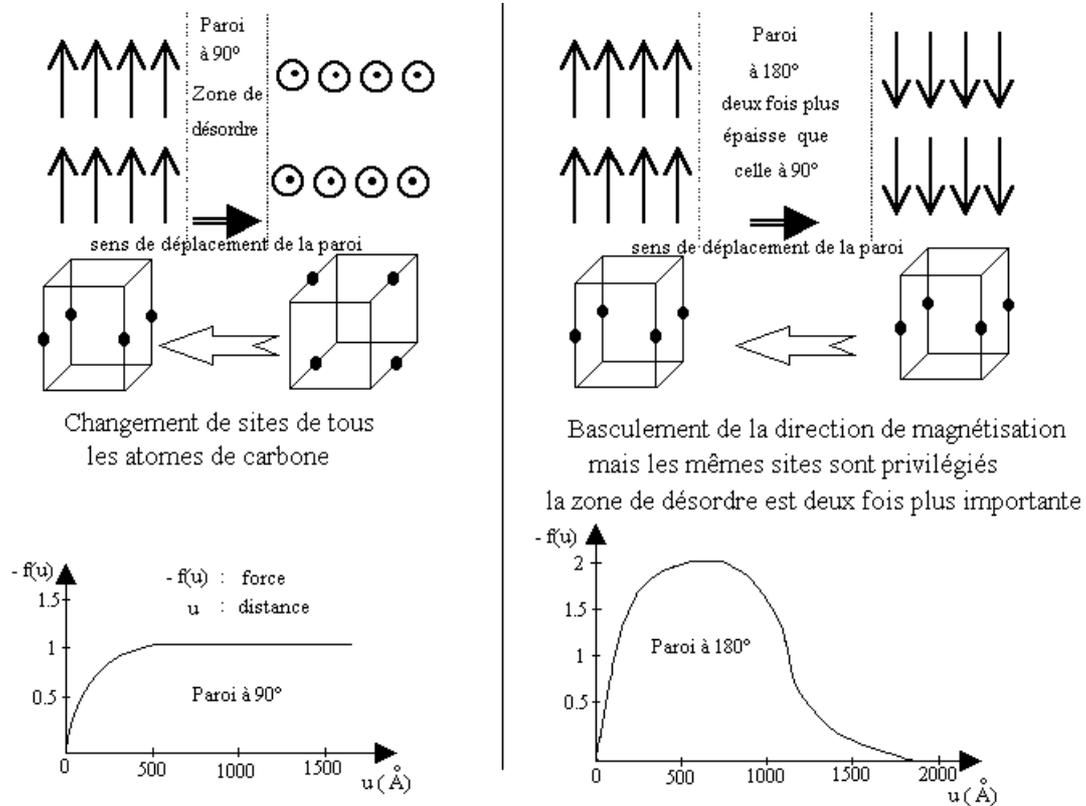
Après avoir décrit les matériaux ferromagnétiques à l'état initial, nous allons maintenant présenter l'effet de sollicitations extérieures tout d'abord magnétiques puis mécaniques.

## 2.6 MAGNETISME DANS LE CAS PARTICULIER DU FER A BAS CARBONE

L'étude envisagée porte principalement sur du fer Armco qui contient de l'ordre de 0.01% de carbone. Bien que faible, cette proportion peut jouer un rôle important car le carbone est intégralement en solution solide dans le fer  $\alpha$ . Ce qui introduit une anisotropie uniaxiale localisée, fonction de la direction de magnétisation locale.

Selon L. NEEL [60], il y a interaction entre l'anisotropie cristalline provoquée par la présence du carbone dans les sites octaédriques et l'anisotropie magnétocristalline. Si la direction de magnétisation est fixée, les atomes de carbone vont basculer dans les sites les plus proches correspondant à une diminution globale de l'énergie d'anisotropie cristalline. Ce basculement est thermiquement activé, mais ayant lieu à très courte distance (de site octaédrique à un site octaédrique), il est très rapide. A température ambiante, le temps est de l'ordre de la seconde.

Réciproquement une fois les atomes sont dans les sites favorables, ils stabilisent la structure magnétique c'est-à-dire qu'il faudra franchir une barrière de potentiel plus élevée pour déplacer les parois.



Représentation de la force à fournir pour déplacer une paroi dans le cas du traînage

**Figure I- 9 :** représentation du mouvement des deux types de parois en présence d'atomes en interstitiels provoquant un traînage magnétique.

Conclusion :

Il faut fournir moins d'énergie pour mettre en mouvement une paroi à 90°, mais il faut la maintenir en permanence pour la déplacer sur de longue distance. Pour une paroi à 180°, il faut franchir une barrière plus importante pour la mettre en mouvement mais ensuite sa position est indifférente, elle peut donc se déplacer à grande distance.

L'effet magnétomécanique étant principalement induit par des mouvements de parois à 90°, on imagine qu'il sera très sensible au phénomène de traînage magnétique et à la stabilisation des domaines par le carbone.

### 3 EXCITATION MAGNETIQUE AXIALE

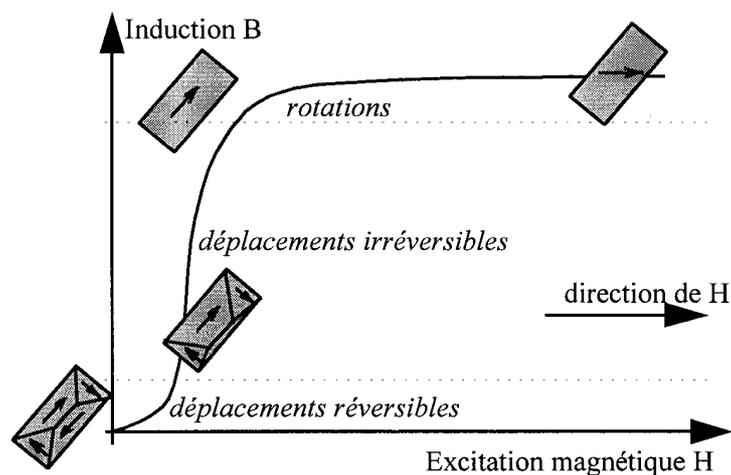
#### 3.1 PROCESSUS DE MAGNETISATION

Dans ce chapitre, nous rappelons les résultats et les interprétations, maintenant bien connus, correspondant à l'évolution de l'état magnétique d'un matériau ferromagnétique soumis à une sollicitation magnétique extérieure. Nous rappelons dans l'ordre les explications de la courbe de première magnétisation puis du cycle d'hystérésis et enfin du bruit BARKHAUSEN.

Cet aspect a fait l'objet de nombreux travaux dans notre laboratoire : thèses de J. SARETE [15], J LAMONTANARA [16], O. SAQUET [17].

##### 3.1.1 Courbe de première aimantation

Prenons un morceau de fer polycristallin. Dans son état naturel, il est désaimanté, c'est-à-dire que le moment magnétique résultant est la somme des moments magnétiques élémentaires de tous les domaines magnétiques. Statistiquement il est nul. Si un champ magnétique extérieur  $\vec{H}$  est appliqué, la configuration des domaines va évoluer de façon à ce que le moment magnétique résultant du matériau soit complètement orienté dans le sens du champ appliqué



**Figure I-10** : Courbe de première aimantation

Cette évolution présente trois stades au fur et à mesure de l'augmentation du champ H d'excitation.

- Pour de faibles valeurs du champ magnétique appliqué, les domaines principaux, dont l'aimantation est orientée favorablement par rapport au champ appliqué, vont croître au détriment d'autres domaines moins bien orientés. Ce processus se traduit principalement par des déplacements de parois de Bloch à 180°.

- Pour des valeurs de champ plus élevées, le phénomène s'amplifie. Cette étape se poursuit jusqu'à la disparition complète des domaines défavorablement orientés. Chaque cristal est alors un monodomaine magnétique, il est important de noter qu'à ce stade les moments magnétiques sont toujours orientés dans les directions de facile aimantation.

- Pour des valeurs de champ appliqué encore plus élevées, l'aimantation dans chaque cristal va progressivement quitter la direction de facile aimantation pour s'orienter dans le sens du champ. On atteint alors la saturation magnétique.

### 3.1.2 Cycle d'hystérésis

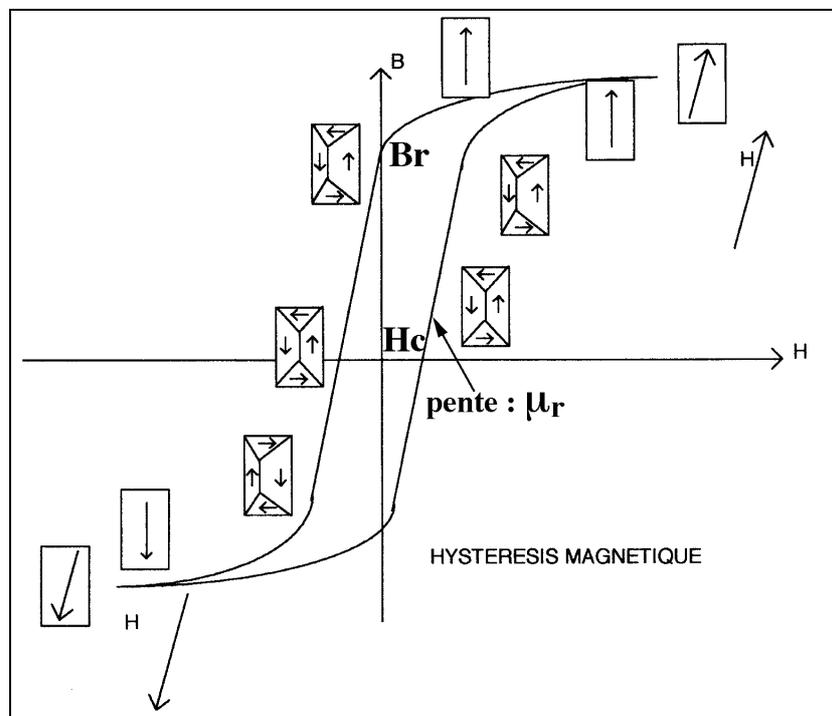
Dans le cas du cycle d'hystérésis, le matériau est porté alternativement de saturation à saturation dans deux directions opposées, à l'aide d'une excitation magnétique externe alternative. Partant de l'état saturé, nous retrouvons alors les phénomènes inverses de ceux décrits lors de la première aimantation et ayant abouti à la saturation :

- Partant de l'état saturé, alors que  $H$  diminue, les moments magnétiques vont retourner dans la direction de facile aimantation la plus proche.
- De nouveaux domaines de fermeture vont apparaître : phénomène de germination.
- Décroissance des domaines orientés favorablement par rapport à  $H$ .
- Puis croissance de ceux orientés dans la direction opposée.
- Disparition des domaines défavorablement orientés.
- Enfin rotation des moments magnétiques pour s'aligner dans la direction de  $H$ .

Remarques : lorsque l'excitation magnétique redevient nulle, nous constatons que le matériau n'est pas forcément parfaitement démagnétisé : il garde une image des domaines favorablement orientés (rémanence). Il peut subsister une **induction rémanente  $B_r$** .

Pour retrouver un matériau démagnétisé, il est nécessaire de continuer à inverser le Champ  $H$  jusqu'à une valeur  **$H_c$** , le **champ coercitif**, qui correspond au champ nécessaire pour réobtenir une équipartition des domaines. Cette grandeur est souvent utilisée pour caractériser les matériaux ferromagnétiques. Elle dépend fortement de la mobilité des parois de Bloch (matériaux magnétiquement doux ou durs).

Il est aussi courant d'observer le paramètre  $m_r$ , la **perméabilité magnétique relative** du matériau, qui correspond à la pente de la courbe mesurée au voisinage du champ coercitif.



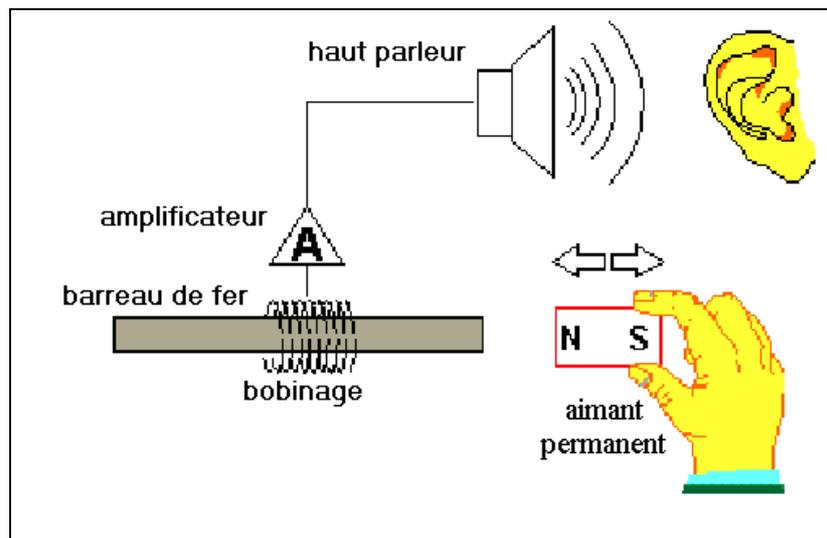
**Figure I-11** : Schéma d'un cycle d'hystérésis

Si le champ évolue cycliquement, on obtient le cycle d'hystérésis. La description en termes de microstructure magnétique et de mobilité des parois est la même pour toutes les parties. L'aire contenue dans le cycle correspond à l'énergie magnétique dissipée ou pertes hystérétiques.

### 3.2 BRUIT BARKHAUSEN

Comme il a été décrit précédemment, la structure en domaines s'établit spontanément pour diminuer l'énergie totale du système. L'application d'un champ extérieur entraîne un réarrangement de ces domaines. Cette modification d'organisation est essentiellement due aux déplacements des parois qui limitent les domaines, de telle sorte que les domaines bien orientés augmentent de volume au détriment des domaines mal orientés. Les parois ne se déplacent pas librement, elles sont accrochées sur toutes les micro- hétérogénéités présentes dans la matière (dislocations, précipités, joints de grain, ...). Ceci correspond à un phénomène d'ancrage des parois [18]. Le déplacement des parois est donc discontinu ; il se fait par sauts, les parois s'arrachent aux ancrages pour se bloquer sur de nouveaux obstacles et ainsi de suite...

**BARKHAUSEN** [19] fut le premier à mettre en évidence ces discontinuités par une expérience simple ; En testant un nouvel amplificateur reliant un bobinage placé autour d'un morceau de fer à un haut-parleur, il s'aperçoit que son montage émettait des crachotements lorsqu'un aimant permanent était approché lentement du barreau de fer.

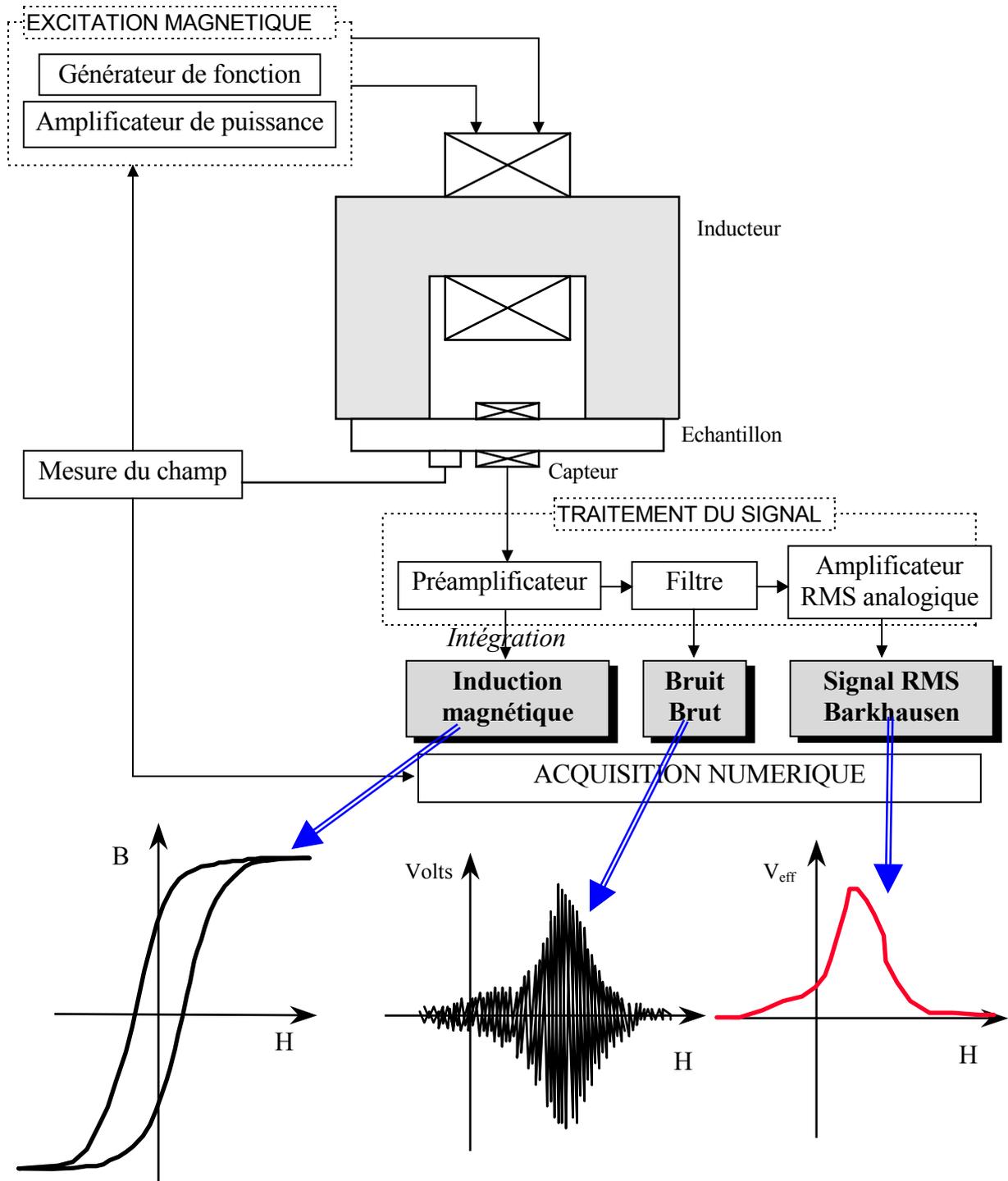


**Figure I-12:** Montage de G .H. Barkhausen

Dans cette expérience, chaque mouvement brutal de paroi provoque une petite variation locale de champ que la bobine transforme en une tension électrique. Il se trouve qu'une partie importante du spectre se situe dans le domaine audible. Ce bruit est généralement appelé **bruit Barkhausen** ou bruit ferromagnétique.

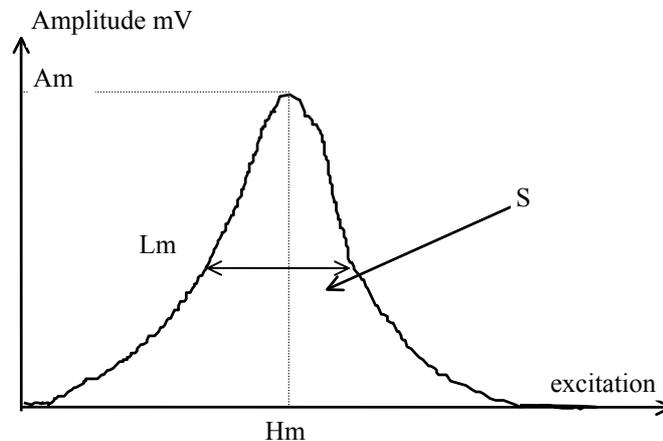
Les appareils actuels sont directement issus de cette expérience, l'excitation est évidemment électrique, provoquée par un inducteur qui magnétise le matériau plus ou moins localement suivant la forme de la pièce. La bobine "capteur" est, soit encerclante comme dans l'expérience de BARKHAUSEN, soit de côté. Dans ce cas, un petit noyau de ferrite lui est souvent adjoint pour augmenter sa sensibilité. Le signal sortant de la bobine capteur est filtré

pour isoler la partie intéressante du spectre puis amplifié. Ce signal brut est représenté sur la figure I-13. Il n'est généralement pas exploité tel quel, on en prend soit l'enveloppe soit la valeur efficace.



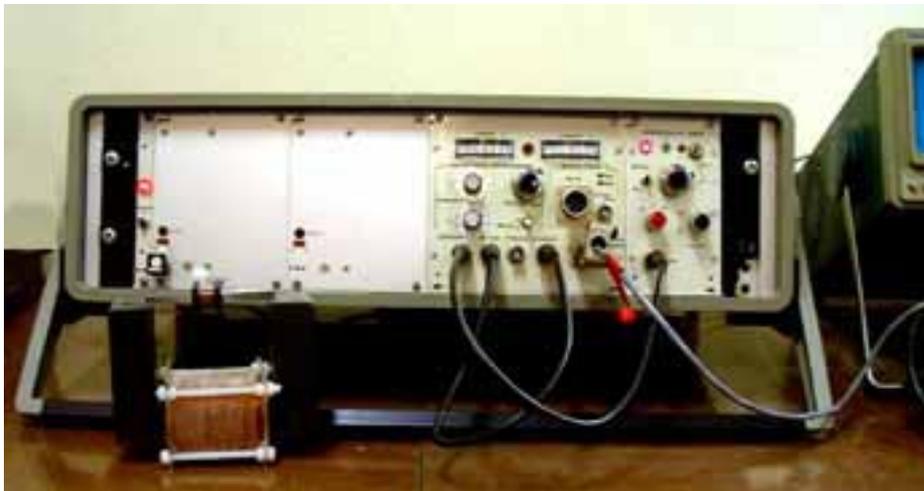
**Figure I-13** : Schéma d'appareil complet Barkhausen GEMPPM/INSA

L'exploitation quantitative du signal ainsi recueilli se fait généralement grâce à quatre paramètres dits « apparents » (fig.I-14):



**Figure I-14 :** Exemple de pic Barkhausen et des paramètres mesurés

- $H_m$  : valeur du champ correspondant au maximum du pic ;
- $A_m$  : amplitude du pic ;
- $S$  : surface sous la courbe
- $L_m$  : largeur à mi-hauteur.



**Photo I-3 :** Equipement de contrôle non destructif BARKHAUSEN GEMPPM

Le signal obtenu étant directement dû aux mouvements des parois de BLOCH, il est assez représentatif de l'interaction entre la microstructure magnétique et la microstructure métallurgique. Il peut également rendre compte de l'état de contrainte en raison du phénomène de magnétoélasticité.

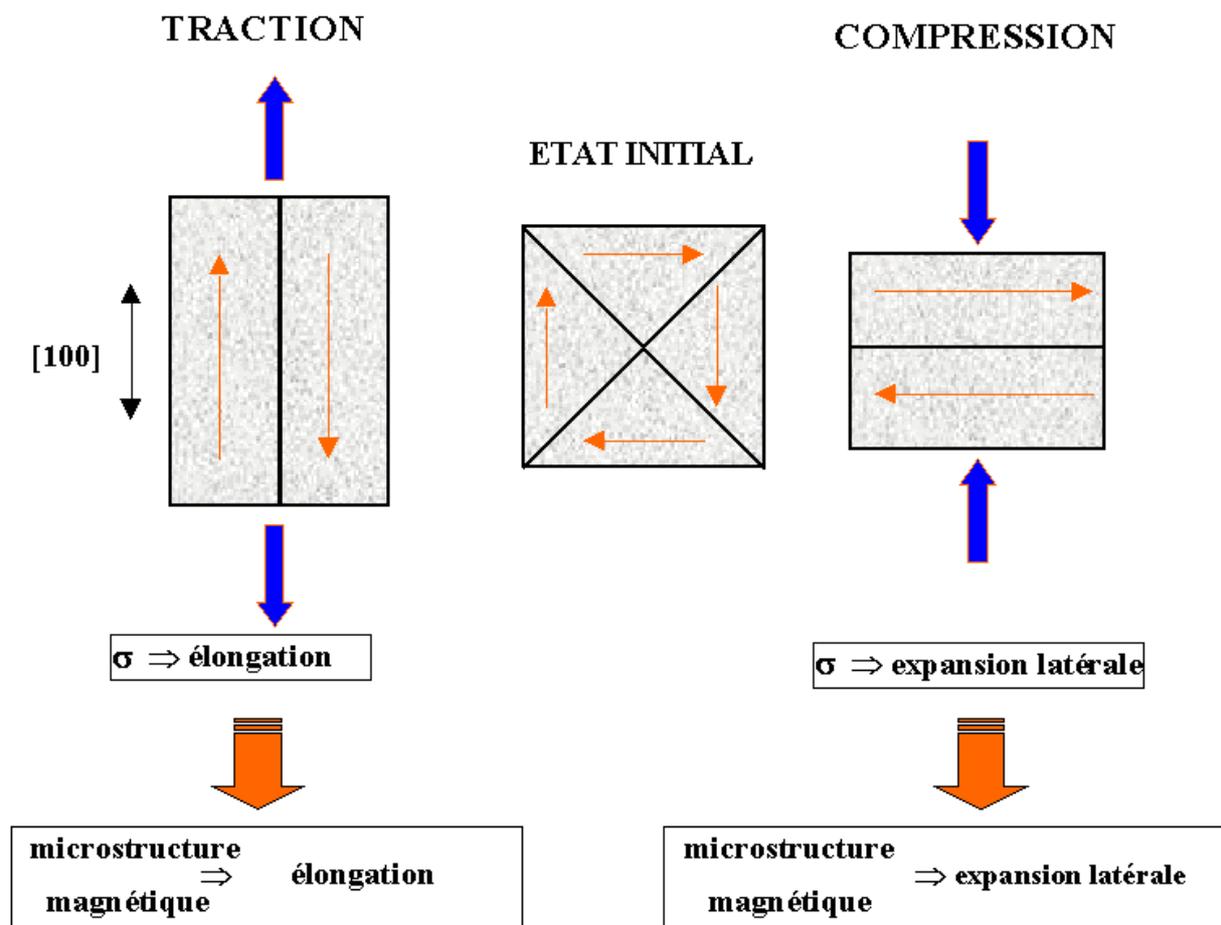
## 4 EXCITATION PAR UNE CONTRAINTE MECANIQUE AXIALE

### 4.1 INTERACTION CONTRAINTE / MICROSTRUCTURE MAGNETIQUE

L'interaction entre la contrainte et la microstructure magnétique provient du phénomène de magnéto-élasticité des matériaux ferromagnétiques à magnétostriction positive. Rappelons que cette propriété est le phénomène inverse de la magnétostriction. Il peut se résumer ainsi : si un matériau est soumis à une contrainte, la microstructure magnétique va se modifier dans le sens qui provoque, par magnétostriction, une déformation additive à celle induite par la contrainte (minimisation d'énergie). Par exemple une contrainte de traction provoque un allongement dans son propre sens et les domaines qui, par magnétostriction, présentent un allongement dans ce même sens vont être privilégiés.

Un grand nombre d'auteurs UTRATA [20], ALPETER [21], LAMONTANARA [22] expliquent qualitativement les effets d'une contrainte appliquée à l'aide du modèle à quatre domaines orientés selon les axes de facile aimantation.

Considérons un monocristal ferromagnétique.



**Figure I-15 :** modélisation de l'effet de contraintes de traction et de compression sur la microstructure magnétique

Le schéma central de la figure I-15 représente l'état initial de la microstructure magnétique, sans contrainte appliquée. La déformation totale sera la somme de la déformation élastique et de la déformation magnétoélastique.

Dans le cas du fer, matériau à magnétostriction positive, l'application d'une **contrainte de traction** (dessin de gauche) va favoriser les **domaines magnétiques longitudinaux**, conduisant à une élévation supplémentaire de l'échantillon. Dans ce cas, les domaines transversaux disparaissent. A noter que le matériau reste statistiquement désaimanté.

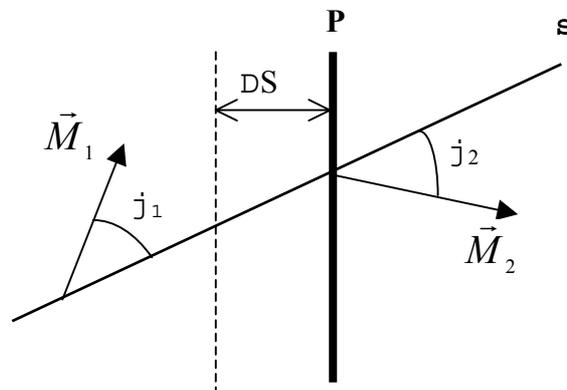
De la même manière, **une contrainte de compression** va favoriser les **domaines transversaux**, conduisant à une contraction supplémentaire du matériau tandis que les domaines longitudinaux disparaissent (dessin de droite).

Cette modification de la répartition des domaines s'effectue évidemment par des mouvements de parois. Soit une paroi P séparant deux domaines magnétiques d'aimantation  $\vec{M}_1$  et  $\vec{M}_2$ .

L'application d'une contrainte  $S$  homogène, faisant un angle  $j_1$  et  $j_2$  avec les aimantations  $\vec{M}_1$  et  $\vec{M}_2$  respectivement. Par suite de couplage magnétostrictif, la paroi se déplace et balaie la surface  $DS$  du cristal. La variation d'énergie magnétoélastique, par unité de volume, associée à ce déplacement est donnée par :

$$E_s = -\frac{3}{2} l_s S (\cos^2 j_1 - \cos^2 j_2) \quad (13)$$

Où  $l_s$  : coefficient de magnétostriction à saturation dans la direction de facile aimantation.



**Figure I-16 :** Déplacement de la paroi P sous l'effet d'une contrainte

Cette variation est nulle lorsque les aimantations  $\vec{M}_1$  et  $\vec{M}_2$  sont antiparallèles : la paroi ne se déplace pas. Il en résulte qu'une contrainte mécanique n'a pas d'influence sur une paroi à  $180^\circ$  comme l'a montré J. DEGAUQUE [23].

L'application d'une contrainte seule n'induit que le déplacement des parois à  $90^\circ$ . L'action de la contrainte sur la paroi peut être assimilée à celle d'un champ magnétique fictif  $H_s$  donnée par [24] :

$$H_s \gg \frac{3}{2} \frac{I_s}{M_s} S \quad (14)$$

avec  $M_s = |\vec{M}_1| = |\vec{M}_2|$

Néanmoins, YAMADA [25] a pu observer expérimentalement l'existence d'une très faible interaction entre la contrainte mécanique et des parois à 180°. Elle est suffisamment faible pour pouvoir être négligée.

Le principal phénomène prenant part au processus de magnétisation, lors de l'application d'une contrainte en l'absence d'un champ magnétique extérieur, est donc principalement le mouvement de parois de Bloch à 90°. Si l'application de la contrainte est progressive, les mouvements des parois vont également être discontinus et donc provoquer un bruit comme pour le signal BARKHAUSEN. Il est appelé **bruit magnétomécanique** ou bruit BARKHAUSEN d'origine mécanique. C'est lui que nous cherchons à mesurer dans le cas de la fatigue en flexion rotative.

## 4.2 BRUIT MAGNETOMECHANIQUE

La mesure du bruit magnétomécanique exige d'une part de provoquer la réorganisation de la microstructure magnétique par l'application d'une sollicitation mécanique variable dans le temps et d'autre part de mesurer la variation locale de l'aimantation induite comme dans le cas du bruit BARKHAUSEN. Comparativement au bruit Barkhausen, peu d'études ont été menées avec ce type d'excitation. On peut citer les travaux significatifs et récents : de AUGUSTYGNIAK[26], SARETE[15], DEGAUQUE [27], et SHIN[28] qui utilisent ce type d'excitation pour produire le bruit ferromagnétique.

### 1) Application de la contrainte variable en signe et valeur

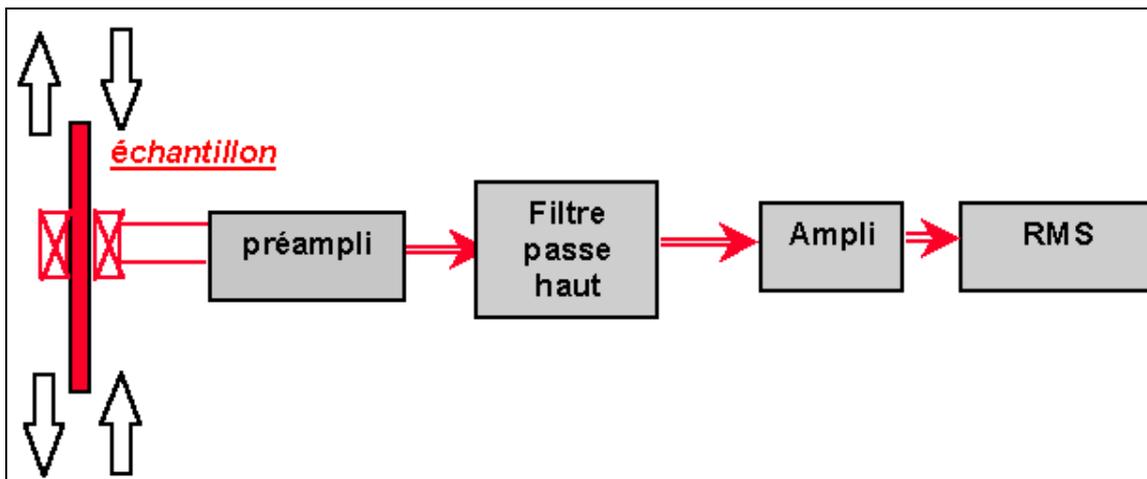
Les deux premiers auteurs ont utilisé une machine type machine de fatigue en traction compression pour appliquer une contrainte uniaxiale sur une éprouvette cylindrique. Les derniers ont utilisé la torsion appliquée sur un fil par un pendule inversé.

Deux paramètres déterminent les conditions de mise en œuvre de la technique :

- Amplitude maximale de la contrainte;
- Vitesse d'application.

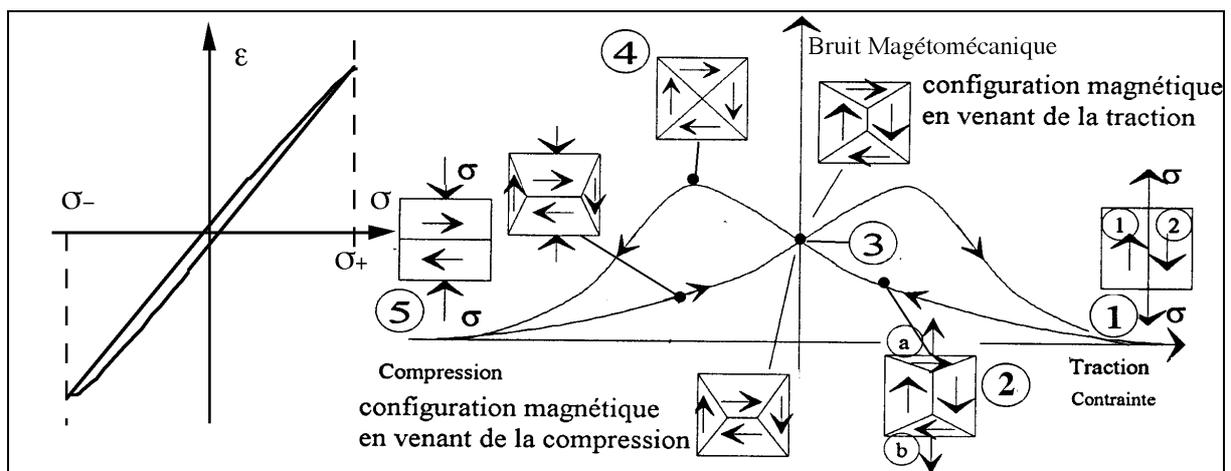
### 2) Détection du bruit magnétomécanique

Lors du processus d'excitation mécanique, le brusque changement d'orientation magnétique d'un petit volume de matière est dû aux déplacements brusques de parois de Bloch. Ils induisent des variations locales haute- fréquence de flux magnétique. L'utilisation d'une bobine correctement orientée permet de traduire cette variation de flux en impulsion électrique. Pratiquement de la même manière que pour le bruit BARKHAUSEN d'origine magnétique.



**Figure I-17 :** Schéma de la mesure du bruit magnéto-mécanique

Le dispositif est constitué d'un capteur ( bobine), d'un préamplificateur, d'un étage qui filtre et amplifie pour ne garder que la partie haute fréquence. Généralement on prend la valeur efficace du signal en fonction de la contrainte ou de la déformation. Selon LAMONTANARA [16], le signal a l'allure d'un cycle comportant deux maximums (papillons), comme indiqué par la figure I-18.



**Figure I-18 :** Cycle du bruit magnéto-mécanique en fonction de la contrainte appliquée et configurations magnétiques associées (Thèse Lamontanara [16]).

LAMONTANARA explique ce comportement à l'aide du modèle à quatre domaines, sans faire intervenir la notion de contrainte interne.

Partant d'un état saturé en traction (1), lorsque la contrainte décroît, l'énergie magnétostatique va contribuer à la création de domaines de fermeture orientés préférentiellement dans les directions perpendiculaires. Sous l'action de la contrainte de compression, les domaines perpendiculaires vont augmenter jusqu'à devenir équivalents aux domaines initiaux. L'état 4 montre un état dépolarisé mécaniquement où la mobilité des parois de Bloch est maximale. Enfin la contrainte de compression va imposer les domaines de Weiss perpendiculaires jusqu'à ce qu'ils occupent tout le matériau.

On constate un comportement symétrique autour de l'axe des contraintes nulles. Le bruit magnétomécanique présente une sorte d'hystérésis que l'on peut illustrer au point 3, où la configuration magnétique est différente selon que le matériau vient d'un état de traction ou de compression. Il faut alors dans chaque cas amener le matériau un «peu plus loin» en traction ou bien compression pour faire basculer la configuration magnétique et passer par le maximum de bruit magnétomécanique (point 4 et 7).

Trois remarques s'imposent :

- Les mouvements sont principalement ceux des parois à 90°. Pour un même saut, la variation de flux est deux fois moins importante que dans le cas du déplacement d'une paroi à 180°. Le signal est donc relativement faible.
- Il n'y a pas de saturation magnétomécanique, c'est à dire qu'une contrainte ne fera jamais quitter les directions de facile aimantation.
- Dans le cas du bruit BARKHAUSEN magnétique, l'excitation est par définition magnétique et le capteur mesure donc en partie cette excitation d'où la nécessité d'un filtrage important pour éliminer la composante basse fréquence de l'excitation, mais elle sera également sensible à tous les parasites de cette excitation (bruit). Dans le cas de la mesure du bruit magnétomécanique, le capteur n'est pas sensible au mode d'excitation ce qui donne l'avantage d'un plus large spectre de mesure.

*En conclusion : un signal de même nature que celui du bruit Barkhausen mais plus faible, un spectre possible plus large et moins bruité.*

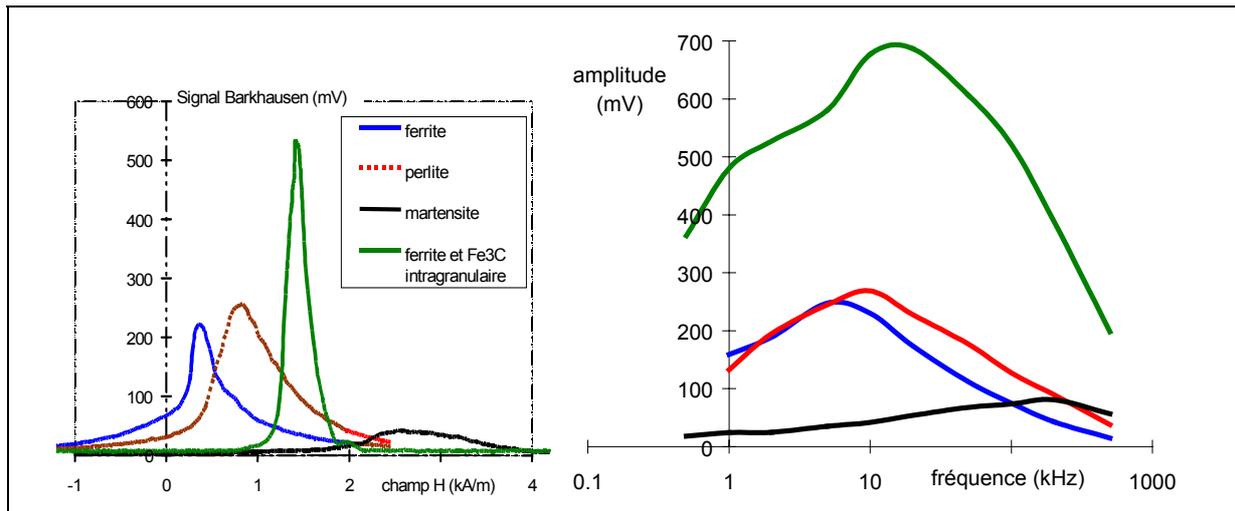
## **5 PRINCIPAUX RÉSULTATS NÉCESSAIRES À L'INTERPRÉTATION DE NOS EXPÉRIENCES**

Afin de mieux comprendre et de pouvoir expliquer nos résultats, nous présentons dans ce chapitre les résultats les plus significatifs obtenus par les différents chercheurs du laboratoire qui ont travaillé sur le sujet. Nous présentons dans un premier temps les résultats obtenus par mesure du bruit BARKHAUSEN traditionnel : influence de la nature et de la microstructure du matériau, influence de l'état de contrainte et d'une déformation plastique. Ensuite nous présentons les quelques résultats obtenus par mesures du bruit magnétomécanique.

### **5.1 ETUDES MENEES AUX MOYENS DE LA MESURE BARKHAUSEN**

#### **5.1.1 Influence de la microstructure**

La majorité des résultats présentés est issue des travaux d'Olivier SAQUET [17]. La compréhension de la microstructure magnétique est l'intermédiaire indispensable pour expliquer la sensibilité du bruit BARKHAUSEN à la microstructure des aciers. Nous illustrons ceci par la présentation des signaux de quatre états métallurgiques typiques : ferrite, perlite, martensite et ferrite avec précipités intragranulaires de cémentite. Pour chaque état, le signal Barkhausen et son analyse fréquentielle sont exploités afin d'interpréter l'organisation des domaines de Weiss et le processus d'aimantation.



**Figure I-19 :** signaux Barkhausen et analyse fréquentielle pour différents états métallurgiques

**Ferrite :** La structure ferritique est obtenue avec un acier doux (0,1% de C) recuit 20 minutes à 950°C sous atmosphère neutre et refroidie lentement au four. Dans les grains de ferrite, la microstructure magnétique est simple (parois à 180° et 90°). Le signal est d'amplitude moyenne et intervient pour un champ appliqué de 0,3 kA/m. Le pic principal intervient pour un faible champ appliqué car les ancrages sont rares dans ce type de structure et la réorganisation de la microstructure magnétique est facile. L'élargissement à la base du pic est dû aux parois à 90°. La répartition fréquentielle du signal donne une indication sur la taille des événements, elle est maximale à 5 kHz (peu de gros événements).

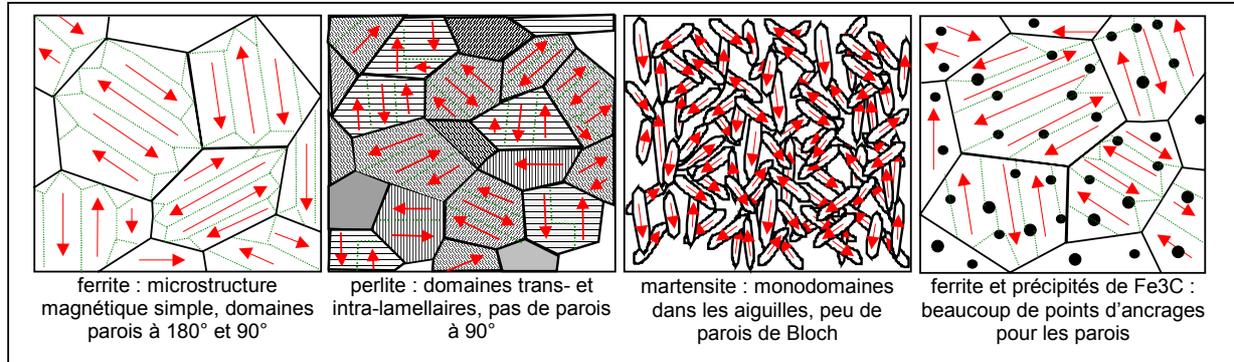
**Perlite :** Cette structure lamellaire ferrite-cémentite provient d'un acier eutectoïde (0,8% de C) recuit 20 minutes à 875°C sous atmosphère neutre et refroidie lentement au four. Dans la perlite, la microstructure magnétique est complexe : translamellaire avec une direction d'aimantation perpendiculaire aux lamelles le plus souvent et parfois intralamellaire dans la ferrite (pas de parois à 90°). Le signal est d'amplitude moyenne et intervient pour un champ appliqué de 0,8 kA/m, étalé entre 0,4 et 1,3 kA/m. Il n'y a pas d'ancrages francs mais plutôt un ralentissement des mouvements des parois par la cémentite, d'où la large gamme de champ appliqué nécessaire. La fréquence des événements est située autour de 10 kHz.

**Martensite :** Un acier à 0,55% de C est austénitisé 20 minutes à 875°C sous atmosphère neutre puis trempé à l'eau pour obtenir la structure martensitique. Dans chaque aiguille, la maille cristalline du fer est déformée, étirée : elle est quadratique avec une arête plus grande dans la direction de l'aiguille. Par magnéto-élasticité, cette déformation tend à aligner et à stabiliser les moments magnétiques dans la direction de la déformation. Chaque aiguille est un mono-domaine magnétique et, pendant la magnétisation, il n'y a quasiment pas de mouvement de parois de Bloch. Le signal est très faible et intervient pour un champ appliqué très élevé de 2,7 kA/m car la réorganisation de la microstructure magnétique demande beaucoup d'énergie pour vaincre l'effet stabilisateur de la magnéto-élasticité. Les événements sont très brefs et la répartition fréquentielle montre une activité maximale pour des fréquences supérieures à 100 kHz.

**Ferrite et précipités intragranulaires de cémentite :** cette structure est obtenue par revenu pendant une heure à 600°C d'un acier martensitique. La microstructure magnétique est identique à celle décrite dans le cas de la ferrite, mais les précipités de cémentite sont des

ancrages puissants qui freinent les parois de Bloch. Le signal est fort et étroit à 1,4 kA/m. Dès que le champ nécessaire est atteint, tous les événements se produisent : ils sont nombreux et forts. Le maximum de la répartition fréquentielle se situe entre 10 et 20 kHz.

O. SAQUET [29] donne une schématisation des microstructures magnétiques dans ces quatre états métallurgiques d'après des observations et la compréhension des signaux Barkhausen mesurés.



**Figure I-20 :** *interprétation des microstructures magnétiques*

### 5.1.2 Influence des précipitations

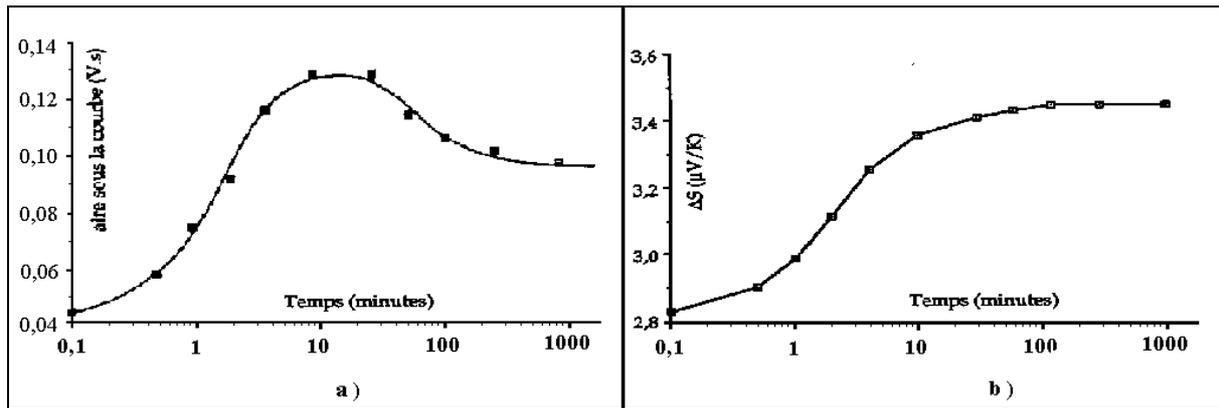
Les études réalisées sur du fer avec 400 ppm de carbone par C. GATELIER [3] permettent de comparer les influences des précipitations intragranulaire et intergranulaire de cémentite à taille de grain constante.

Tout d'abord, il apparaît que la précipitation intergranulaire de cémentite ne modifie pas l'amplitude du signal Barkhausen car elle ne modifie pas les ancrages des parois de Bloch à l'intérieur des grains. En revanche, elle provoque un élargissement du signal attribué à la nucléation plus importante des parois à 90°.

La précipitation intragranulaire de cémentite est obtenue par des maintiens à 250°C de plus en plus long d'échantillons initialement trempés à l'eau vers 720°C. La cinétique a été suivie, en fonction du temps de maintien, par le pouvoir thermoélectrique (PTE) et par caractérisation Barkhausen.

La surface du pic Barkhausen et la mesure du pouvoir thermoélectrique sont présentées I-21 en fonction du temps de vieillissement. Dans un premier temps, la partie de précipitation de la cémentite provoque une augmentation importante de l'amplitude. Par la suite, la coalescence des précipités provoque une diminution de l'amplitude du signal.

GATELIER propose une interprétation en terme de nombre d'événements Barkhausen : la précipitation de la cémentite apporte des points d'ancrage plus nombreux pour les parois de Bloch. A microstructure magnétique identique, les événements Barkhausen élémentaires sont plus nombreux et l'amplitude du signal augmente. La coalescence de ces précipités implique qu'il y a moins de points d'ancrage et qu'ils deviennent plus gros : cela provoque la diminution du nombre d'événements et la diminution de l'amplitude du signal.



**Figure I-21 :** a) Evolution de la surface du pic Barkhausen b) mesure du pouvoir thermoélectrique en fonction du temps de maintien à une température de 250°C après trempe à l'eau d'un fer pur additionné de 400 PPM de carbone à partir de 720°C ; Résultats de C. GATELIER [3].

### 5.1.3 Influence de l'état de contrainte

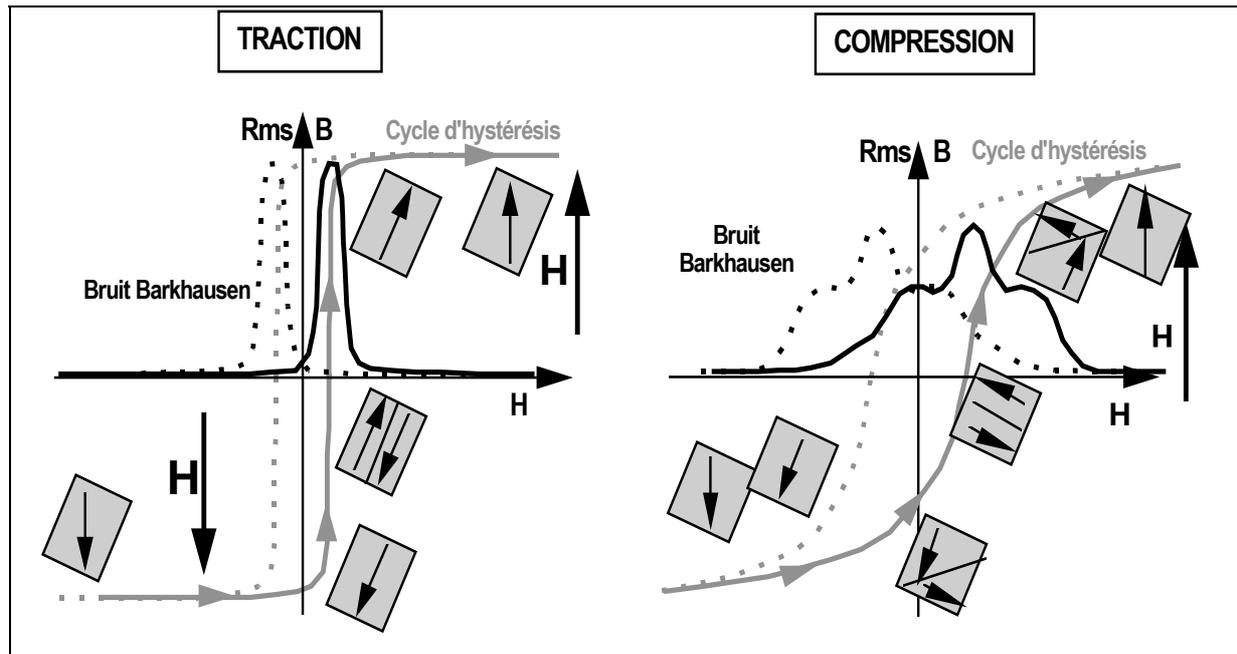
Nous présentons dans ce paragraphe l'effet d'une contrainte constante lors de caractérisation Barkhausen sous excitation magnétique dans le cas du fer, matériau à magnétostriction positive.

#### 5.1.3.1 Effet d'une contrainte SARETE[30], TIITTO[31], JILES[32]

La magnéto-élasticité peut être illustrée dans le cas du fer, à partir d'un modèle à quatre domaines magnétiques (voir paragraphe 3-2). L'application d'une contrainte va favoriser certains domaines magnétiques : ceux de même direction dans le cas de la traction et ceux perpendiculaires pour la compression. Ces microstructures magnétiques différentes selon la sollicitation mécanique vont donner lieu à des signaux Barkhausen caractéristiques.

Remarquons que la mesure de contrainte par la technique Barkhausen est directionnelle. La morphologie initiale de la microstructure magnétique est conditionnée par son passé: contrainte et champ antérieur subis.

L'application d'une contrainte de traction provoque l'augmentation de l'amplitude du pic et son décalage vers les valeurs de champ plus faibles : dans ce cas, les domaines privilégiés sont dans la direction de la contrainte, donc dans la direction du champ appliqué. Le processus de magnétisation est alors principalement constitué de mouvements de parois à 180° et le matériau a un comportement magnétique plus doux. A l'inverse, une contrainte de compression provoque une diminution de l'amplitude, un élargissement et un décalage vers les champs forts. Les domaines privilégiés sont perpendiculaires à la direction de la contrainte et du champ magnétique. Le processus de magnétisation est alors plus complexe, avec des mouvements de parois à 90° et à 180°.



**Figure I-22 :** explication qualitative de la sensibilité à la contrainte (par J. Sarete [30]).

### 5.1.3.2 Double sensibilité à la microstructure et aux contraintes

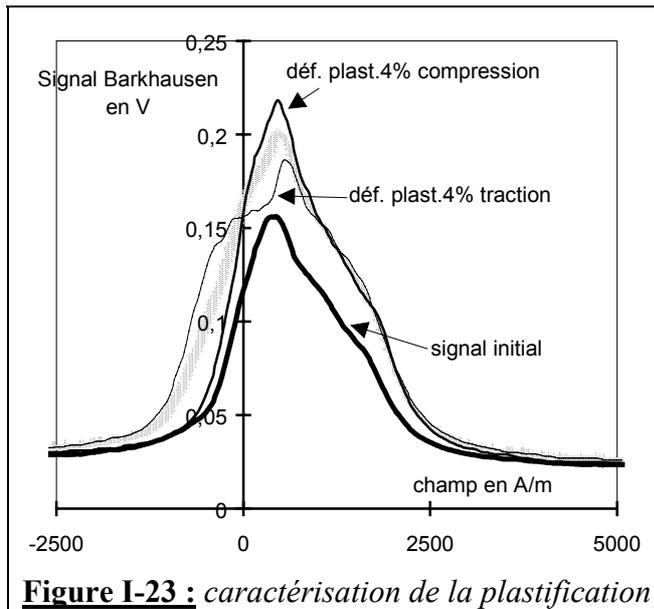
Ces deux sensibilités présentent un intérêt car elles permettent d'envisager de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la mesure des efforts dans les câbles ou le contrôle de la profondeur et de la qualité des traitements thermiques superficiels... Mais cette dualité peut souvent s'avérer gênante car, dans beaucoup d'applications, il est difficile, voire impossible, de conclure si les variations observées sont microstructurales ou liées aux contraintes en particulier internes.

Rappelons quelques principes simples sur ces deux influences:

- **Les évolutions microstructurales** jouent principalement sur l'amplitude, la position et l'élargissement du pic. Les évolutions observées sont souvent importantes.
- **Les contraintes** modifient davantage la forme des pics : à une contrainte de traction correspond un pic plus fin et d'amplitude plus importante ; à une contrainte de compression correspond un pic très caractéristique avec des bosses à droite et à gauche du pic principal, l'amplitude du pic diminue et il est décalé vers les champs plus forts.

### 5.1.3.3 Caractérisation de la plastification

Est-il possible de déterminer de manière non destructive si une structure a été au cours de sa vie portée dans le domaine plastique et dans certains cas d'évaluer la déformation qu'elle a préalablement subie ? SARETE [33] a effectué des travaux intéressants dans ce sens. Métallurgiquement, ce problème revient à caractériser la densité de dislocations donc la microstructure. On doit s'attendre à un élargissement du pic, à une augmentation de son amplitude (plus d'obstacles) et à un décalage vers les champs plus forts.



**Figure I-23 :** caractérisation de la plastification

La figure I-23 représente les résultats pour deux éprouvettes identiques : une déformée à 4% en traction, l'autre déformée dans les mêmes conditions, à 4% mais en compression. En faisant l'hypothèse que, à un même taux de déformation correspond une même densité de dislocations, nous devrions obtenir la même signature. La différence observée ne peut s'expliquer que par **l'effet des contraintes internes**, de type BAUSCHINGER, liées à une inhomogénéité de la déformation entre grains ou à l'intérieur des grains. Cette hypothèse est confirmée par l'observation de la forme des pics : le signal correspondant à une déformation

plastique de traction présente un gonflement du côté gauche caractéristique de contraintes de compression. De la même manière, le signal correspondant à une déformation de compression est plus pointu et plus haut, caractéristique de contraintes de traction. Ce signe des contraintes internes correspond à la théorie qui prévoit une contrainte interne de signe opposé à celui de la déformation qui lui a donné naissance. Il est possible d'imaginer un signal intermédiaire, courbe en gris, représentant la signature Barkhausen en l'absence de contrainte. Par rapport au signal initial, il présente la forme attendue pour l'évolution microstructurale.

Cet exemple montre qu'une analyse détaillée de la forme et de l'amplitude des signaux Barkhausen permet, dans certains cas, d'extraire les influences respectives des contraintes et de la microstructure.

## 5.2 RESULTATS OBTENUS PAR MESURES DU BRUIT MAGNETOMECHANIQUE (BMM)

La mesure du bruit magnéto-mécanique (BMM) correspond à la réorganisation de la microstructure magnétique sous l'effet d'une contrainte (excitation mécanique). La microstructure magnétique prend pour chaque nouvelle contrainte un état d'équilibre différent. En effet la microstructure magnétique ne répond pas de la même manière lorsque le matériau est soumis à une contrainte de traction ou de compression comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 5-1.

Très peu d'études ont été effectuées dans le domaine du bruit magnéto-mécanique dont certains eu lieu au GEMPPM. D'abord seront abordées les études faites dans le domaine élastique en traction, en compression, puis en traction et compression alternativement, ensuite celles faites pour caractériser le domaine plastique et en dernier lieu celles relatives à la fatigue.

Du point de vue pratique, l'excitation mécanique est obtenue sur des machines de fatigue classiques (traction compression) travaux de Jean SARETE [15], d'AUGUSTINYAK [34] ou en pendule de torsion, travaux de SHIN [28].

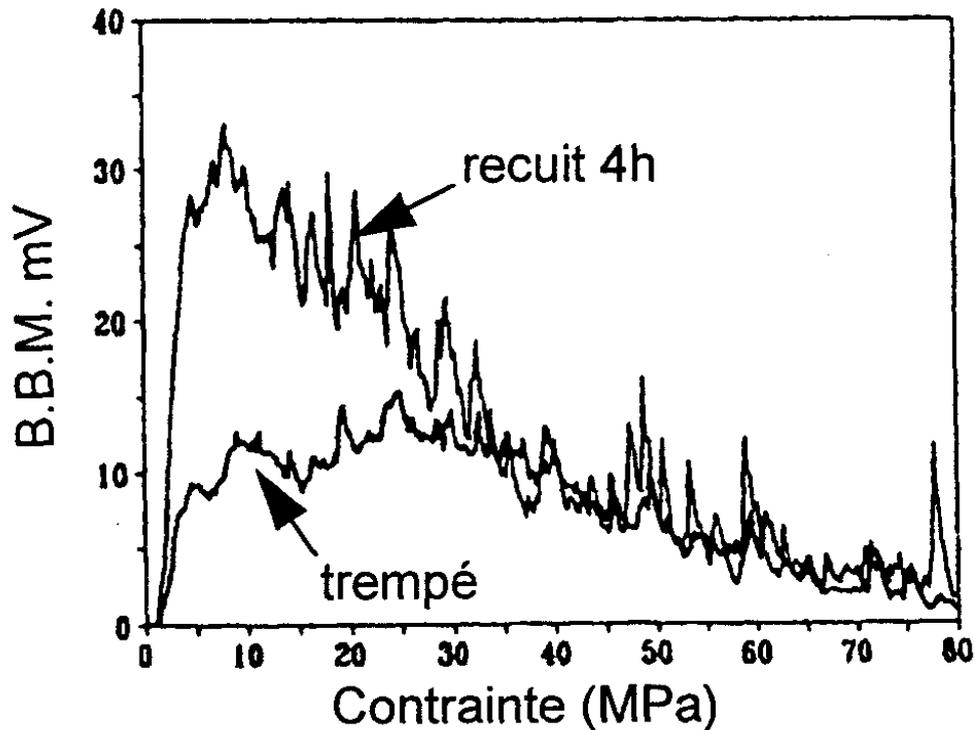
Deux paramètres déterminent les conditions de mise en œuvre de la technique :

- Amplitude maximale de la contrainte;
- Vitesse de la déformation.

### 5.2.1 Traction monotone dans le domaine élastique

Etude faite au GEMPPM par AUGUSTYNIAK [26] sur deux échantillons de même acier, l'un recuit et l'autre trempé dans le but mettre en évidence l'interaction existant entre le BMM et les contraintes internes.

Lors d'un essai de traction dans le domaine élastique, l'auteur mesure en continu la valeur efficace du bruit magnétomécanique en fonction de la contrainte appliquée. Cette dernière augmente linéairement avec le temps (fig. I-24).



**Figure I-24:** Bruit magnétomécanique en fonction de la contrainte appliquée pour un état trempé et un état recuit du même matériau d'après AUGUSTYNIAK [35].

AUGUSTYNIAK note que le maximum d'activité BMM est situé à des niveaux de contraintes faibles et très différents pour les deux échantillons. Il établit alors une relation entre la courbe  $U(s)$  (tension moyenne du signal recueilli) et une fonction de distribution des contraintes internes  $N(s)$ , grâce à un modèle phénoménologique développé par SMITH et BIRCHAK [36]. L'auteur en déduit la possibilité d'utiliser la mesure du BMM comme moyen d'estimer le niveau de contraintes internes dans le matériau.

Ce résultat peut s'expliquer en considérant que la mobilité des parois de Bloch est maximale lorsqu'elles sont soumises à une contrainte « effective » nulle, c'est à dire lorsque la contrainte appliquée compense la contrainte interne.

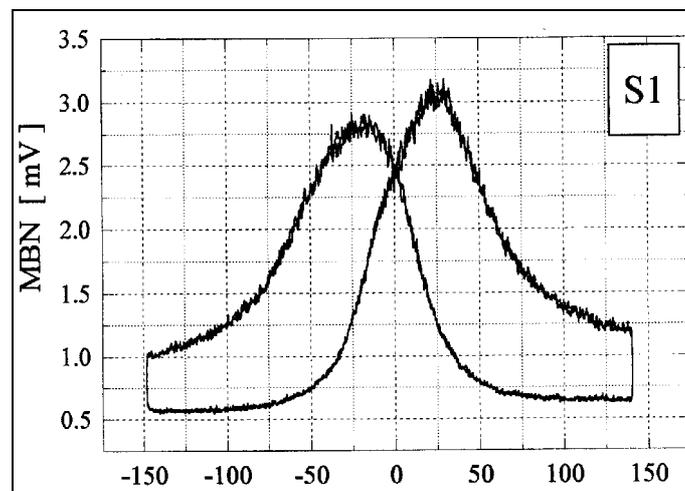
Les résultats exposés sur la figure I-24 montrent donc clairement la différence d'état de contrainte interne entre un échantillon trempé et un échantillon recuit et permettent d'approcher la valeur moyenne de  $s_i$ , représentée par le niveau de la contrainte appliquée donnant le maximum de bruit magnétomécanique. Nous notons bien, sur cet exemple, que la contrainte interne dans le cas de l'échantillon recuit est plus faible que celle de l'échantillon

trempé. Nous retiendrons également que pour le matériau recuit le BMM est maximum pour des contraintes très faibles (10 à 20 MPa ).

### 5.2.2 Application d'une contrainte cyclique Traction Compression

CHMIELEWSKI [37] a étudié le bruit magnétomécanique avec deux sortes de capteurs (bobine encerclante et bobine plate) sur l'acier XC10 recuit en appliquant une contrainte cyclique de 150 MPa dans le domaine élastique. Les résultats obtenus dans les deux cas sont comparables, sauf que pour la bobine plate le rapport signal/bruit est moins favorable.

La figure I-25 présente le bruit magnétomécanique obtenu avec la bobine encerclante. Nous remarquons bien une boucle de Bruit magnétomécanique, avec deux maximums qui apparaissent aux faibles contraintes. Comme le prévoit la théorie paragraphe 4-2.



**Figure I-25** bruit magnétomécanique de XC 10 recuit d'après CHMIELEWSKI [37].

L'application d'une contrainte externe cyclique en traction et en compression, sur un matériau ferromagnétique, en l'absence d'excitation magnétique extérieure et à contrainte interne faible, produit une courbe cyclique comportant deux maximums (papillons).

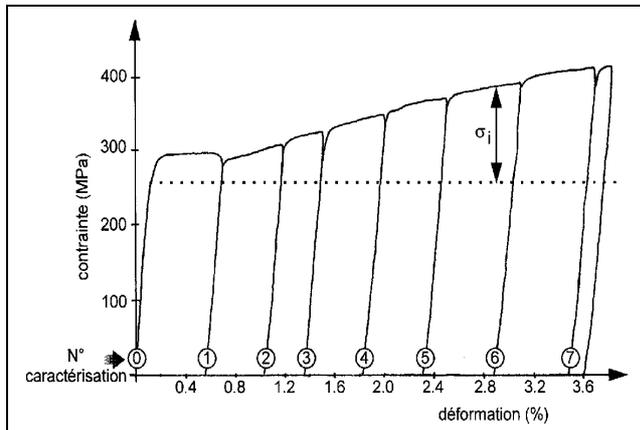
Nous observons une légère dissymétrie qui est très souvent retrouvée par les autres expérimentateurs J. SARETE [15], J. LAMONTANARA [16].

- En tenant compte des conditions expérimentales, le BMM est entre 5 et 20 fois plus faible que le bruit Barkhausen.
- La dissymétrie provient probablement de la différence de structure quand on vient de la traction ou de la compression comme nous l'avons signalé dans le paragraphe 4.

Cette hystérisis de la configuration de la microstructure magnétique consécutive à l'application d'une contrainte avait déjà été soulignée par J CATTY [4] pour des mesures de magnétostriction sous contrainte. Avant chaque essai J. CATTY devait démagnétiser l'échantillon après application de la contrainte afin d'« aider » le matériau à atteindre un état d'équilibre correspondant à la contrainte appliquée. Dans le cas contraire son échantillon se trouvait dans une configuration favorisant la microstructure magnétique de l'état de contrainte précédent.

### 5.2.3 caractérisation de la déformation plastique par BMM

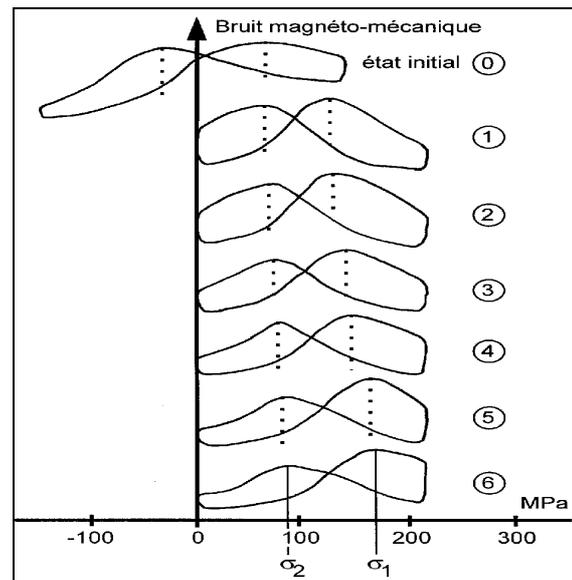
Jean SARETE [15] a cherché à caractériser l'effet d'une déformation plastique monotone en traction puis en compression par méthode magnétomécanique en vue de mettre en évidence l'influence des contraintes internes. L'essai est effectué sur une éprouvette haltère de fatigue montée sur une machine d'essai hydraulique. Nous présentons uniquement les résultats obtenus en traction monotone car l'évolution semble symétrique en compression.



**Figure I-26 :** Courbe de traction et points de caractérisation

Comme l'indique la figure I-26, l'éprouvette est plastifiée progressivement. Elle est périodiquement déchargée et amenée à contrainte nulle. Ensuite l'éprouvette est soumise à une contrainte cyclique de caractérisation dans le domaine élastique. Le bruit magnétomécanique est alors enregistré. Le processus est repris jusqu'à une déformation de 3.6%. Les points de (0) à (7) indiquent les points où sont effectuées les caractérisations magnétomécaniques.

La figure I-27 montre les bruits magnétomécaniques obtenus aux différents points de caractérisation. Le signal comporte deux maximums désignés par  $s_1$  et  $s_2$ . Ces deux pics de BMM se décalent vers les contraintes de traction et cet écart augmente progressivement avec la déformation plastique. La distance entre les deux pics ne varie pratiquement pas. De ce comportement, l'auteur affirme que la position moyenne des pics est intrinsèquement liée au niveau de contrainte interne dans le matériau et constitue donc un indicateur du signe, mais aussi du niveau des contraintes internes. Dans le cas présenté, la valeur moyenne  $s_1$  et  $s_2$  est de l'ordre de 130 MPa en traction, ce qui revient à dire qu'il faut appliquer une contrainte de traction de 130 MPa pour annuler la contrainte interne qui est donc de compression.



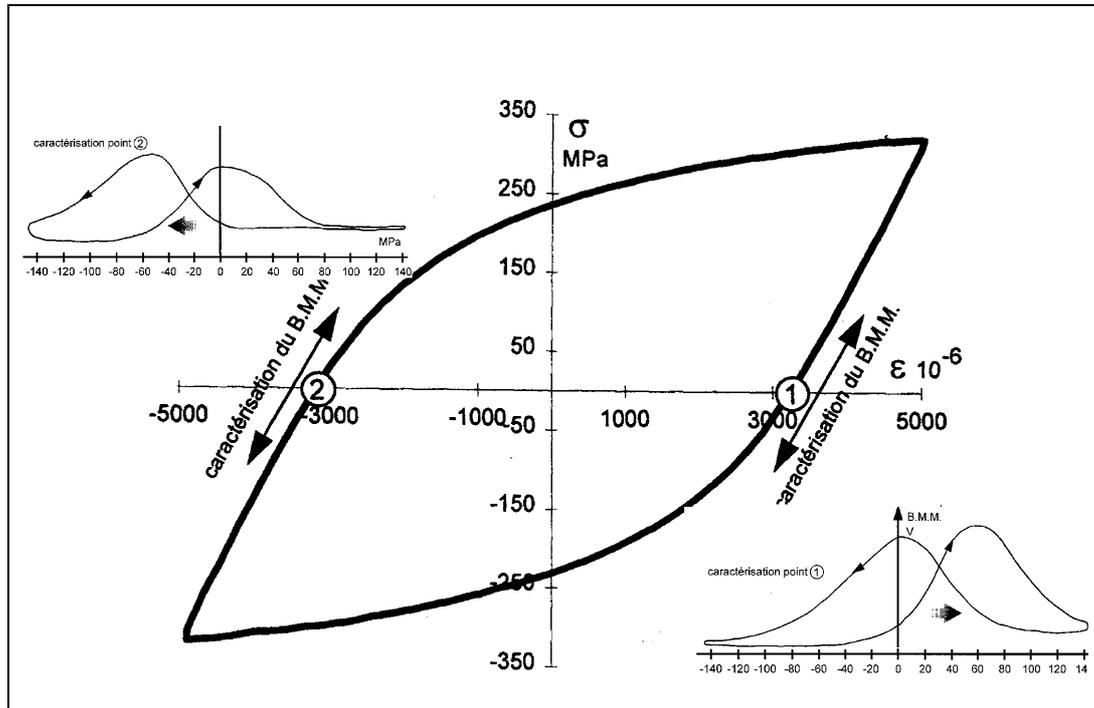
**Figure I-27 :** BMM obtenu aux différents points

Des résultats équivalents mais de signe opposé sont obtenus pour une plastification en compression.

### 5.2.4 Caractérisation de la fatigue par BMM

J. SARETE [15] a effectué la caractérisation par bruit magnétomécanique dans un essai de fatigue. La caractérisation est faite, après l'arrêt de l'essai en deux points (1) et (2) comme

indiqué sur la figure I-28. A chacun de ces points, il est procédé à une petite sollicitation mécanique entre  $-150$  MPa de manière à provoquer les mouvements des parois.



**Figure I-28:** Cycle de fatigue, points de caractérisation et bruit magnétomécanique correspondant.

Sur la figure I-28 est reporté le bruit magnétomécanique aux points 1 et 2.

Le décalage du BMM qui est observé peut être considéré comme un indicateur du signe et du niveau des contraintes internes dans le matériau.

Nous détaillerons les interprétations dans le paragraphe 6 relatif aux résultats de fatigue.

### 5.2.5 Contrainte cyclique de cisaillement

Certaines études ont été faites en appliquant une sollicitation de torsion conduisant à des déformations de cisaillement : DEGAUQUE [38], AUGUSTYNIAK [39]. Elles correspondent généralement à des mesures de frottement intérieur visant à déterminer la dissipation induite par la magnétostriction dans les matériaux ferromagnétiques. A notre connaissance, il n'y a pas eu une caractérisation en fatigue proprement dite par ce type de sollicitations. Nous allons exposer brièvement quelques résultats significatifs et récents dans ce domaine.

DEGAUQUE [38] a étudié les pertes d'énergies magnétomécaniques, induites par l'application d'une contrainte cyclique de cisaillement. Un fil ferromagnétique soumis à une contrainte de torsion impose au matériau des déformations dans le domaine élastique. Aux fortes contraintes, la déformation magnétostrictive tend vers une valeur de saturation. Lorsque l'on supprime toute contrainte, l'éprouvette ne retrouve pas ses dimensions initiales et il subsiste une déformation rémanente. Sous l'action d'une contrainte de cisaillement, la déformation magnétostrictive de l'échantillon décrit également un cycle d'hystérésis.

L'auteur montre que l'aire de ce cycle est proportionnelle aux pertes d'énergie magnétomécanique. Ces pertes sont associées aux déplacements irréversibles des parois à 90°.

La relation, entre les cycles de bruit magnétomécanique obtenu par application d'une contrainte cyclique et les pertes d'énergie par frottement interne magnétoélastique, a également été étudiée par AUGUSTYNIAK [39] sur différents matériaux ferromagnétiques.

SHIN [40], dans une étude récente, a étudié les effets magnétomécaniques dans le cas de Fe, Ni, Fe-Si et Permendur. Il s'est intéressé à l'amortissement magnétomécanique c'est-à-dire la capacité qu'ont les matériaux magnétostrictifs d'amortir les vibrations mécaniques auxquelles ils sont soumis. Il montre que la mesure de l'amplitude du maximum d'amortissement magnétomécanique s'avère être une technique intéressante et d'une grande sensibilité pour estimer les faibles écrouissages dans les tôles.

## **6 RESULTATS RELATIFS A LA FATIGUE DES ACIERS**

Dans le paragraphe précédent, nous avons décrit la sensibilité des méthodes des bruits ferromagnétiques aux évolutions microstructurales et aux contraintes. Ces techniques ont des potentialités dans le cadre de l'évaluation non destructive (mesure de l'épaisseur de traitement thermique, mesure de dureté, mesure de contrainte).

Nous allons maintenant nous intéresser à l'utilisation de ces méthodes dans le suivi de la fatigue des matériaux ferromagnétiques. Le bruit Barkhausen est sensible d'une part aux paramètres microstructuraux et d'autre part à l'état de contrainte appliquée ou interne ce qui a donné l'idée d'appliquer cette technique à la caractérisation de la fatigue des aciers. Cette approche est prometteuse dans la mesure où les phénomènes métallurgiques, qui conduisent à l'endommagement par fatigue, se localisent souvent près de la surface du matériau. En effet, il a été montré par plusieurs auteurs FILINOV et al. [41], SIPAHI et al. [42] que la mesure Barkhausen est plus sensible aux couches de surface. Certaines études ont été faites pour tâcher de caractériser l'évolution d'un endommagement par fatigue, nous citerons les travaux de RUUSKANEN et KETTUNEN [43] [44], KARJALAINEN et MOILANEN [45], BHATATTACHARYA [46], DOBMANN [47]. La synthèse et les principales conclusions se trouvent dans la thèse de J. SARETE [15]. Nous ne reprendrons ici que les points directement intéressants pour notre étude.

### **6.1 ASPECTS MICROSTRUCTURaux**

La compréhension des phénomènes responsables de la fatigue des aciers passe par la connaissance des mécanismes mis en jeu dans les cas particuliers simples : monocristaux puis polycristaux. Ces mécanismes dépendent largement de la nature du matériau en particulier du système cristallin (CFC ou CC), de la température et de la vitesse de sollicitation.

De nombreuses études ont été menées dans le Laboratoire GEMPPM (Groupe Plasticité Endommagement), particulièrement : les travaux de J. CHICOIS [48] sur la caractérisation microstructurale de matériaux cubiques à faces centrées (Aluminium) et ceux de J. SARETE [15] sur les matériaux cubiques centrés (fer et aciers). Notre travail s'insère dans la suite de ces travaux.

De manière synthétique, les métaux et alliages cubiques présentent un comportement essentiellement dicté par le rapport des mobilités des dislocations vis, coins ou mixtes (microplasticité) :

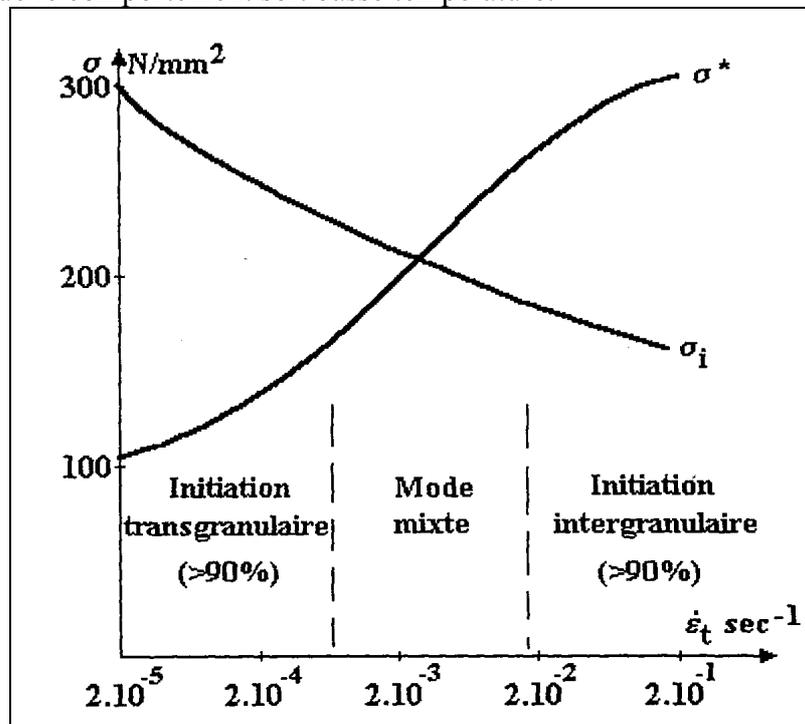
Soient  $V_v$  et  $V_c$  respectivement les vitesses de déplacement des dislocations vis et coins, deux comportements sont observés en pratique :

Un comportement « basse température », pour  $T < T_a$ , où  $V_v/V_c \ll 1$ .

Un comportement « haute température » pour  $T > T_a$ , où  $V_v/V_c \gg 1$ .

Cette température de transition  $T_a$  (température athermique) est typiquement de l'ordre de 0.1-0.2  $T_f$ . Pour le fer, elle est donc au voisinage de la température ambiante. En raison de l'activation thermique (équivalence temps/température), elle est également sensible à la vitesse de déformation. Si bien que lors des essais à température ambiante le comportement peut être : haute ou basse température selon la vitesse de déformation.

La vitesse influence donc directement la température  $T_a$ . Dans le cas du fer à température ambiante, une faible vitesse de déformation conduira à un comportement de type haute température alors qu'une forte vitesse pourra favoriser un comportement de type basse température se rapprochant du comportement des CFC. Dans son étude, J. SARETE a effectué des essais à faible vitesse de déformation (fatigue oligocyclique) et a admis un comportement haute température. Pour des vitesses élevées (fatigue endurance), il est envisageable que le comportement soit basse température.



**Figure I-29 :** Mode d'initiation de fissures en fonction de la vitesse de sollicitation cyclique. (Alliage Fe-26% Cr-1% Mo) d'après MAGNIN et al [49]

En s'appuyant sur les travaux de MAGNIN et DRIVER [49][50], LUKAS [51], SARETE [15], les évolutions microstructurales de ces deux modes peuvent être résumées de manière suivante :

### 6.1.1 Fatigue des aciers type « Basse température »

- Forte friction de réseau sur les dislocations vis.
- Contribution dominante de la contrainte effective sur la contrainte interne.
- Vitesse des dislocations vis très faible par rapport aux dislocations coins.

- Aux faibles amplitudes de déformation plastique, accommodation de la déformation par les dislocations coins.
- Longs segments de dislocations vis aux faibles  $D_{\epsilon_p}$ .
- Structure de cellules aux fortes  $D_{\epsilon_p}$ .
- Bandes de glissement mal définies en surface.
- Changement de forme important conduisant à des ruptures intergranulaires en fatigue.

### 6.1.2 fatigue des aciers type « Haute température »

- Friction de réseau sur les dislocations vis plus faible.
- Vitesse des dislocations vis et coin sensiblement identiques.
- Rapprochement du comportement des cubiques faces centrées.
- Structure de canaux et veines, puis bandes de glissement persistantes, cellules de dislocations.
- Initiation de fissures préférentiellement transgranulaire, dans les bandes de glissement.

Les paramètres influençant le comportement en fatigue du polycristal cubique centré sont essentiellement la température, la vitesse de déformation, l'amplitude de la déformation.

Pour les essais que nous envisageons :

- La température sera la température ambiante de l'ordre de 35° (essais réalisés au Tchad).
- La contrainte appliquée sera légèrement supérieure à la limite d'endurance qui sera déterminée par une série d'essais préalables (courbe de WOLHER), afin d'aboutir à des ruptures entre  $10^6$  et  $10^8$  cycles.
- La fréquence de sollicitation sera de 16,7 Hz (1000 tours par minute) ce qui aboutit à une vitesse moyenne de sollicitation de l'ordre de  $\dot{\epsilon} \gg 5 \cdot 10^{-2} \text{ S}^{-1}$ .

Bien que la température soit assez élevée, ces conditions conduisent probablement à un comportement basse température.

La connaissance des mécanismes mis en jeu et l'influence des divers facteurs expérimentaux est indispensable à l'analyse et interprétation des essais.

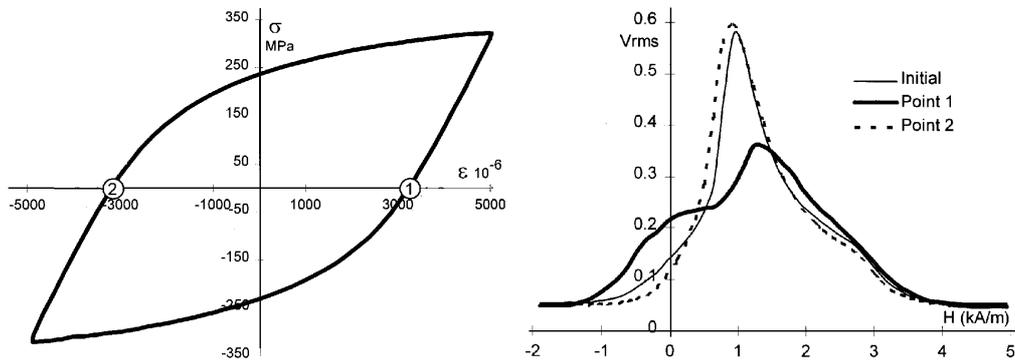
## 6.2 CARACTERISATION DE LA FATIGUE PAR BRUIT FERROMAGNETIQUE

Comme nous l'avons dit au début, très peu d'études ont été faites pour suivre l'évolution du signal Barkhausen au cours de cyclage de fatigue. Cette partie se trouve bien détaillée dans la thèse de J. SARETE [15]. Notre travail s'inscrivant dans le prolongement de cette étude, Il nous apparaît important d'exposer brièvement : la démarche, les résultats et les conclusions de ce dernier.

J. SARETE a travaillé en fatigue oligocyclique (rupture entre  $10^2$  et  $10^5$  cycles), sur un acier à bas carbone (A48 de EDF). Les essais ont été réalisés à température ambiante et pour une vitesse de déformation totale de  $4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Dans ces conditions, le mode de déformation est de type « haut température ».

La caractérisation magnétique s'effectue en différents points du cycle de fatigue après interruption de l'essai.

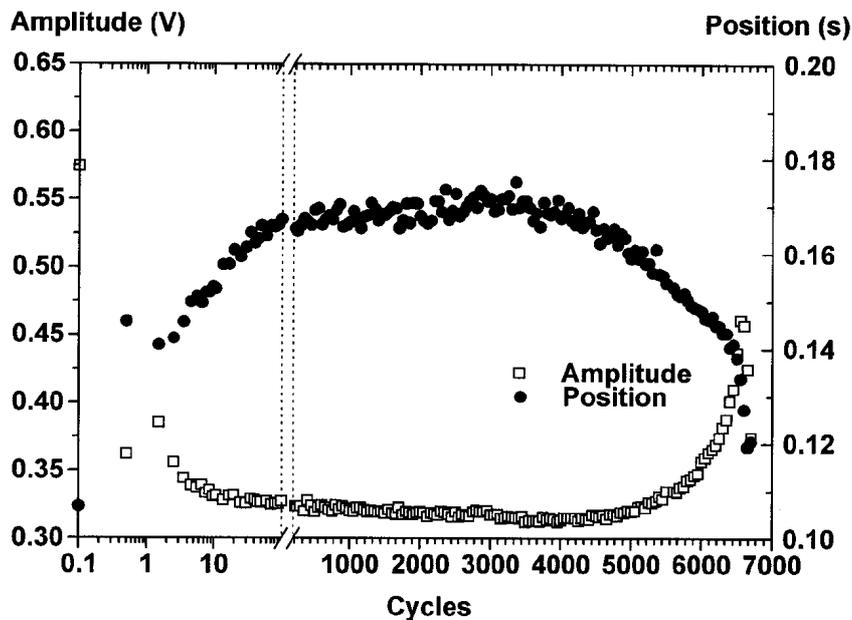
La figure I-30 présente le cycle de fatigue, les deux points choisis de caractérisation (à contrainte nulle) et les signaux Barkhausen correspondants.



**Figure I-30 :** Points de caractérisation et signaux Barkhausen correspondants d'après Thèse Sarete[15].

Le signal Barkhausen obtenu au point 1, l'état déchargé à partir de la traction, présente un signal d'amplitude relativement faible et un renflement à gauche, vers les champs magnétiques faibles. Au point 2, état déchargé en compression, le signal Barkhausen présente un monopic étroit et d'amplitude assez élevée. Ce qui met en évidence l'importance du mode de déchargement et donc des contraintes internes.

Une fois les deux points bien définis, l'auteur a suivi l'évolution de l'amplitude et de la position du pic jusqu'à la rupture. Ces résultats sont présentés en fonction du nombre de cycles appliqués à l'éprouvette. Nous présentons uniquement le graphique (figure I-31) correspondant aux caractérisations effectuées au point 1, étant entendu que les évolutions suivent pratiquement la même allure aux deux points.



**Figure I-31 :** Evolution de l'amplitude et de la position du pic du signal Barkhausen lors des décharges en revenant de la traction (point 1) d'après Thèse Sarete[15].

Les évolutions de l'amplitude et de la position du pic en fonction du nombre de cycles mettent en évidence 4 stades majeurs dans le déroulement de la vie du matériau.

Le **premier stade allant de 0 à 100 cycles** caractérise une plastification rapide de tous les grains entraînant d'importants et rapides changements microstructuraux. Ceci se manifeste d'abord par une augmentation de la densité des dislocations, ensuite par l'apparition d'une microstructure de murs et veines, puis de cellules de dislocations. L'augmentation de la position du pic reflète bien l'accroissement de la densité de défauts dans le matériau.

Le **deuxième stade allant de 100 cycles à 3500 cycles** correspond à une organisation de la microstructure, c'est une période de quasi-stabilité avec une accentuation des bandes de glissement observées à la surface. Les paramètres mécaniques et magnétiques évoluant lentement et d'une manière continue avec un durcissement progressif du matériau. Ce qui traduit également un durcissement magnétique. Les paramètres Barkhausen n'évoluent pas. Les obstacles freinent et retardent les mouvements des parois de Bloch.

Le **troisième stade de 3500 à 6200 cycles**, c'est une période de l'endommagement et microfissuration du matériau prenant naissance dans les bandes de glissement. Les paramètres Barkhausen montrent une nette inflexion vers 4000 cycles. Cette diminution correspond à une relaxation des contraintes internes due à l'apparition des microfissures.

Le **quatrième stade de 6500 cycles** à la rupture, c'est une phase très courte correspondant à la transition entre la microfissuration et l'apparition de la macrofissuration. Les paramètres Barkhausen difficiles à interpréter du fait de l'inhomogénéité du matériau. Le circuit magnétique constitué par l'éprouvette est alors profondément perturbé.

### 6.3 RESULTAT DU SUIVI EN FATIGUE PAR MESURE DU BRUIT MAGNETO-MECANIQUE

Il y a deux approches pour faire la caractérisation par bruit ferromagnétique :

La plupart des résultats que nous venons d'exposer correspondent au bruit ferromagnétique obtenu **par une excitation magnétique extérieure** (bruit BARKHAUSEN), sur un état chargé ou libre de contrainte. Mais il est également possible, avec un équipement très proche, de mesurer le **bruit ferromagnétique d'origine mécanique** (bruit magnétomécanique BMM) l'excitation est alors réalisée par les variations de contraintes appliquées (comme indiqué sur la figure I-28).

Très peu d'études ont été menées avec cette dernière approche.

J. SARETE a fait une tentative de caractérisation de l'endommagement en fatigue méthode BMM. Comme dans l'essai présenté ci-dessus il interrompait l'essai de fatigue à contrainte nulle puis en ce point appliquait une petite déformation « élastique » cyclique (de faible amplitude par rapport à celle de fatigue) afin de mettre en mouvement les parois de BLOCH et d'effectuer ainsi une caractérisation magnétomécanique (comme indiqué à la figure I-28 du paragraphe 5.2.2).

Les résultats obtenus étaient difficilement interprétables ; ils mettent néanmoins en évidence la faisabilité de la mesure et la sensibilité aux contraintes internes.

Une interprétation quantitative est difficile d'une part en raison de la dispersion des mesures liée probablement au fait que l'appareillage utilisé a été conçu pour la caractérisation classique du bruit Barkhausen. Un choix judicieux de capteur, de l'amplification et de la bande fréquentielle doit permettre d'améliorer ce point. D'autre part l'environnement et l'asservissement en contrainte de la machine introduisent un bruit de fond important.

## 7 CONCLUSION

Après une description des phénomènes intervenant dans le ferromagnétisme, nous avons défini le principe de la mesure des bruits Barkhausen et magnétomécanique : placer le matériau dans un champ magnétique variable ou le soumettre à une déformation variable afin de provoquer la réorganisation de la microstructure magnétique et mesurer les variations locales de flux hautes fréquences induites par les discontinuités du processus d'aimantation (mouvements des parois de BLOCH).

Ensuite nous avons décrit la double sensibilité du bruit ferromagnétique, d'une part à la structure du matériau, due à l'interaction microstructure cristalline microstructure magnétique ; d'autre part aux contraintes et déformations, liée au phénomène de magnétostriction. La technique dite du bruit Barkhausen, c'est-à-dire sous excitation magnétique, a donné lieu à un très grand nombre d'applications dans le cadre en particulier de contrôles non destructifs.

En ce qui concerne les mesures par bruit magnétomécanique, c'est-à-dire sous excitation mécanique, l'étude bibliographique est peu riche. Elle nous a permis de montrer que cette mesure était possible, qu'elle était également sensible à la microstructure cristalline et aux contraintes. Concernant la caractérisation de la fatigue par cette technique nous n'avons relevé que les travaux de J. SARETE effectués dans le laboratoire GEMPPM, les résultats obtenus sont difficilement exploitables du fait des appareillages ne permettant pas de se placer dans des conditions expérimentales favorables.

Notre étude s'insère dans une suite de ce travail et constitue essentiellement une phase exploratoire des applications des mesures du bruit magnétomécanique.

- Nous allons dans un premier temps, compléter nos connaissances et réflexions sur le Bruit magnétomécanique et les évolutions de la microstructure magnétique sous l'effet de contraintes et déformations, de manière à interpréter la sensibilité des mesures.

- **Le capteur, la chaîne de mesure, la bande de fréquence** font l'objet d'une partie importante de notre travail dans le cadre de la mise au point et de la caractérisation du dispositif expérimental afin d'optimiser le rapport signal sur bruit.

- Nous allons appliquer la technique à la caractérisation in situ de la fatigue de matériaux ferreux, dans le domaine des grands nombres de cycles (fatigue endurance) donc sous sollicitation rapide, les machines hydrauliques ne conviennent plus nous avons donc choisi d'utiliser le moyen classique pour ce type d'essai : **la flexion rotative**.

- Afin de faciliter les interprétations, nous allons utiliser des matériaux simples monophasés: **le fer pur** (100% ferritique) nous avons retenu le fer ARMCO et **la perlite pure** acier à 0,8% de carbone faute de trouver un tel acier dans le commerce, nous avons retenu un XC55 qui présente 70% de perlite.

# **Chapitre II**

## **Approches générales sur le Bruit magnétomécanique**



# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>67</b>
<b>2</b>	<b>ESSAIS SUR MACHINE DE FATIGUE EN UTILISANT LA CHAÎNE DE MESURE BARKHAUSEN.....</b>	<b>67</b>
2.1	CONDITIONS EXPERIMENTALES COMMUNES .....	67
2.2	FAISABILITE ET REPRODUCTIBILITE DE L'ESSAI.....	68
2.3	INFLUENCE DE LA VITESSE DE SOLLICITATION.....	71
2.4	INFLUENCE DE L'ETAT METALLURGIQUE SUR LE BMM.....	73
2.4.1	<i>Echantillons et microstructures .....</i>	<i>73</i>
2.4.2	<i>Mesures magnétomécaniques.....</i>	<i>74</i>
2.4.3	<i>Mesures Barkhausen :.....</i>	<i>75</i>
2.4.4	<i>Mesures de pouvoir thermo-électrique (PTE).....</i>	<i>78</i>
2.4.5	<i>Récapitulatif et Interprétations .....</i>	<i>79</i>
2.4.6	<i>Remarques et interprétations .....</i>	<i>79</i>
2.4.7	<i>Conclusion.....</i>	<i>81</i>
<b>3</b>	<b>OBSERVATION DES DOMAINES : EFFET DES CONTRAINTES.....</b>	<b>82</b>
3.1	RAPPEL SUR L'INTERPRETATION DES IMAGES OBTENUES AU MOYEN DU MICROSCOPE A EFFET KERR.....	82
3.2	EFFET DE L'APPLICATION D'UNE CONTRAINTE DE TRACTION ET DE COMPRESSION IN SITU SOUS LE MICROSCOPE A EFFET KERR.....	83
3.3	EFFET D'UNE DEFORMATION PLASTIQUE SUR LA STRUCTURE MICROMAGNETIQUE ET OBSERVATION AU MICROSCOPE A EFFET KERR APRES DECHARGEMENT.....	86
3.3.1	<i>Caractérisation de l'état initial : .....</i>	<i>86</i>
3.3.2	<i>Etat déformé plastiquement à 0,38% caractérisation immédiatement après déchargement plan d'incidence parallèle à l'axe de l'éprouvette.....</i>	<i>86</i>
3.3.3	<i>Etat déformé plastiquement à 0,38%, plan d'incidence perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.....</i>	<i>87</i>
3.3.4	<i>Conclusion.....</i>	<i>88</i>
<b>4</b>	<b>INTERPRETATION ET MODELISATION QUALITATIVE.....</b>	<b>89</b>
4.1	INTRODUCTION.....	89
4.2	UTILISATION D'UN MODELE A TROIS DIMENSIONS.....	89
4.3	INTERPRETATION QUALITATIVE DES OBSERVATIONS.....	91
4.3.1	<i>Essai sous contrainte de traction ).....</i>	<i>91</i>
4.3.2	<i>Essai sous contrainte de compression.....</i>	<i>92</i>
4.3.3	<i>Essai après déformation plastique .....</i>	<i>93</i>
4.3.4	<i>Autre exemple.....</i>	<i>94</i>
4.4	EXEMPLE DE MODELISATION PERMETTANT D'ILLUSTER LA MODIFICATION DE L'ORIENTATION DE DOMAINES PRINCIPAUX PAR CREATION ET MOUVEMENTS DES PAROIS DE BLOCH A 90°.....	95
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>97</b>



## 1 INTRODUCTION

L'étude bibliographique a montré que très peu de travaux ont été menés sur le bruit magnétomécanique utilisé comme moyen de caractérisation microstructurale. Avant de commencer l'étude de la caractérisation de l'évolution microstructurale en fatigue endurance par mesure en continu du bruit magnétomécanique, nous avons cherché à nous approprier cette technique en reprenant et complétant les essais réalisés dans le laboratoire et en approfondissant la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu. Ce chapitre vise à répondre à un certain nombre de questions :

- Le BMM existe, il est mesurable, mais plus faible que le bruit Barkhausen magnétique. L'appareillage type Barkhausen n'est pas bien adapté. Comment améliorer les conditions de mesure ?
- Il se produit pour des contraintes faibles, quelques MPa, il est très sensible aux contraintes internes de deuxième ordre et il a toujours été mesuré pour des fréquences de sollicitation faibles. Peut-on envisager de le mesurer en fatigue endurance (flexion rotative)?
- Les résultats bibliographiques s'accordent sur le fait qu'il est principalement dû à des mouvements de parois à 90°. Comment se produisent-ils ? Sont-ils suffisants pour rendre compte du signal observé ? N'y a-t-il pas d'autres mécanismes ? Comment s'opère la nucléation de nouveaux domaines ?
- Le laboratoire GEMPPM dispose d'un microscope à effet Kerr. Plusieurs études ont été réalisées dans le cadre de projets de fin d'études d'étudiants de l'INSA. Certains résultats nous semblent intéressants pour étayer notre compréhension.
- Le modèle « carré » à 4 domaines Figure I-8 explique bien la forme en papillon des signaux, mais il semble trop simpliste et trop loin de la structure réelle. Partant du modèle en trois dimensions, nous envisageons une modélisation graphique, plus proche de la réalité, pour expliquer les mouvements des parois de Bloch et la nucléation de nouveaux domaines.

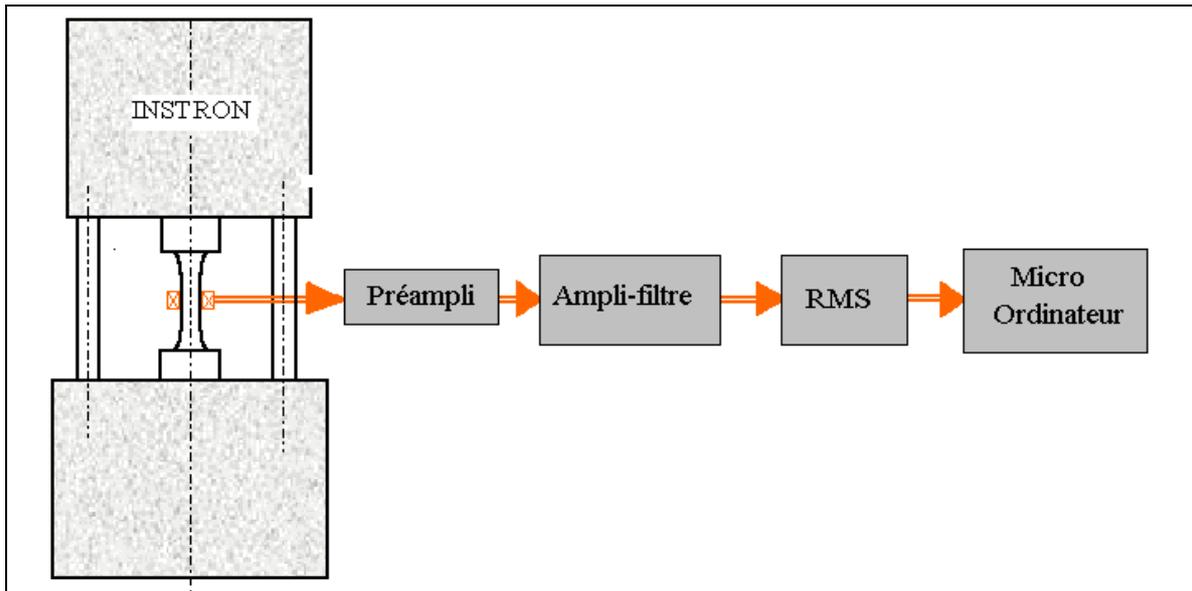
## 2 ESSAIS SUR MACHINE DE FATIGUE EN UTILISANT LA CHAÎNE DE MESURE BARKHAUSEN

Nous avons cherché dans un premier temps à reproduire les essais réalisés au laboratoire par SARETE [15] et CHIMIELEWSKI [37], afin d'appréhender le dispositif expérimental, les ordres de grandeurs et la reproductibilité. Puis nous avons cherché à reproduire des conditions proches de la fatigue endurance, en particulier la vitesse de sollicitation. Enfin nous présentons une étude comparative, par trois méthodes (BMM, Bruit Barkhausen et Pouvoir Thermo Electrique) appliquées à différents états métallurgiques du même acier dont certains sont sensés introduire différents types d'obstacles (ancrage ou freinage) aux déplacements des parois de Bloch.

### 2.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES COMMUNES

- Matériau : acier XC10 recuit.
- Eprouvettes : cylindrique pleine de forme haltère (Figure II-1), diamètre 10 mm, longueur 30 mm.
- Machine d'essai de fatigue : hydraulique INSTRON capacité 10t pilotée en contrainte. Possibilité de cyclage triangulaire ou sinusoïdal.

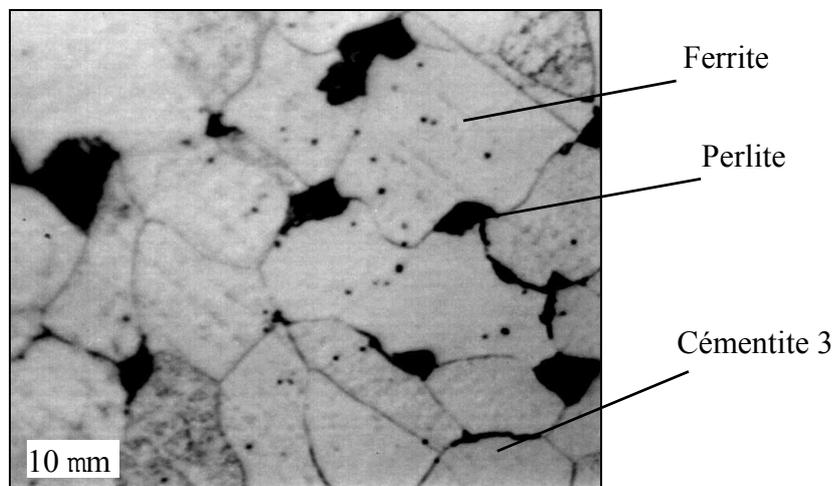
- Capteur : bobine encerclante de 300 spires (deux fois plus que pour les expériences Barkhausen).
- Chaîne de mesure : directement issue des mesures Barkhausen : préampli à un seul étage, le gain a été porté à 100 au lieu de 25 pour les mesures Barkhausen, filtre passe bande 1 KHz à 100 KHz, amplification finale de gain 100 et mesure de valeur efficace avec une constante de temps de 25 ms. La tension finale représente 10 000 fois la valeur efficace du signal mesuré par la bobine capteur. Le gain est 8 fois supérieur à celui des mesures Barkhausen.
- Chaîne d'acquisition : ordinateur Pentium avec un logiciel Labview.



**Figure II-1** : Schéma du dispositif expérimental

## 2.2 FAISABILITE ET REPRODUCTIBILITE DE L'ESSAI

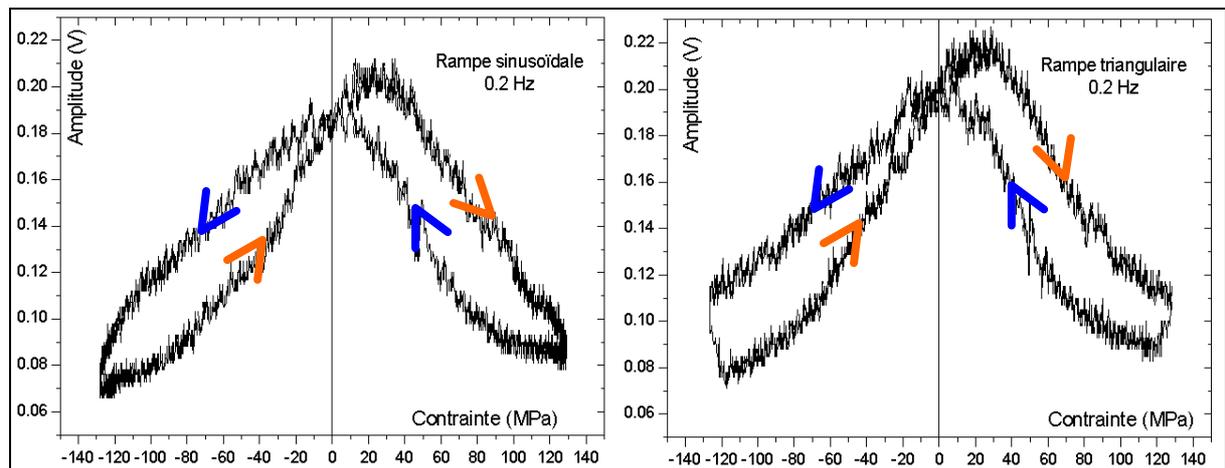
Les premiers essais et la vérification de la reproductibilité ont été réalisés sur quatre éprouvettes en XC10, recuites sous vide à 950° pendant 1h ; refroidissement lent au four. La structure est essentiellement ferritique avec de l'ordre de 5% de perlite et des traces de cémentite tertiaire aux joints de grains. Photo II-1.



**Photo II-1** : Structure de notre XC10 recuit

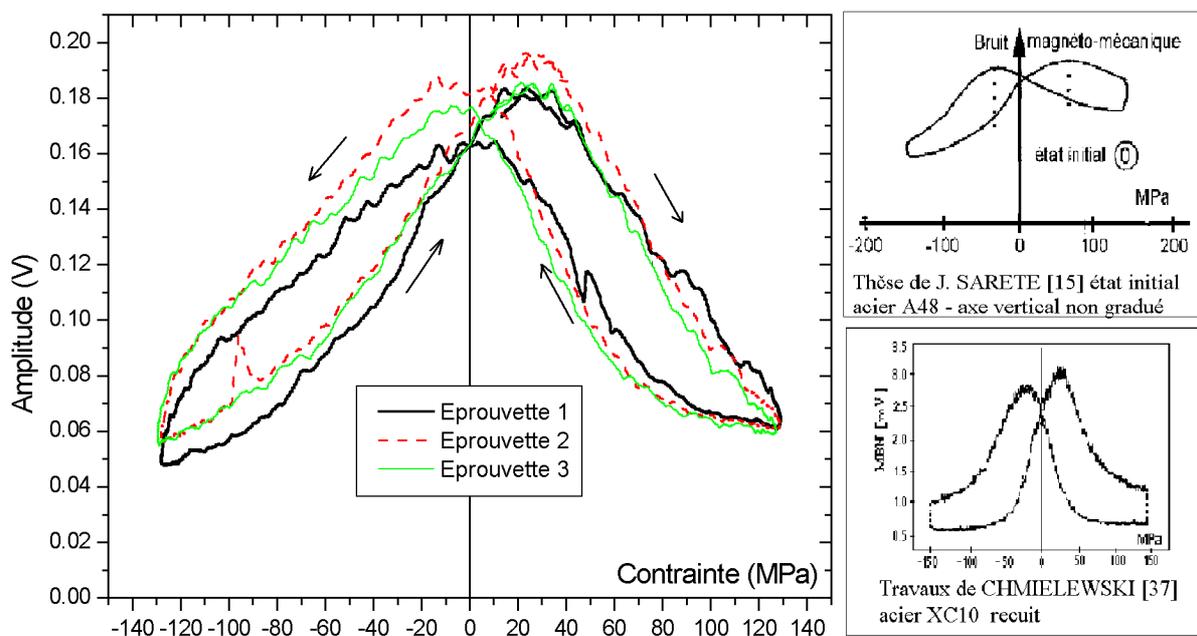
L'éprouvette est sollicitée en contrainte imposée. Les résultats présentés sur les figures II-2 et II-3 correspondent à une contrainte variant de  $-130$  MPa à  $130$  MPa à une fréquence de  $0,2$  Hz.

Nous avons dans un premier temps cherché à caractériser le mode de pilotage. La figure II-2 représente pour la même éprouvette et pour la même gamme de contrainte les deux modes de pilotage à savoir sinusoïdal et triangulaire. On observe une grande similitude entre les deux signaux tant en amplitude qu'en forme.



**Figure II-2 :** Bruits magnétomécaniques obtenus avec deux rampes différentes (sinusoïdale et triangulaire)(matériau XC10 recuit).

Nous avons ensuite cherché à caractériser la reproductibilité et à comparer la forme du signal à ceux obtenus par d'autres auteurs. Nous avons porté sur la figure II-3 ; les courbes correspondant à trois éprouvettes différentes mais du même acier et en plus petit nous rappelons les résultats de J. SARETE [15] et de CHMIELEWSKI [37].

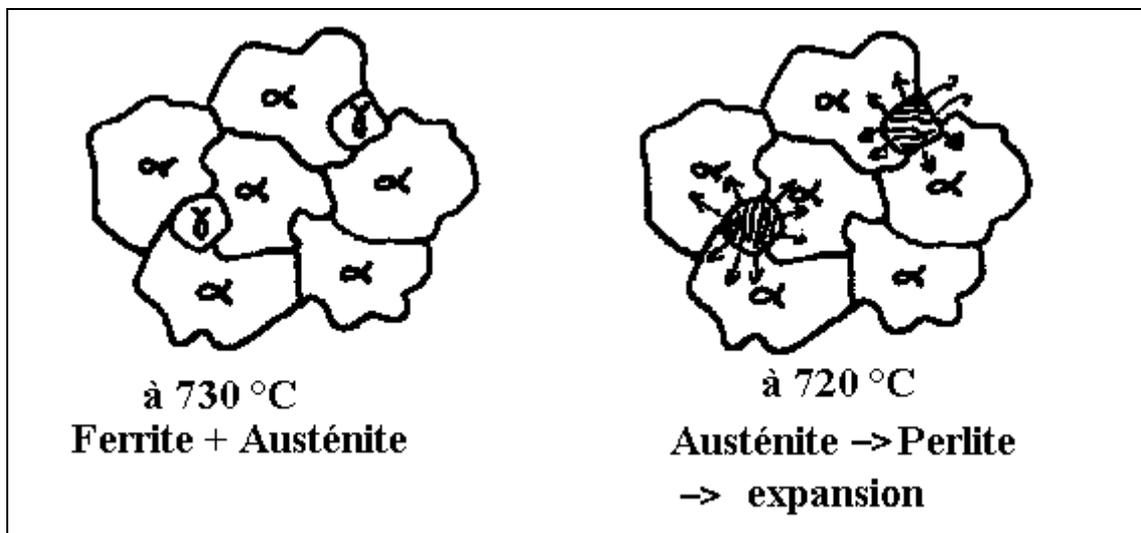


**Figure II-3 :** Bruits magnétomécaniques obtenus sur trois éprouvettes dans les mêmes conditions et, en plus petit, résultats de J. SARETE [15] et de CHMIELEWSKI [37].

On remarque :

- Les courbes ont bien une forme de « papillon » (deux pics) mais légèrement dissymétriques et décalées vers la droite. Le sens de parcours est important pour suivre le phénomène.
- Une reproductibilité relativement bonne entre les trois essais tant pour l'amplitude que pour la position des pics par rapport au passage à zéro de la contrainte appliquée.
- Un bruit de fond relativement important par rapport au signal. Il faut remarquer qu'une partie de ce bruit de fond provient du pilotage de la machine. En effet, CHMIELEWSKI qui a réalisé des essais comparables mais sur une micromachine moins bruitée a obtenu un rapport signal sur bruit plus satisfaisant.
- On remarque que, aussi bien CHMIELEWSKI que J. SARETE, ont également observé une dissymétrie des pics et un décalage vers la droite. Ces résultats étant obtenus par trois opérateurs différents sur des machines différentes et des matériaux également différents, il est raisonnable de penser que ces observations ont une raison physique. J. SARETE n'explique pas la différence d'amplitude des pics, mais il attribue le décalage à la contrainte interne probablement d'ordre 2. Comme nous l'avons rappelé dans le chapitre I, il postule qu'en l'absence de contrainte il n'y a aucune raison pour que les événements se produisent préférentiellement en traction plutôt qu'en compression et donc que les pics devraient être symétriques. L'axe de symétrie représente donc l'endroit où les parois de Bloch voient une contrainte nulle. Dans notre cas, ce point se situe en traction aux environs de 10 MPa ; ce qui revient à dire que pour annuler la contrainte interne vue par les parois de Bloch, il faut appliquer une contrainte de +10 MPa. La contrainte interne serait donc de compression et en moyenne de -10 MPa.

D'où peut provenir cette contrainte interne ?



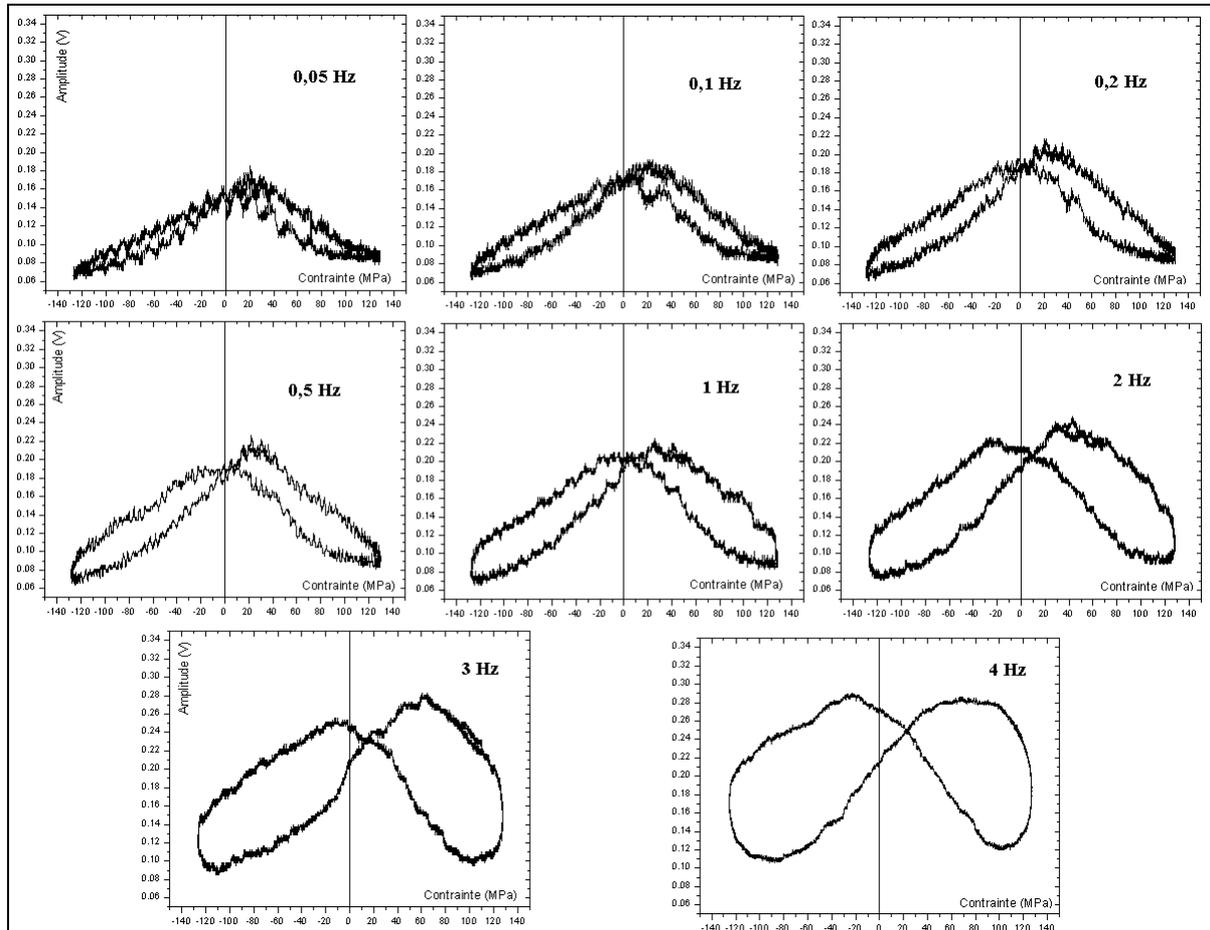
**Figure II-4 :** Mise sous contrainte de la microstructure cristalline par le passage austénite perlite, par augmentation du volume

La microstructure magnétique se situe à une échelle légèrement inférieure à l'échelle cristalline. Les mouvements des parois seront donc sensibles à des contraintes à l'échelle du grain. La structure étant principalement ferritique, ceci revient à dire que les grains de ferrite sont globalement soumis à des contraintes de compression qui sont induites par le reste de la microstructure, principalement la perlite.

Lors du recuit, le passage austénite perlite vers 720°C se produit avec une augmentation de volume cf. figure II-4 qui peut être suffisant pour expliquer le phénomène.

### 2.3 INFLUENCE DE LA VITESSE DE SOLLICITATION

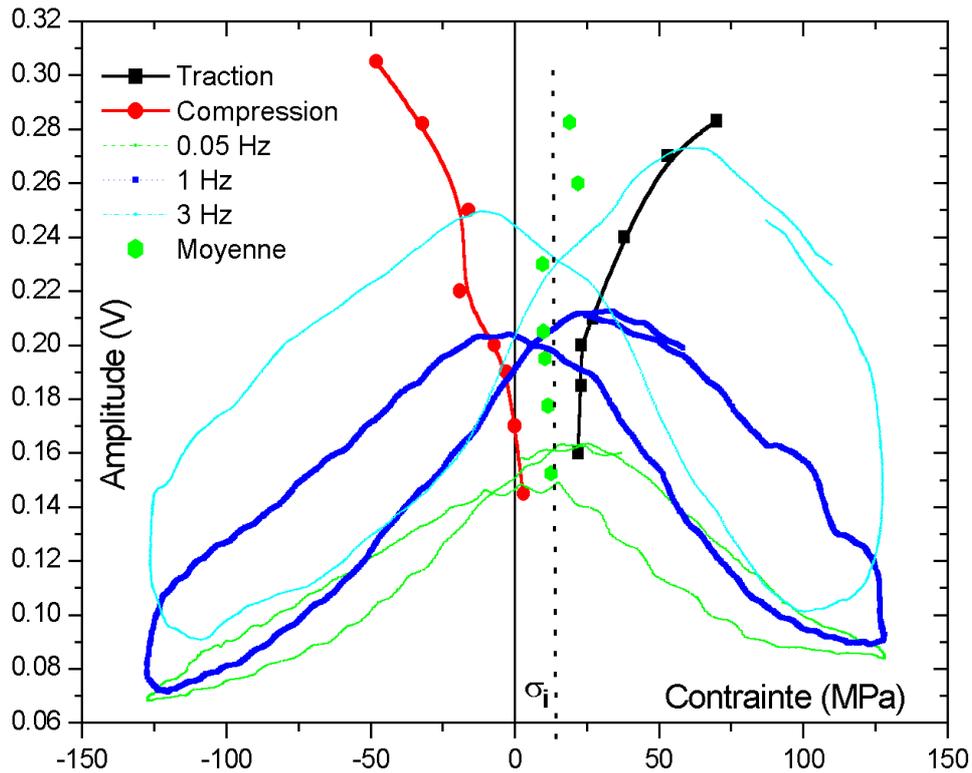
Les essais envisagés en fatigue-endurance en flexion rotative vont nous entraîner à des fréquences de sollicitation beaucoup plus élevées que celles présentées dans le paragraphe II-2. Nous avons cherché avec la machine hydraulique en traction compression à nous approcher de ces conditions. Les conditions expérimentales sont les mêmes que celles du paragraphe précédent : le pilotage est sinusoïdal en contrainte imposée entre +/- 130 MPa, la fréquence varie de 0.05 Hz à 4 Hz.



**Figure II-5 :** Les bruits magnétomécaniques obtenus pour 8 fréquences de sollicitation en contrainte imposée (matériau XC10 recuit).

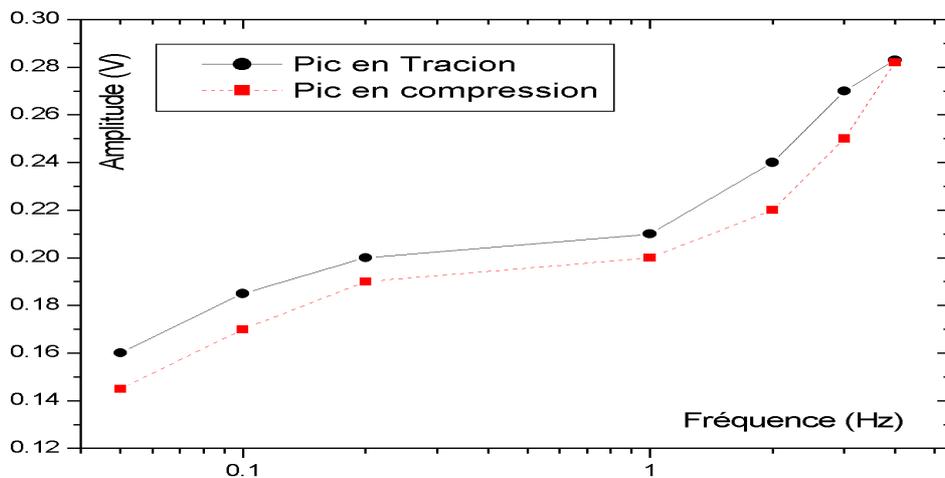
La figure II-5 représente les "papillons" pour 8 fréquences de sollicitation. On observe globalement une augmentation de l'amplitude des maximums et une séparation des deux pics. Les résultats pour les vitesses les plus élevées doivent être pris avec circonspection.

Nous avons reporté sur la figure II-6 trois courbes caractéristiques pour des fréquences assez différentes : On observe bien l'augmentation de l'amplitude des pics avec la fréquence de sollicitation (voir figure II-7).



**Figure II-6 :** BMM pour trois fréquences et évolution de leurs pics

Comme dans le cas des mesures Barkhausen, cette augmentation peut s'expliquer : en faisant l'hypothèse que le nombre d'événements élémentaires correspondant à la modification de la structure magnétique (sauts des parois de Bloch) reste le même quelle que soit la fréquence. Ce même nombre d'événements va se produire pour des temps de plus en plus courts au fur et à mesure que la fréquence augmente, d'où des variations de flux de plus en plus importantes. Dans l'étude bibliographique nous avons noté que les mouvements des parois, sous l'effet des contraintes, se produisaient pour des contraintes faibles. Nous avons porté sur la figure II-6 la position des maxima des différentes courbes.



**Figure II-7 :** Evolution l'amplitude maximum du pic en fonction de la fréquence de sollicitation.

Pour les vitesses faibles les pics sont séparés de 25 MPa soit une contrainte de  $\pm 12$  MPa. CHIMIELEWSKI [57] dans des conditions voisines mais avec un acier moins bien recuit obtient  $\pm 20$  MPa et J. SARETE [15] pour un A48 obtient  $\pm 50$  MPa. (cf. figure II-3). Ce qui est effectivement très faible et montre que, en particulier dans le cas d'une ferrite recuite, les parois de Bloch sont très mobiles sous l'action d'une contrainte.

Nous observons un étalement des pics et un début de phénomène précoce dès le début de l'inversion des variations de contraintes. Ce phénomène peut s'expliquer par les contraintes internes. En fait les parois de Bloch "voient" une composition de la contrainte interne locale et de la contrainte macroscopique appliquée ; d'où probablement une large distribution, ce qui peut expliquer les mouvements précoces ou tardifs.

## 2.4 INFLUENCE DE L'ETAT METALLURGIQUE SUR LE BMM

Nous avons étudié quatre états métallurgiques dans le but de voir la sensibilité du bruit magnétomécanique et comparer les résultats obtenus avec d'autres techniques. L'interprétation sera menée en termes d'interaction microstructure magnétique / microstructure cristalline. Avec le même acier que celui utilisé dans le chapitre précédent (XC10), nous avons effectué des traitements thermiques pour obtenir quatre états différents:

- Etat recuit : ferrite ;
- Etat trempé : ferrite sursaturée en carbone avec des contraintes internes ;
- Etat trempé et revenu court : précipitation intragranulaire de petite taille ;
- Etat trempé et revenu long : précipitation intragranulaire de grosse taille.

Après avoir présenté les traitements thermiques et les microstructures correspondantes, nous exposerons les résultats de trois méthodes de caractérisation : méthode magnétomécanique dans les mêmes conditions expérimentales que celles du chapitre précédent, méthode BARKHAUSEN conventionnelle et mesure du pouvoir thermoélectrique. Ce travail reprend en partie le travail de C. GATELIER [3] sur la précipitation de la cémentite et le complète par les mesures magnétomécaniques. Enfin, nous tentons d'interpréter les résultats en termes d'interactions parois - obstacles.

### 2.4.1 Echantillons et microstructures

Les quatre états métallurgiques étudiés sont obtenus à partir de XC10 (0.1%C) avec un traitement thermique approprié.

Etat recuit : l'acier a subi un traitement thermique de recuit à 950°C pendant 1 heure sous vide, suivi d'un refroidissement lent dans le four. La structure est présentée sur la photo II-1. La taille moyenne des grains est de 25  $\mu$ m. Nous remarquons la présence d'un peu de perlite et quelques traces de cémentite tertiaire aux joints de grains.

Etat trempé :

L'acier a subi d'abord un traitement de recuit dans les mêmes conditions que précédemment. Ensuite l'échantillon est porté à 700°C pendant 15 minutes dans un bain de sel, puis trempé à l'eau. La structure est composée de ferrite sursaturée en carbone et de perlite.

Etat trempé et revenu court

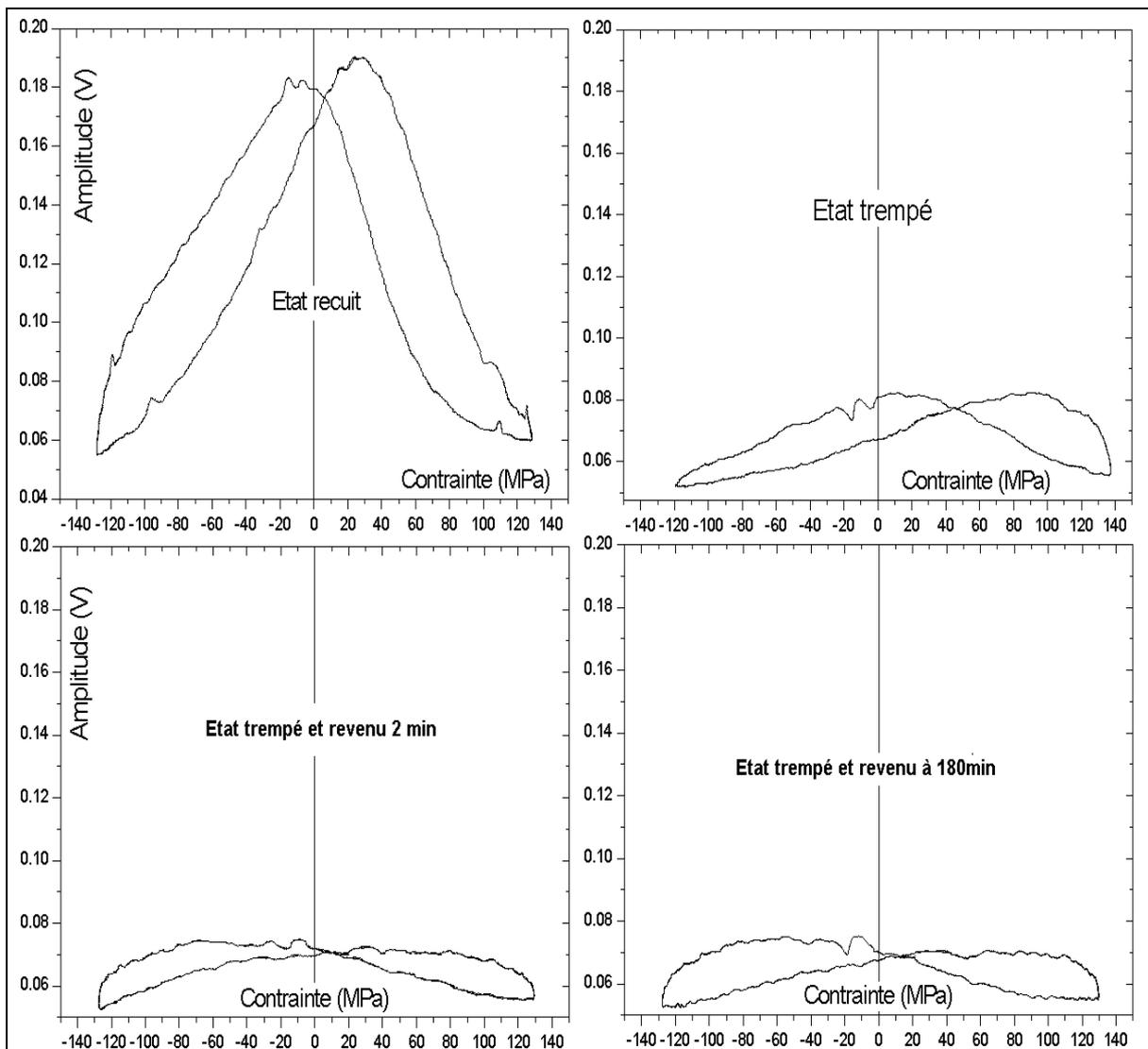
L'échantillon est d'abord recuit, ensuite il est porté à 700°C pendant 15 minutes, puis trempé à l'eau. L'échantillon est ensuite chauffé à 240°C pendant 2 minutes dans un bain de sel. La structure ferrite perlite est inchangée mais le carbone en sursaturation se recombine au fer pour donner de très fins précipités de cémentite intragranulaires.

Etat trempé et revenu long

L'échantillon a subi les mêmes traitements que l'échantillon précédent sauf que le temps de revenu est beaucoup plus long (180 minutes). La structure est identique à la précédente mais, les précipités de cémentite sont plus gros et moins nombreux (coalescence).

**2.4.2 Mesures magnétomécaniques**

La figure II-8 représente les signaux magnétomécaniques des quatre échantillons. Les conditions expérimentales sont les mêmes que celles du chapitre précédent. Ces signaux sont très différents. Nous allons les décrire en termes d'amplitude et position des pics en fonction de la contrainte. La morphologie des pics est analysée en prenant en compte l'interaction des parois de BLOCH avec la microstructure également avec les contraintes internes. L'interprétation finale est effectuée en comparant ces résultats avec ceux obtenus par méthode Barkhausen et le pouvoir thermoélectrique.



**Figure II-8 :** Bruits magnétomécaniques pour différents états métallurgiques (matériau XC 10).

Le signal de **l'état recuit** est d'amplitude très importante ( par rapport aux autres signaux) et les deux pics sont très proches l'un de l'autre et la distance entre les deux est de l'ordre de 36 MPa. Le pic coté traction est légèrement plus haut. Nous remarquons également un léger décalage vers les contraintes de traction. Ce bruit magnétomécanique est comparable à ceux présentés dans les paragraphes précédents.

Le signal de **l'état trempé** est beaucoup plus faible et étalé. L'écart entre les pics augmente, il est de l'ordre de 70 MPa. Les deux pics ont pratiquement la même amplitude. Nous constatons un net décalage vers les contraintes positives.

Les signaux **de deux états trempé-revenu 2 min et 180 min** présentent la même allure, amplitude très faible et pics très étalés. L'écart entre les pics, dans les deux cas est de l'ordre de 160 MPa. Remarquons surtout une séparation très nette des pics. Le décalage en contrainte est très faible.

L'ensemble des résultats est regroupé dans le tableau II-1.

**Tableau II-1 :** récapitulatif des résultats magnétomécaniques pour quatre traitements thermiques différents

N°	Traitements :	Structure escomptée	Amplitude des pics	Distances entre les pics	Position moyen. des pics	Remarques
1) recuit	Recuit sous vide : Austénitisé 950° 1h - Refroidissement lent au four	Ferrite : 90 % Perlite : 10 % Fe <sub>3</sub> C tertiaire : traces	Gauche : 0,18V Droit : 0,19	36 MPa soit ± 18 MPa	+ 10 MPa	Signal identique à ceux du chapitre précédent.
2) trempé	Recuit identique à 1) puis 700°C 15 mn - trempé à l'eau	Ferrite sursaturée en carbone, perlite	Gauche : 0,08 Droit : 0,08	70 MPa soit ± 35 MPa	+ 55 MPa	Signal faible très décalé vers les contraintes positives
3) revenu court	Départ identique à 2) puis 240°C - 2 mn	Ferrite + petits précipités intragranulaires de Fe <sub>3</sub> C, perlite	Gauche : 0,075 Droit : 0,070	160 MPa soit ± 80 MPa	+ 10 MPa	Séparation très nette des pics, signal faible et étalé, peu décalé en contrainte.
4) revenu long	Départ identique à 2) puis 240°C - 180 mn	Idem 3) plus gros précipités de Fe <sub>3</sub> C	Gauche : 0,075 Droit : 0,070	160 MPa soit ± 80 MPa	+ 10 MPa	Très proche du traitement 3), Départ plus tardif

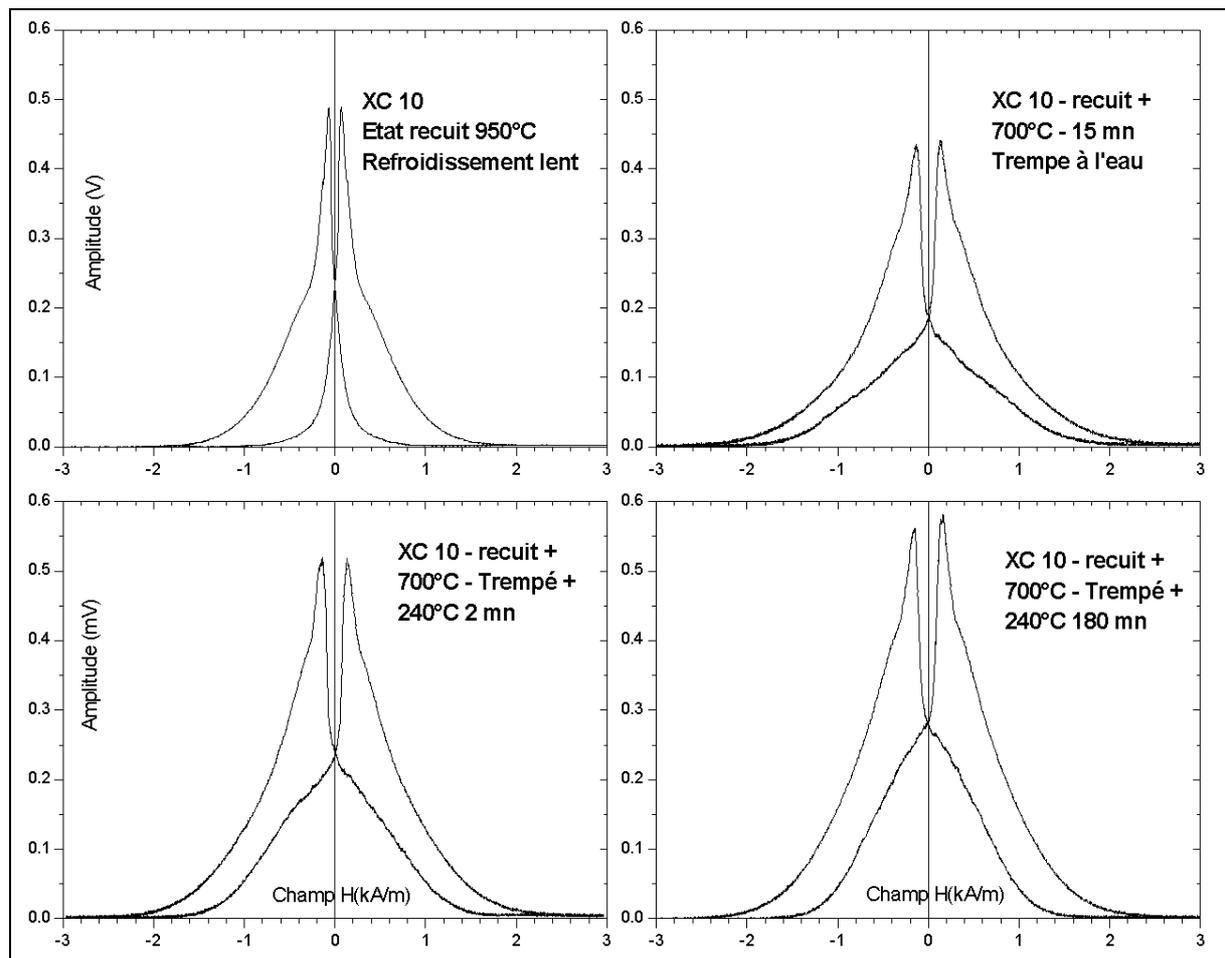
### 2.4.3 Mesures Barkhausen

Pour nous aider dans les interprétations, nous avons fait également des mesures par la méthode Barkhausen sur les mêmes éprouvettes. Les paramètres utilisés pour les mesures sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II-2** : conditions expérimentales pour la mesure Barkhausen

Excitation magnétique	
Consigne	Forme : triangulaire Fréquence : 0,1Hz
Asservissement	en courant
Mesure	Champ magnétique dans la zone utile
Mesure du signal Barkhausen	
Capteur	Type : bobine encerclante Nombre de spires : 300 $\varnothing$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : 25
Filtre	Bande : 0,5 kHz - 500 kHz
Amplificateur large bande	Gain : 100 en 2 étages
Module RMS	Constante de temps : 25 ms

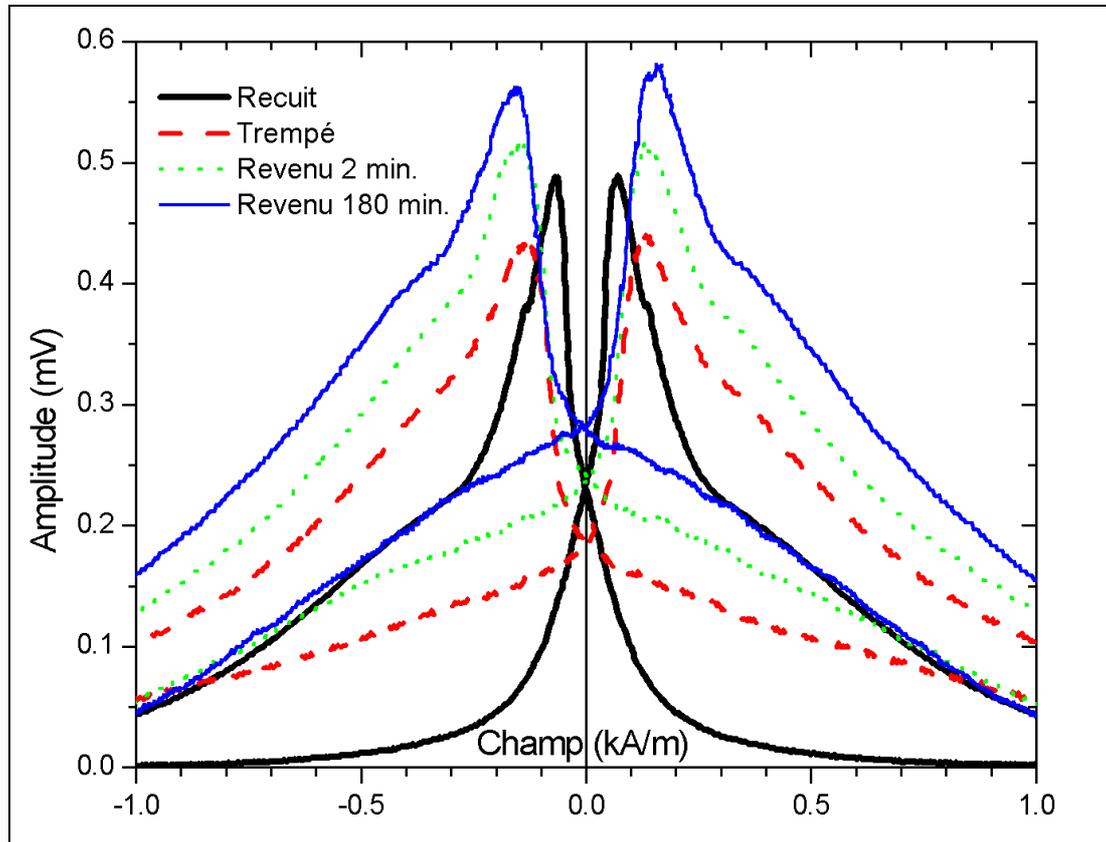
La figure II-9 représente les signatures BARKHAUSEN pour les quatre échantillons. On remarque une variation d'amplitude avec un maximum pour le dernier essai. L'écart entre les pics, qui est un paramètre très proche du champ coercitif, varie également. Les interprétations porteront sur les amplitudes maximum des pics et sur leurs positions en champ (distance entre pics). Nous avons reporté sur la figure II-10 les quatre signatures en dilatant l'échelle des champs.

**Figure II-9** : Signatures Barkhausen pour les quatre états

L'état recuit (courbe en noir) est caractéristique d'une ferrite recuite : pic très étroit et très proche du champ nul (matériau magnétiquement très doux) ; tous les événements se déroulent pour les champs faibles.

Etat trempé (courbe en rouge, tiret) : les pics sont plus petits, plus étalés.

Etats revenus (courbes en vert pointillé: 2 mn et bleu 180 mn) : Les pics sont plus importants en particulier pour 180 mn, ils sont également plus écartés c'est à dire que le matériaux est magnétiquement plus dur.



**Figure II-10 :** Signatures Barkhausen à la même échelle pour les quatre états

Le tableau ci-dessous reprend ces différents résultats quantifiés.

**Tableau II-2 :** Différents paramètres des signatures Barkhausen

N°	Traitements :	Structure escomptée	Hauteur des pics	Largeur des pics	Position	Surface des pics	Remarques
1)	Recuit sous vide 950° 1h -Refroid. lent au four	Ferrite : 90 % Perlite : 10 % Fe <sub>3</sub> C tertiaire	0,49 V	0,24 kA/m	0,065 kA/m	0,23 Unités	Pic étroit et pour un champ faible Matériaux doux
2)	Recuit puis 700°C 15 mn - trempé à l'eau	Ferrite sursaturée en carbone, perlite	0,44 V	0,51 kA/m	0,13 kA/m	0,42 Unités	Pic plus petit et plus large, décalé vers les champs forts
3)	Départ identique à 2) puis 240°C - 2 mn	petits précipités intragranulaires de Fe <sub>3</sub> C,	0,52 V	0,53 kA/m	0,135 kA/m	0,51 Unités	Pic plus haut, plus large Début précoce
4)	Départ identique à 2) puis 240°C - 180 mn	Idem 3) plus gros précipités de Fe <sub>3</sub> C	0,58 V	0,61 kA/m	0,15 kA/m	0,58 Unités	Pic très important décalé vers les champs fort et début très précoce

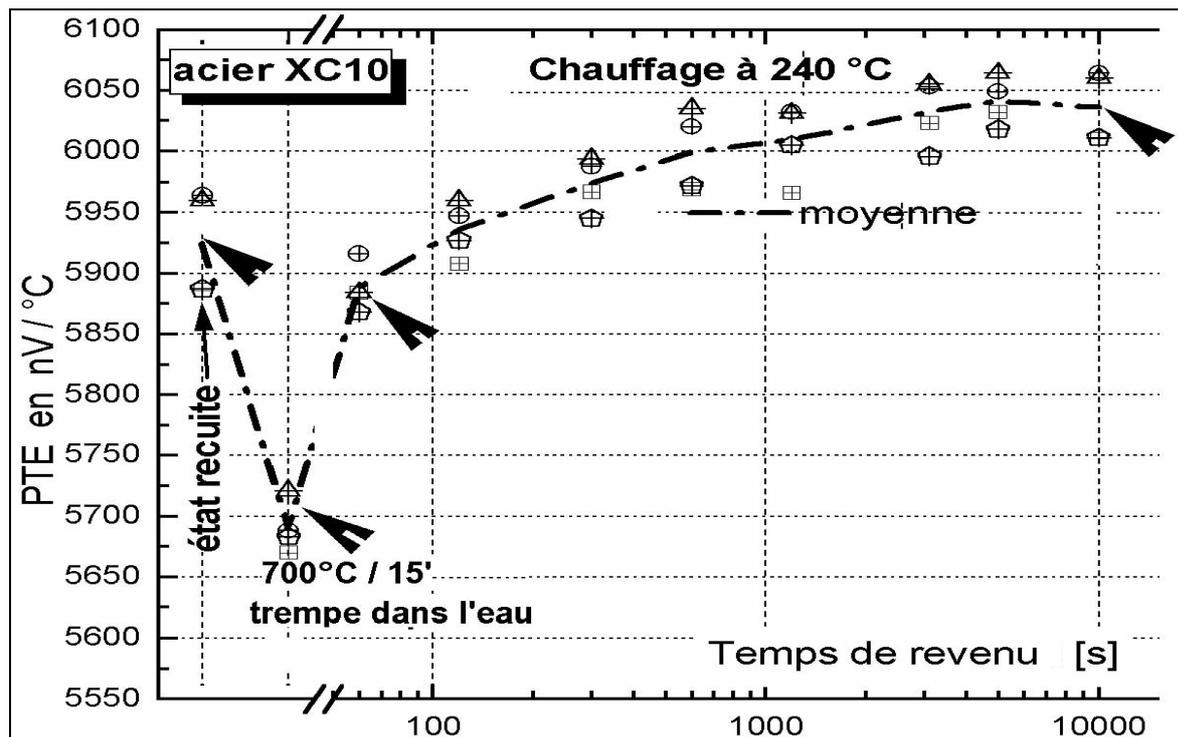
Nous avons comparé ces résultats avec ceux de C. GATELIER [3] et O. SAQUET [17].

En effet, notre essai est comparable à celui effectué par GATELIER [3] sur le fer pur additionné de 400 PMM de carbone ; si ce n'est que notre acier contient plus de carbone. Mais, il est probable que la remise en solution du carbone à 700°C soit du même ordre de grandeur. Dans notre cas, le supplément de carbone est sous forme de perlite et de cémentite intergranulaire.

Nous obtenons une évolution comparable (une augmentation) entre l'état trempé et le revenu court. Pour le revenu le plus long il est probable que nous serions au-delà du maximum obtenu par GATELIER (voir Chapitre I paragraphe 5.12 fig. I-21).

#### 2.4.4 Mesures de pouvoir thermo-électrique (PTE)

La précipitation de la cémentite ou plus exactement la diminution du nombre d'atomes de carbone en solution solide dans la ferrite est particulièrement facile à suivre par effet thermoélectrique. Nous avons donc fait toute une série de mesures par ce moyen. Des éprouvettes de forme prismatique ( $L=70\text{mm}$ ,  $l=5\text{mm}$ ,  $e=1\text{mm}$ ) ont été traitées en même temps que les éprouvettes de mesures magnétomécaniques. La manipulation étant plus simple, nous avons effectué un plus grand nombre de points intermédiaires. Les flèches noires indiquent les mesures communes aux trois techniques.



**Figure II-11** : Evolution du pouvoir thermoélectrique en fonction du temps de revenu

La Figure II-11 représente les mesures du pouvoir thermoélectrique en fonction du temps de maintien à 240°C après trempage à l'eau.

Partant de l'état recuit point le plus à gauche, la mise en solution du carbone à 700°C et son piégeage par trempage à l'eau introduit une nette diminution du PTE. La précipitation de la cémentite provoque la diminution de la quantité d'atomes de carbone en solution solide et une

remontée de la courbe. Quand tout le carbone est sous forme de cémentite, la courbe atteint un plateau. Les points fléchés correspondent à ceux pour lesquels nous avons fait des mesures Barkhausen et de bruit magnétomécanique.

Nous obtenons le même type de résultats que C. GATELIER (cf. courbe figure I-21 du chapitre I).

### 2.4.5 Récapitulatif et Interprétations

**Tableau II-3** : Récapitulatif et interprétations des résultats BMM, Barkhausen et PTE.

Traitement	Etat recuit 950° C Refroidissement lent	Etat trempé à l'eau après 700°C pendant 15 mn.	Chauffage 240°C 2 mn après trempe à l'eau	Chauffage 240°C 180 mn après trempe à l'eau
structure	Ferrite 90% Perlite 10% cémentite <sup>3</sup> : des traces	Ferrite 90% perlite 10% carbone en sursaturation dans la ferrite	Ferrite 90% Perlite 10% Très fins précipités de cémentite intragranulaire	Idem : Plus gros précipités de cémentite, plus de carbone en solution solide
Bruit BMM	Signal de forte amplitude Pic de traction un peu plus grand Pics proches l'un de l'autre (36 MPa) Faible Décalage vers les contraintes de traction (10 MPa)	Signal assez faible Pics de même amplitude Assez écartés (70 MPa) Très décalés vers les contraintes positives (55 MPa)	Signal très faible Pic de compression légèrement plus important. Très écartés l'un de l'autre (160 MPa) Peu décalés vers la traction (10 MPa)	Signal très semblable au précédent. A signaler un début de phénomène plus retardé.
Bruit BARKHAUSEN	Signal caractéristique d'un matériau doux : Pic étroit : assez élevé (0,49 V) (surface faible 0,23 U), , maximum pour des champs très faibles (0,065 kA/m)	Le plus petit des signaux (0,44 V), pic assez large surface (0,42 U) Un peu plus écartés (0,13 kA/m)	Signaux importants Hauteur : 0,52 V Pic très large : Surface 0,51 U Pas plus décalés que pour l'état trempé (0,135 kA/m)	Signaux comparables à l'état précédent mais encore plus important nous pensons avoir passé le maximum. Hauteur 0,58 V Surface 0,58 U Position 0,15 kA/m Départ très précoce du phénomène
PTE	Valeur importante Peu d'atomes de carbone en solution solide	Valeur faible qui correspond au maximum d'atomes de carbone en solution solide	La valeur augmente au fur et à mesure que le carbone en Sol-Sol se transforme en cémentite	Valeur asymptotique on peut penser que tout le carbone a précipité.

### 2.4.6 Remarques et interprétations

- Nous retrouvons, pour les mesures Barkhausen et celles du Pouvoir thermoélectrique, des résultats comparables à ceux obtenus par C. Gatelier dans son travail de thèse [3] bien que son travail ait porté sur un matériau légèrement différent de celui étudié. L'interprétation en

termes de blocages de parois à  $180^\circ$  par les précipités plus ou moins gros semble également tout à fait convaincante et confirmée par les mesures de Pouvoir Thermoélectrique.

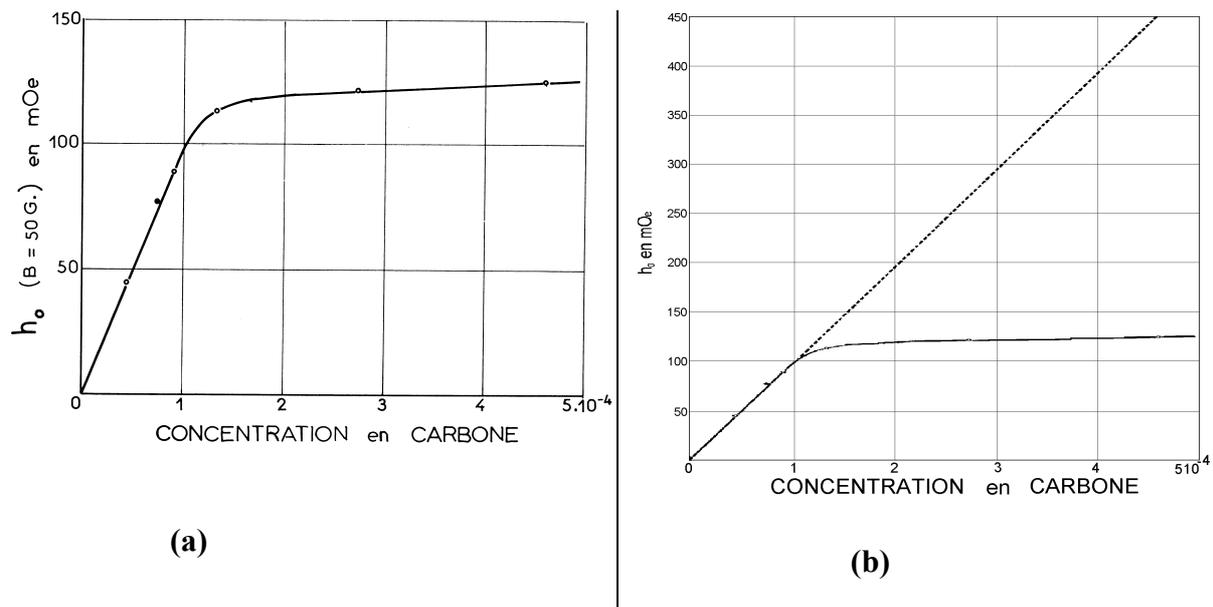
- En ce qui concerne les mesures magnétomécaniques, il faut rappeler que cette technique, contrairement aux mesures Barkhausen traditionnelles, ne prend en compte que les mouvements des parois à  $90^\circ$ .

- Le résultat le plus surprenant est la diminution très importante du signal magnétomécanique entre l'état recuit et l'état trempé qui sont métallurgiquement peu différents. Pour ces deux états, les proportions en volume de perlite et de cémentite tertiaire sont faibles et il semble raisonnable de considérer que les signaux Barkhausen et magnétomécaniques proviennent essentiellement de la ferrite. C'est donc elle qui nous intéresse.

- A l'état recuit ; la ferrite est saturée en carbone en solution solide d'insertion de l'ordre de 0,01%. Le reste du carbone se trouve sous forme de perlite ou de cémentite tertiaire.

- A l'état trempé ; il serait plus normal de parler d'hypertrempe ; à  $700^\circ\text{C}$  la ferrite peut dissoudre davantage de carbone, de l'ordre de 0,04 à 0,05% qui se trouve figé lors de la trempe, on crée ainsi, à température ambiante, une solution solide artificielle sursaturée.

- Le carbone en solution solide interagit avec la microstructure magnétique en stabilisant les directions de magnétisation des domaines. C'est l'effet de traînage magnétique décrit au chapitre I paragraphe 2.6. Cet effet est principalement sensible aux mouvements de parois à  $90^\circ$ . La courbe figure II-12, issue des travaux de L. NEEL [60] et P. BRISSONNEAU [61] représente le champ de traînage en fonction du pourcentage global de carbone pour un acier recuit.



**Figure I-12** : Variation du champ de traînage maximum en fonction de la concentration totale en carbone ; le champ de traînage est proportionnel à la quantité de carbone en solution.

(a) : La courbe obtenue par P. BRISSONNEAU [61], la limite est atteinte au voisinage de  $c = 100$  ppm de carbone.

(b) : La courbe en pointillés est une extrapolation que nous avons faite pour rendre compte du champ de traînage dans le cas de l'état trempé.

La partie linéaire croissante rend compte de l'augmentation du traînage pratiquement proportionnel à la quantité de carbone dissoute. Cette dissolution saturant vers 0,01%, comme

nous l'avons écrit précédemment, la courbe devient plate. L'état artificiellement créé par la trempe n'est pas représenté sur cette courbe. On pourrait avoir une idée de ce champ en extrapolant la partie croissante de la courbe (figure de droite). Comme la ferrite de l'état trempé présente un carbone en solution solide 4 à 5 fois supérieur à celui de l'état recuit, l'effet sur le traînage magnétique devrait être beaucoup plus important et probablement suffisant pour inhiber la majorité des mouvements de parois à 90°. Cette interprétation permet de rendre compte de la différence des signatures magnétomécaniques entre ces deux états.

- Que ce soit l'effet du traînage magnétique ou le blocage par des précipités, la chute importante de signal entre l'état recuit et les autres états laisse penser que la contrainte est un faible moteur pour le déplacement des parois.

- Par contre le signal relativement important de l'état recuit permet de supposer que si le phénomène magnétomécanique est activé, alors un volume important de matière est concerné par les mouvements des parois à 90° (pas seulement les domaines de fermeture).

Il est également intéressant de remarquer que pour l'état trempé, les pics magnétomécaniques sont les plus décalés vers les contraintes positives. Ce qui reviendrait à admettre que la ferrite est soumise à des contraintes internes de compression. Dans cet état, la vitesse de refroidissement très rapide a probablement créé des contraintes internes dues à des différences de dilatation. Pour les revenus à 240°, on ne retrouve pas ce décalage. Ce chauffage a probablement été suffisant pour relaxer ces contraintes.

#### **2.4.7 Conclusion**

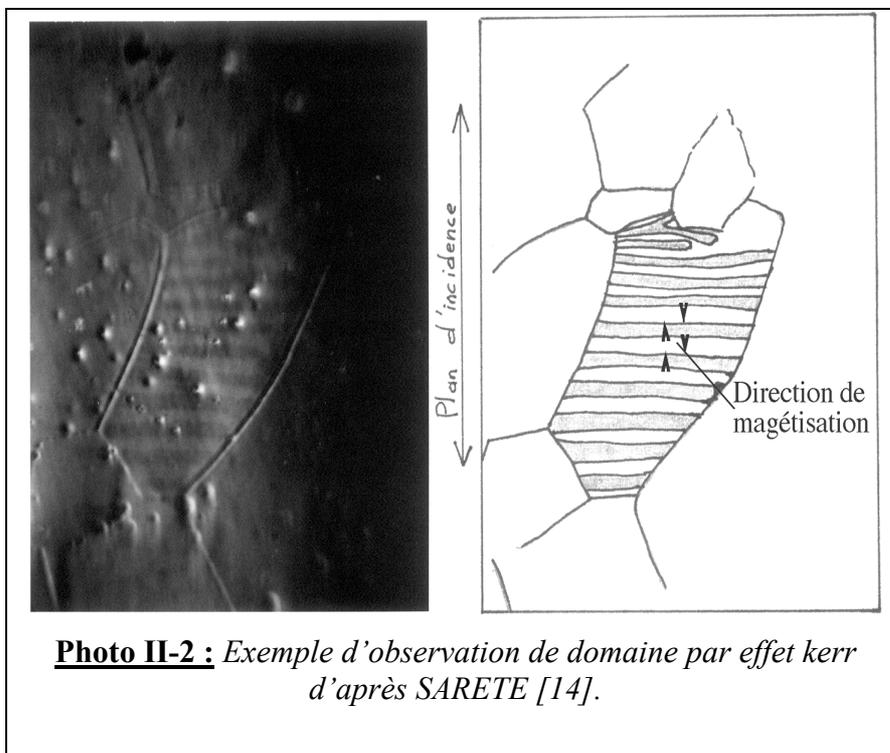
Pour l'état recuit dont la phase principale est assez pure (ferrite), le phénomène magnéto mécanique est important, c'est-à-dire que la microstructure magnétique va se réorganiser de manière profonde sous l'effet d'une contrainte. Par contre pour des états présentant des obstacles aux mouvements des parois, le "moteur" contrainte est insuffisant et ne provoquera qu'une faible réorganisation de la microstructure magnétique. L'amplitude du pic des états revenus est 6 fois plus petite que celle de l'état recuit. Si on admet en première approximation une proportionnalité entre l'amplitude et le nombre d'événements, la réorganisation sera donc de l'ordre de 6 fois plus faible. C'est-à-dire que la grande majorité des domaines ne seront pas modifiés par la contrainte. Il est donc très important pour notre étude de choisir un matériau présentant une microstructure magnétique "mobile" telle que celle du fer pur. Nous avons cherché à établir également une comparaison avec un autre matériau monophasé mais présentant une mobilité moindre des domaines (la perlite).

### 3 OBSERVATION DES DOMAINES : EFFET DES CONTRAINTES

Nous avons présenté dans le paragraphe 2.5.2 du chapitre I, le principe de la technique d'observation des domaines par l'effet magnéto-optique KERR. Ce thème a fait l'objet du DEA de J. SARETE [14] qui a construit le microscope et de plusieurs projets de fin d'études d'Etudiants de l'INSA (cf. rapports internes de V. RENAUD [52], C. PELCAT et P. CARRIER [53], GOLETTO ET MAGNET [54]). Un travail intéressant dans ce domaine a également été conduit dans le laboratoire GEMPPM avec cet équipement par D. TAPULEASA (professeur Roumain) [55] dans sa Thèse de Doctorat. Dans la perspective de mieux comprendre l'effet d'une contrainte sur la microstructure magnétique, nous avons repris, analysé et tenté d'interpréter certaines observations réalisées dans le laboratoire GEMPPM en relation avec le phénomène magnétomécanique.

#### 3.1 RAPPEL SUR L'INTERPRETATION DES IMAGES OBTENUES AU MOYEN DU MICROSCOPE A EFFET KERR

- Il existe trois effets KERR : L'effet *KERR polaire* ; il n'est pratiquement pas observé pour des échantillons massifs, l'effet *KERR transversal* ne provoque pas de rotation de la polarisation de la lumière. Le principal effet est donc l'effet *KERR longitudinal*. Pour cet effet, ne seront donc principalement contrastés que les grains dont la direction de magnétisation est parallèle au plan d'incidence, ce qui permet de déterminer la direction de magnétisation, mais en extrême surface.
- Ne seront contrastés que les grains qui présentent une direction cristallographique de type (100) dans le plan de la surface et de direction parallèle au plan d'incidence de la lumière polarisée.



L'image est très peu contrastée bien qu'elle ait subi un traitement informatique. Les domaines reproduits sur le dessin ci-contre sont probablement les domaines de fermeture de domaines principaux sous-jacents dont la direction de magnétisation serait perpendiculaire à la surface



**Photo II-3** : Exemple d'observation au microscope à effet kerr d'une surface couverte de diélectrique d'après TAPULEASA [55]

- Dans sa Thèse D. TAPULEASA [57] utilise un dépôt diélectrique à la surface de l'échantillon. L'effet mis en jeu dans ce cas est principalement l'effet FARADAY lors de la propagation de la lumière dans l'épaisseur du diélectrique. Cet effet provoquant une rotation plus importante de la direction de polarisation, beaucoup de cristaux même moins bien orientés seront contrastés. L'image montrera davantage de domaines, mais il ne sera plus possible d'interpréter la direction d'aimantation des domaines.

Partant de ces principes, trois types d'expériences ont été conduits dans le laboratoire :

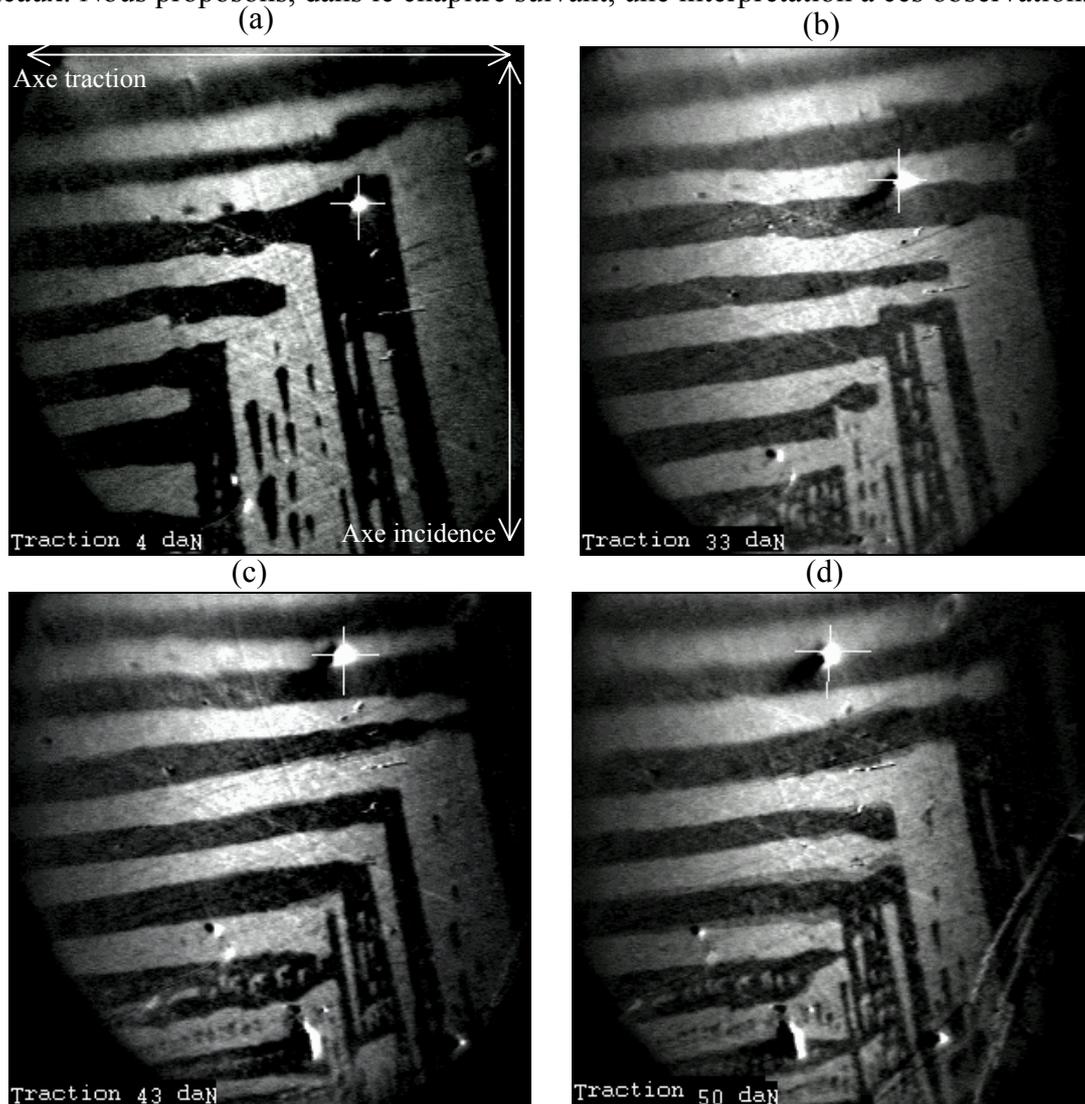
- Illustration du cycle d'hystérésis magnétique avec visualisation des différentes étapes conduisant à la saturation (travaux de J. SARETE et D. TAPULEASA). Nous ne présenterons pas ces résultats qui ne correspondent pas à notre cas.
- Effet d'une déformation plastique de traction sur la microstructure magnétique : Travaux de J. SARETE pour la partie magnétomécanique et de V. RENAULT pour la partie microscopique.
- Effet de l'application d'une contrainte de traction et de compression in situ sous le microscope à effet KERR mais sur une éprouvette recouverte de diélectrique (travaux de D. TAPULEASA).

### 3.2 EFFET DE L'APPLICATION D'UNE CONTRAINTE DE TRACTION ET DE COMPRESSION IN SITU SOUS LE MICROSCOPE A EFFET KERR

L'éprouvette de forme plate à larges têtes, de section utile 8 x 2 mm est en Fer pur, matériau comparable à celui que nous utilisons en fatigue. Elle est recuite sous vide et polie mécaniquement, puis électrolytiquement dans sa partie utile. Enfin un dépôt sous vide de 500 Å de Nitrure de Silicium est réalisé.

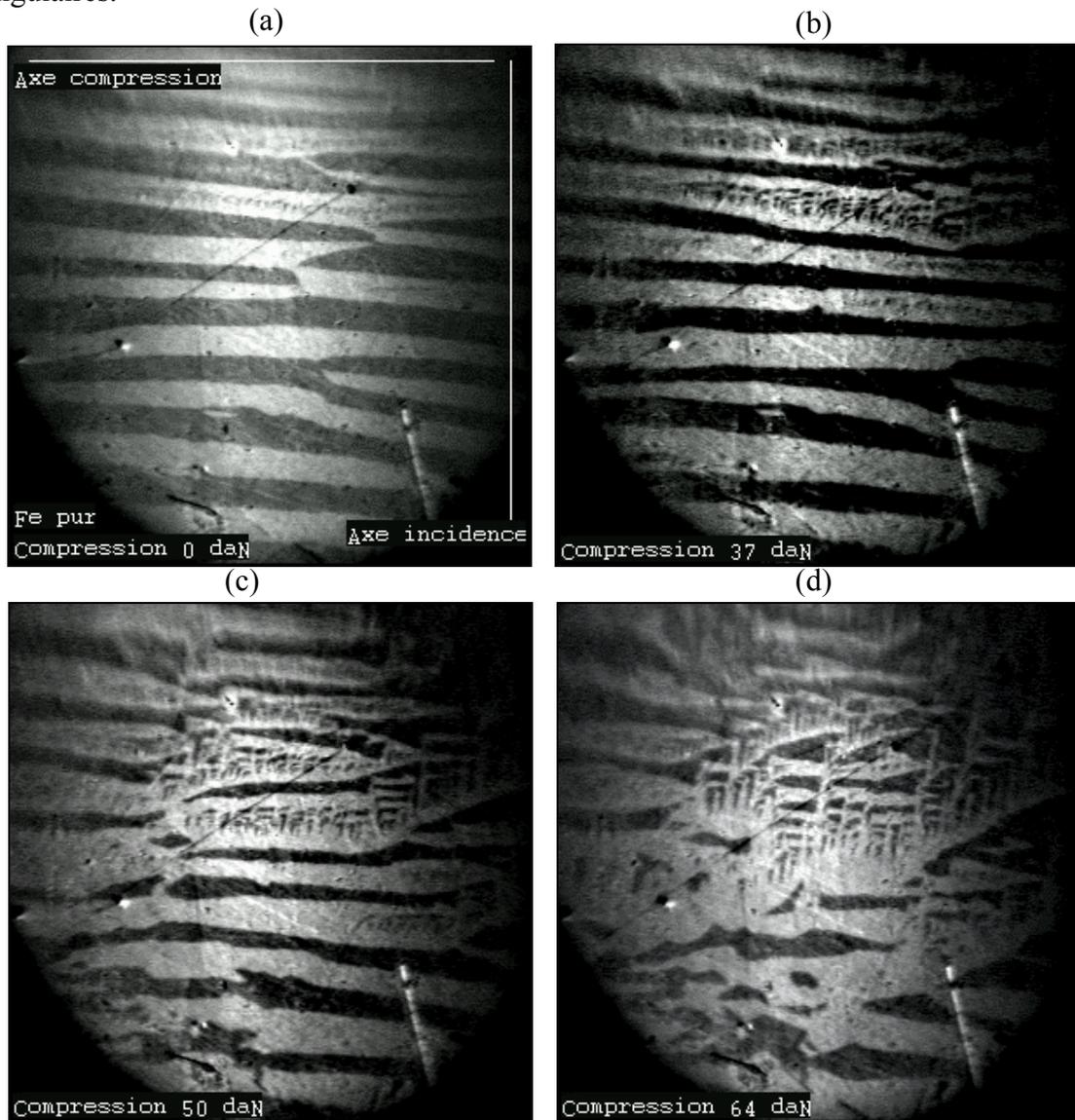
La planche figure II-13 représente quatre photographies prises lors d'un essai de traction de haut en bas et de gauche à droite: (a) état départ 4 daN, (b) traction 33 daN, (c) traction 43 daN et (d) traction 50 daN, la direction de sollicitation est horizontale et l'axe d'incidence vertical.

Un grain avec des domaines horizontaux est observable en haut à gauche et des domaines pratiquement verticaux en bas à droite. On remarque une continuité des domaines avec une ligne de séparation pratiquement à  $45^\circ$ . Les défauts de polissage (points blancs et petite croix) permettent un repérage précis en position. Sous l'effet de la force de traction croissante de 0 à 50 daN, on observe une croissance des domaines horizontaux au détriment des domaines verticaux. Nous proposons, dans le chapitre suivant, une interprétation à ces observations.



**Figure II-13** : Ensemble de photographies prises au microscope à effet KERR sur du fer ARMCO recouvert de diélectrique et soumis à un effort de traction (observations de D. TAPULEASA).

Les quatre photographies contenues dans la figure II-14 représentent la partie centrale d'une éprouvette identique à la précédente en fer, également recouverte d'un dépôt diélectrique. La contrainte appliquée est de compression d'axe horizontal. Partant de domaines bien définis (photographie du haut à gauche), on aboutit à une structure constituée presque exclusivement de domaines blancs sur laquelle se superpose une structure plus confuse de petits domaines triangulaires.



**Figure II-14 :** Photographies prises au microscope à effet KERR sur du fer ARMCO recouvert de diélectrique et soumis à un effort de compression (observations de D. TAPULEASA).

### **3.3 EFFET D'UNE DEFORMATION PLASTIQUE EN TRACTION SUR LA STRUCTURE MICROMAGNETIQUE ET OBSERVATION AU MICROSCOPE A EFFET KERR APRES DECHARGEMENT (DEA DE V. RENAUD [52])**

Cette étude est complémentaire de celle réalisée par J. SARETE [14], présentée au chapitre I (5.2.3), sur la caractérisation de la déformation plastique par la méthode magnétomécanique. Le mode expérimental est comparable, les essais sont réalisés sur des éprouvettes plates en fer ARMCO recuites.

La déformation est obtenue sur une machine de traction ADAMEL du laboratoire. Des caractérisations Barkhausen sont également effectuées pour chaque état. Les observations au microscope sont réalisées sans dépôt de diélectrique ce qui rend l'observation plus difficile mais permet par contre de déterminer les orientations magnétiques en surface.

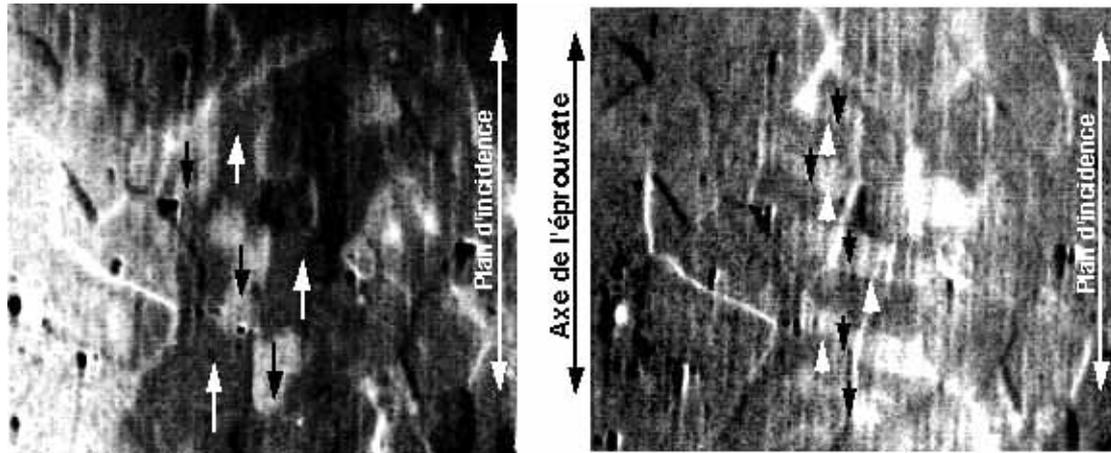
#### **3.3.1 Caractérisation de l'état initial**

- Traitement : un recuit sous hydrogène conduisant à une démagnétisation thermique et à une relaxation des contraintes internes, ce qui correspond à une structure d'équilibre ferritique avec des grains de l'ordre de 0,1 mm.
- Caractérisation Barkhausen : le résultat est classique, le pic est étroit d'amplitude importante avec un maximum pour un champ faible (caractéristique d'une ferrite recuite, matériau doux).
- Observation au microscope à effet KERR :
  - Avec une incidence dans le sens longitudinal de l'éprouvette sont observables de nombreux grains avec des domaines orientés perpendiculairement par rapport à la grande longueur de l'éprouvette (orientation transversale) et quelques grains présentant des tâches claires et sombres (figure II-15 photographie de gauche).
  - Avec une incidence dans le sens transversal de l'éprouvette on observe également de nombreux grains dans le sens transversal et quelques grains avec des domaines orientés dans le sens longitudinal de l'éprouvette (figure II-16 photographie de gauche).

Conclusion : à l'état recuit l'échantillon présente bien un état démagnétisé avec une répartition des domaines dans les grains presque équiaxes avec néanmoins une prédominance de domaines orientés dans le sens transversal et parallèlement à la surface de l'éprouvette.

#### **3.3.2 Etat déformé plastiquement à 0,38% caractérisation immédiatement après déchargement plan d'incidence parallèle à l'axe de l'éprouvette**

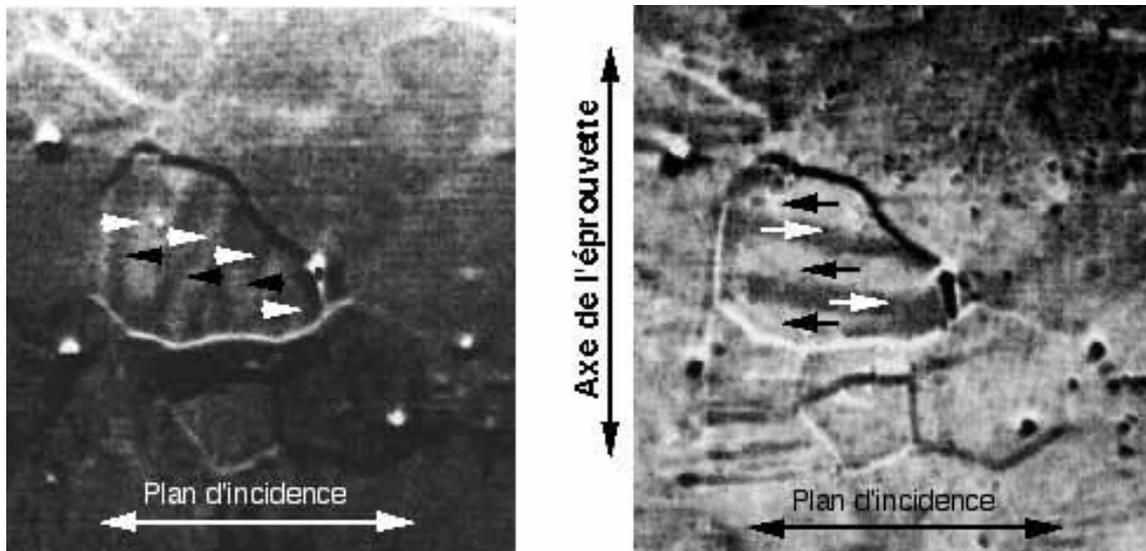
- La structure métallurgique n'a pas changé ; des bandes de glissement apparaissent sur certains grains qui deviennent par conséquent inobservables au microscope à effet Kerr.
- Caractérisation Barkhausen : elle correspond à un pic avec trois "bosses", moins important et décalé vers les champs plus élevés (caractéristique d'une structure sous contrainte de compression) que l'état recuit non déformé.
- Observation au microscope à effet KERR : aussi bien en incidence longitudinale qu'en transversale, les grains à tâches et les grains longitudinaux ont tous disparu au profit d'une orientation transversale des domaines (cf. photographies de droite des figures II-15 et II-16).



**Figure II-15** : Photographies prises au microscope à effet KERR sur du fer ARMCO de la même structure à gauche avant déformation et à droite après une déformation plastique sans démagnétisation.

### 3.3.3 Etat déformé plastiquement à 0,38%, plan d'incidence perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette

Au microscope à effet KER, les observations des mêmes grains montrent que certains domaines ont changé en nombre et en répartition, mais l'orientation globalement transversale par rapport à l'axe de traction est accentuée.



**Figure II-16** : Photographies prises au microscope à effet KERR sur du fer ARMCO à gauche avant déformation et à droite après une déformation plastique et démagnétisation de l'éprouvette.

### 3.3.4 Conclusion

Nous avons reporté sur les photographies l'orientation probable des domaines en surface (flèches blanches et noires).

Une déformation plastique modifie la répartition des domaines magnétiques, une orientation transversale est privilégiée. Si on rapproche ces résultats de ceux de J. SARETE, l'essai réalisé par V. RENAUD est proche de celui indiqué par le N° 1 figure I-26. La signature particulière de bruit magnétomécanique qu'il avait obtenue avait été interprétée comme étant due à des contraintes résiduelles de second ordre de compression ; résultat confirmé par l'essai Barkhausen. Le fait d'effectuer une démagnétisation magnétique ne modifie pas le champ de contrainte interne, il est donc normal de retrouver une microstructure magnétique orientée transversalement même après démagnétisation comme si elle était soumise à une contrainte de compression.

Nous proposons, dans le paragraphe suivant, une interprétation plus phénoménologique de tous ces résultats.

## 4 INTERPRETATION ET MODELISATION QUALITATIVE

### 4.1 INTRODUCTION

Afin de mieux comprendre tous les phénomènes constatés dans les paragraphes précédents, nous proposons une interprétation en termes de microstructure magnétique et de sa réorganisation sous l'effet de la contrainte puis un schéma de modélisation graphique. La problématique se pose en quatre questions:

- Comment interpréter les observations du chapitre précédent ?
- Le bruit magnétomécanique n'est pas si ténu, il doit donc correspondre à une contribution d'un nombre important de mouvements de parois (cas de l'acier XC10 recuit). Comment expliquer la différence de réponse entre l'amplitude du signal Barkhausen et celle du signal magnétomécanique ?
- Les observations montrent des modifications complètes de la microstructure magnétique que ne rend pas le modèle plan à 4 domaines.
- Si les mouvements correspondent à celui de parois à 90°, comment alors expliquer les modifications de microstructures observées en particulier la nucléation de nouveaux domaines ?

### 4.2 UTILISATION D'UN MODELE A TROIS DIMENSIONS

Rappelons que, d'après la bibliographie, dans le cas des matériaux à magnétostriction positive tel que le fer, la direction de magnétisation des domaines sera favorisée par une contrainte si la déformation induite par magnétostriction est additive à la déformation introduite par la contrainte (cf. fig. I-14). En d'autres termes, une contrainte de traction favorisera les domaines orientés dans la direction de cette contrainte, une contrainte de compression favorisera les domaines orientés perpendiculairement.

Un cube de matière avec ses domaines (fig. I-8 c) peut se présenter suivant six orientations par rapport à une contrainte (comme indique la figure II-17 numérotées arbitrairement de 1 à 6. Nous n'avons pas reporté sur ces cubes les domaines de fermetures, bien qu'ils soient très importants lors des observations en surface.

En observant ces six cubes, des remarques s'imposent :

- Deux orientations sont favorables à la traction {cubes (1) et (2)}. La direction de la contrainte est parallèle aux plans des parois ainsi qu'à la direction de magnétisation.
- Quatre orientations sont favorables à la compression. Il apparaît donc clairement une différence entre la traction et la compression. Mais ces quatre états favorables à la compression ne sont pas tout à fait équivalents.
  - Deux présentent des plans de parois parallèles à la direction de la contrainte {cubes (3) et (6)}, comme pour la traction, par contre la direction de magnétisation est évidemment perpendiculaire à la contrainte.
  - Deux présentent des plans de parois et une direction de magnétisation perpendiculaire à la direction de la contrainte {cubes (4) et (5)}.

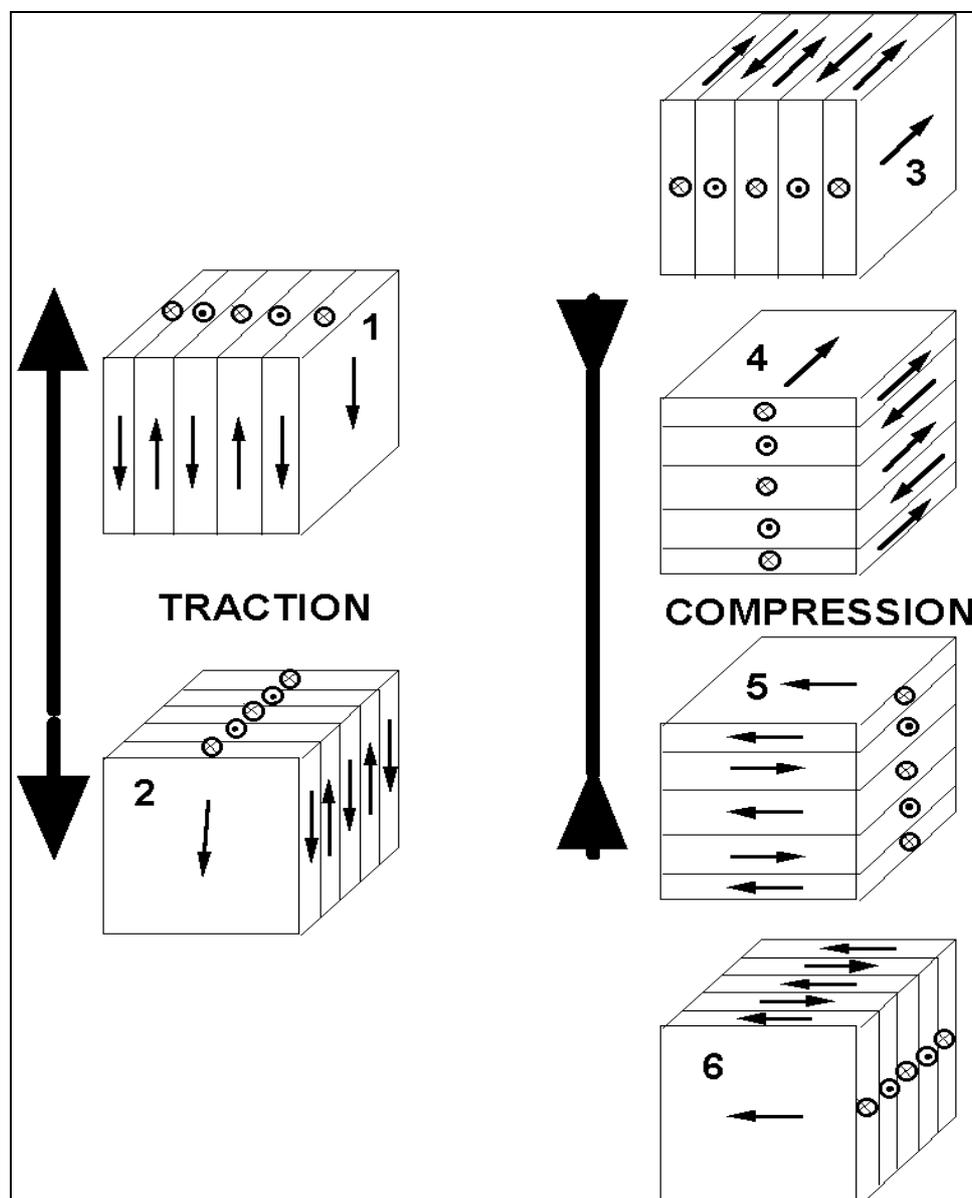
La structure la plus stable est celle qui minimise l'ensemble des énergies dans ce cas : l'énergie des domaines et l'énergie des parois. Pour les quatre configurations, l'énergie des domaines est équivalente ; par contre, l'énergie des parois de Bloch à 180° des cubes (4) et (5) est plus faible car, dans l'épaisseur des parois, les directions de magnétisation restent dans un plan favorisé par la magnétostriction. Les cubes de type (4) et (5) semblent donc plus favorables.

- Ces remarques doivent permettre d'expliquer certains comportements dissymétriques. Par exemple, lors d'un premier chargement, partant d'un état statistiquement démagnétisé,

globalement 1/3 du volume devra changer de direction de magnétisation si le chargement est en compression alors que les 2/3 devront changer de direction sous l'effet d'une contrainte de traction. Ce qui devrait se traduire par un nombre de mouvements de parois différent entre ces deux cas.

- Au regard des schémas, il semble probable que certains "passages", de (1) à (3) ou de (2) à (6), soient plus faciles, car ils conservent globalement la direction des plans des parois et le nombre des domaines et se traduisent simplement par une rotation de  $90^\circ$  de la direction de magnétisation. Il faut bien noter que cette rotation de  $90^\circ$  de la direction de magnétisation est la conséquence des mouvements de parois à  $90^\circ$  et non la rotation à l'unisson des moments magnétiques. Nous proposons dans le paragraphe suivant une modélisation qualitative de ce passage.

- Les autres passages sont probablement plus difficiles, ce qui revient à dire qu'ils vont être distribués en fonction de l'application de la contrainte et que le phénomène magnétoélastique observé va donc s'étendre sur une certaine plage de contraintes ou de temps.



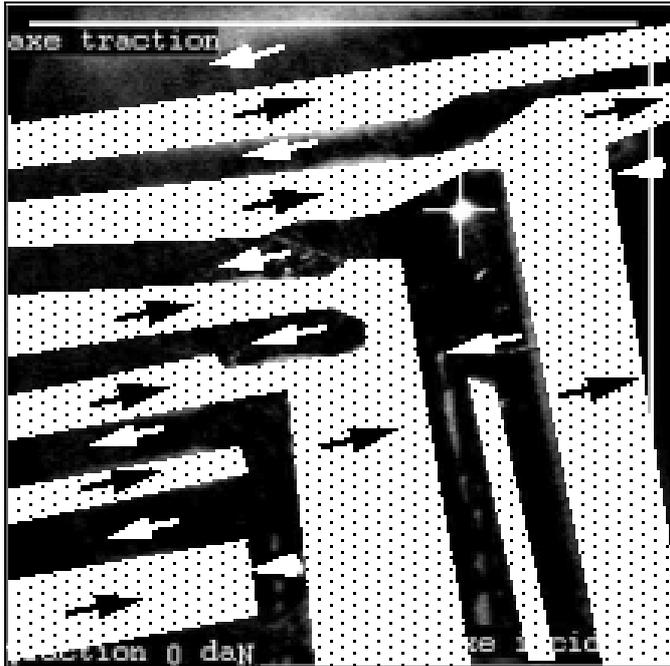
**Figure II-17 :** Modèles volumiques représentant les possibilités de configuration selon les contraintes

### 4.3 INTERPRETATION QUALITATIVE DES OBSERVATIONS DU PARAGRAPHE 3

Partant des considérations précédentes, en utilisant les six orientations possibles du modèle exposé ci-dessus et des informations fournies par le microscope à effet KERR, nous proposons une interprétation des images observées.

#### 4.3.1 Essai sous contrainte de traction (§ 2-2)

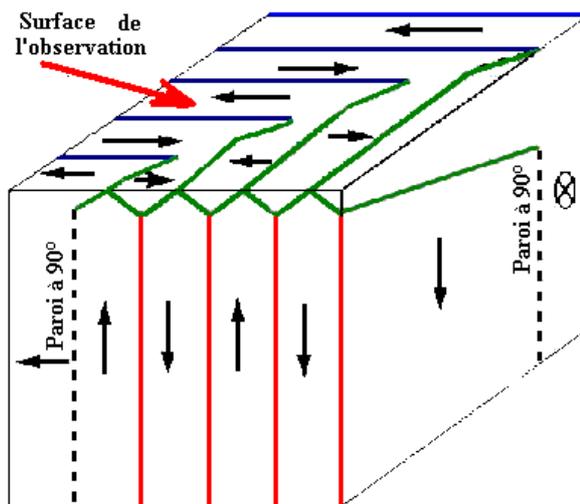
Rappelons que dans ce cas, l'observation est réalisée sous contrainte, l'axe de traction est horizontal pour ce cas.



Partant de la première photo (figure II-13 a), nous avons redessiné le contour des domaines (figure Erreur! Liaison incorrecte.) et proposons des orientations probables des directions de magnétisation. Rappelons que, lorsque la contrainte augmente, on observe que les domaines horizontaux croissent au détriment des domaines verticaux ; la ligne de séparation pratiquement à  $45^\circ$  se déplace de gauche à droite. Nous faisons l'hypothèse de la continuité de l'orientation des domaines car aucun contraste n'apparaît entre ces deux types de domaines

**Figure II-18 :** Mise en évidence des domaines

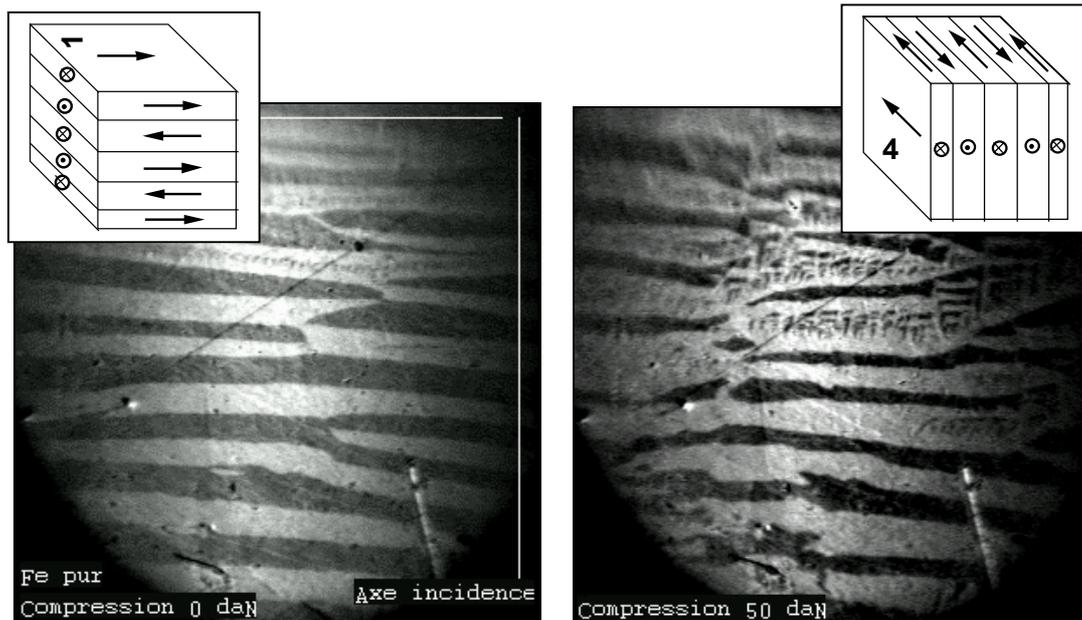
- La partie avec les domaines horizontaux est interprétée comme étant constituée de domaines principaux perpendiculaires à la surface avec une direction de magnétisation parallèle à la surface de l'échantillon et à la direction de la contrainte (cube N° 1 du modèle ci-dessus en vue de face). Cette orientation favorise bien, par magnétostriction une déformation dans la direction de la traction.
- La partie avec les domaines verticaux (à droite) est interprétée comme représentant les domaines de fermeture des domaines principaux, normaux à la surface (cube N°4 du modèle ci dessus). Cette orientation des domaines principaux n'est pas favorisée par la traction ; il est donc normal qu'elle disparaisse. L'effet est progressif car ce passage n'est pas particulièrement facile.
- On remarque également que le nombre des domaines horizontaux et verticaux est pratiquement le même. Si on considère qu'il y a continuité de l'orientation des domaines, ceci peut signifier que les domaines de fermeture ont constitué les germes de naissance et croissance des domaines horizontaux. Ce qui implique que la désorientation entre les domaines soit de  $90^\circ$ , d'où une ligne de séparation approximativement à  $45^\circ$  qui semble se déplacer et se prolonger probablement par un plan incliné en profondeur.



Cette figure est sensée représenter un morceau de matière comparable à celui de la photo ci-dessus, associant un morceau du cube 1 en bleu et du cube 4 en rouge. Nous avons également représenté les domaines de fermeture en vert. Le passage d'un type de domaine à l'autre se fait donc bien par des déplacements de parois à 90° mais touche un volume de matériau important.

**Figure II-19 :** Représentation volumique des domaines observés.

#### 4.3.2 Essai sous contrainte de compression



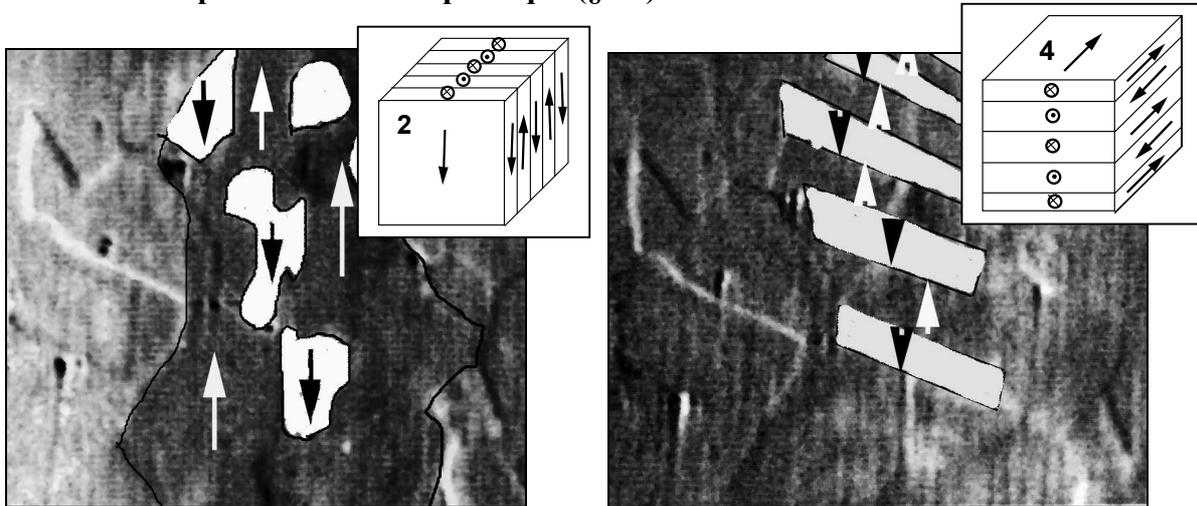
**Figure II-20 :** Observation de l'état initial sans contrainte par microscope effet Kerr

**Figure II-21 :** Etat sous contrainte de compression de 50 MPa

Nous avons reproduit les photographies 1 (état initial sans contrainte) et 3 (état comprimé). L'état initial peut être interprété comme étant constitué de domaines principaux avec une direction de magnétisation horizontale parallèle à l'axe de compression. Cette orientation n'est donc pas favorable à la compression (cube de **type (1)**). La modification de la microstructure magnétique est dans ce cas plus difficile à interpréter ; on observe dans un premier temps un élargissement de certains domaines (ceux en blanc) puis à l'intérieur de ceux-ci une nouvelle microstructure confuse apparaît mais néanmoins avec des directions perpendiculaires à la direction initiale. Les petits domaines observés sont probablement de **type (4)** inclinés par

rapport à la surface de l'échantillon. Il est très difficile dans ce cas de comprendre le mouvement des parois.

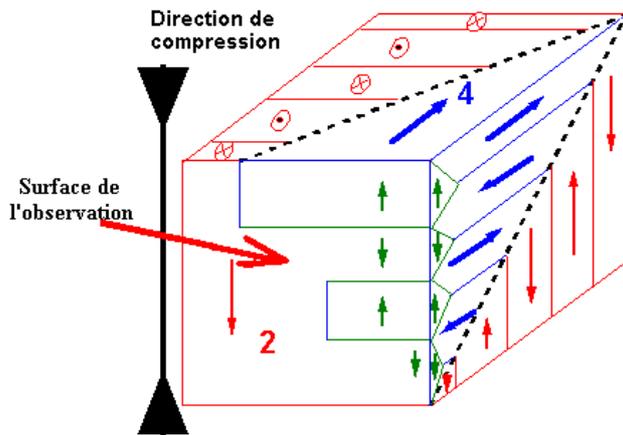
### 4.3.3 Essai après déformation plastique (§2-2)



**Figure II-22 :** Observations par effet KERR sur du fer ARMCO après une déformation plastique et démagnétisation de l'éprouvette.

Les figures II-22 reprennent les photographies figure II-15 où nous avons redessiné les contours des domaines clairs. L'observation étant faite sans dépôt diélectrique l'indexation des directions de magnétisation est possible et elle est parallèle au plan d'incidence (vertical dans notre cas). La direction de la contrainte de plastification (grand axe de l'éprouvette) est également verticale. Dans ce cas, on peut donc penser que la contrainte interne moyenne est de compression avec la même direction.

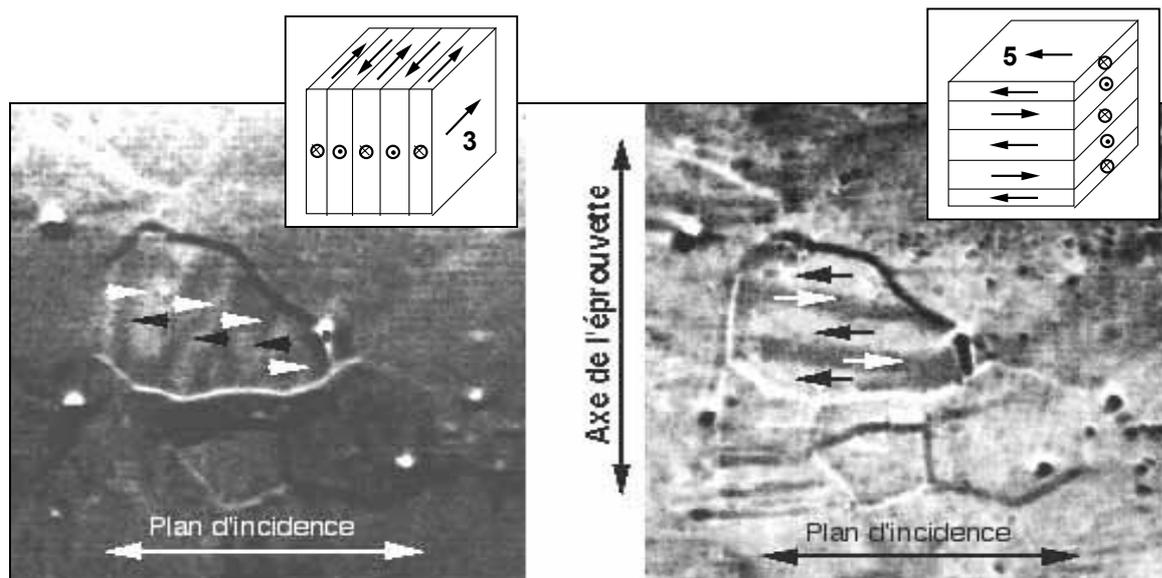
- La photographie de gauche (état initial) est identifiée comme représentative d'un cube type **(2)** ; les tâches plus ou moins rondes étant dues à la courbure des domaines dans l'espace et à la coupe par la surface. Cette direction est orientée dans l'axe de l'éprouvette.
- La photographie de droite (état après plastification) est identifiée comme représentant les domaines de fermeture d'un cube de type **(4)**. Les domaines principaux étant dans des plans perpendiculaires à la surface et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette (domaines transversaux). Cette structure est favorable pour une contrainte de compression ce qui est le cas si on tient compte des contraintes internes.



La figure II-23 représente un cube de matière en cours de transformation. La propagation des parois en pointillé (parois à  $90^\circ$ ) entraîne le changement de structure. Ici encore les mouvements principaux sont ceux de parois à  $90^\circ$  et le volume concerné est important (tout le cristal).

**Figure II-23** : Représentation volumique des domaines observés

#### 4.3.4 Autre exemple



**Figure II-24** : Photographies prises au microscope à effet KERR sur du fer ARMCO à gauche avant déformation et à droite après une déformation plastique puis démagnétisation de l'éprouvette.

Les photos de la figure II-24 représentent un autre grain de la même éprouvette mais observé avec un plan d'incidence perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. Les domaines visibles sont donc contrastés pour une direction de magnétisation horizontale (cf. les petites flèches blanches et noires).

- Nous interprétons l'observation de l'état initial (photographie de gauche) comme représentant les domaines de fermeture de domaines principaux sous-jacents orientés dans l'axe de l'éprouvette **cube (3)**.

- Nous interprétons l'observation de l'état déformé (photographie de droite) comme des domaines principaux orientés perpendiculairement à la surface et à l'axe de l'éprouvette **cube (5)**. Cette direction correspond bien à un état favorisé par une contrainte de compression comme pour le cas précédent.

Mais l'état initial correspond également à une structure favorisée par la compression cube (3) bien que l'orientation ait été transformée. L'observation de tout l'échantillon en incidence longitudinale ou transversale ne fait plus apparaître des grains uniquement orientés transversalement c'est-à-dire de type (4) ou (5) il faut remarquer que, dans ces deux cas, les plans des domaines sont perpendiculaires à la direction de la contrainte. Ces deux cas sont donc toujours privilégiés par la compression même si la direction de magnétisation tourne dans ce plan.

Il est donc probable qu'à l'état initial, la direction de magnétisation (cube (3)) ne soit pas parfaitement orientée perpendiculairement à la surface, mais légèrement inclinée. Donc un intermédiaire entre 3 et 1 l'énergie magnétoélastique n'est donc pas minimum et sera suffisante pour faire basculer tous les domaines dans la direction type 5.

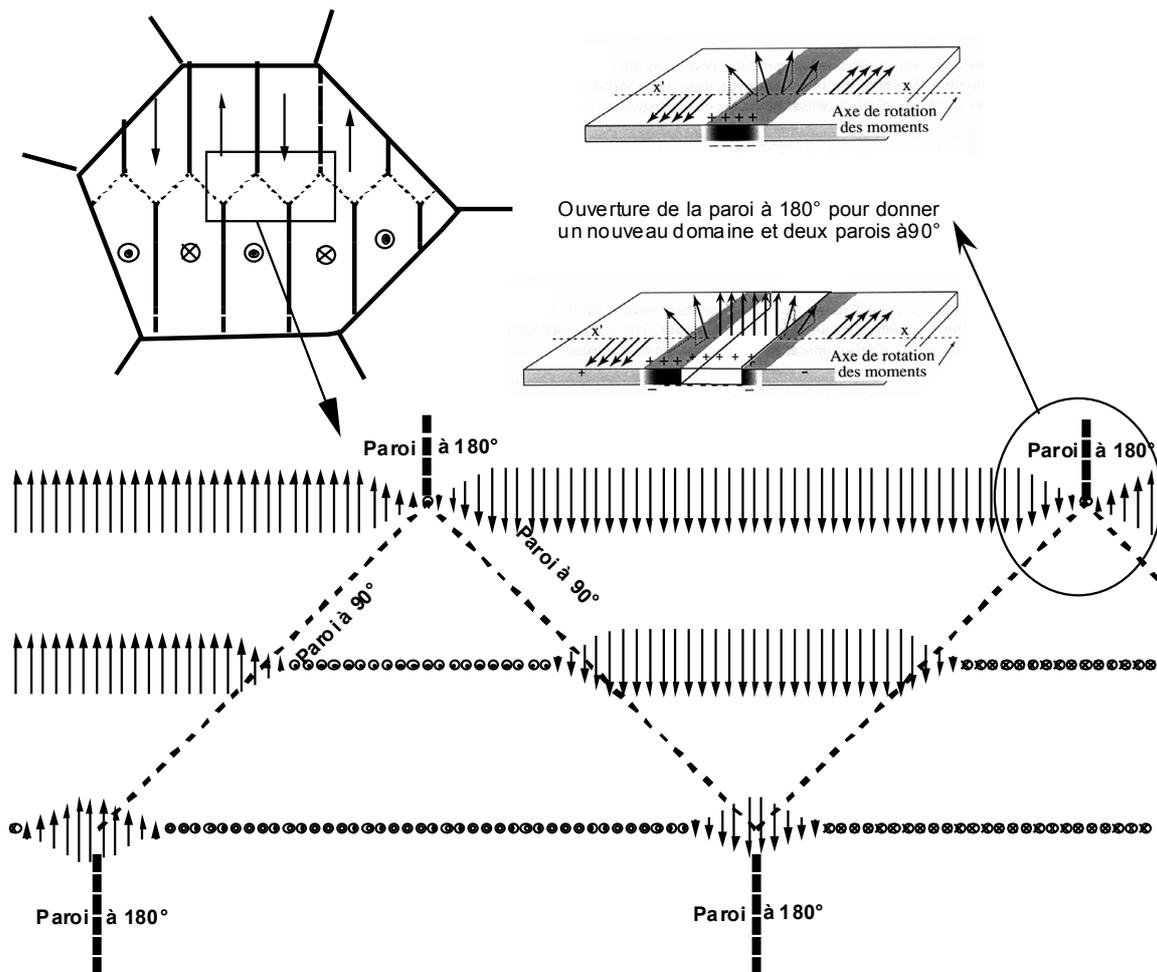
#### **4.4 EXEMPLE DE MODELISATION PERMETTANT D'ILLUSTRER LA MODIFICATION DE L'ORIENTATION DE DOMAINES PRINCIPAUX PAR CREATION ET MOUVEMENTS DES PAROIS DE BLOCH à 90°**

Les observations faites au microscope à effet KERR et les interprétations au moyen du modèle 3D confirment que les modifications de la microstructure magnétique s'effectuent presque exclusivement par des mouvements de parois à 90°.

Par ailleurs ces observations confirment qu'un grand nombre de cristaux vont voir la direction de magnétisation des domaines modifiée par l'application d'une contrainte. Dans le cas du passage de la traction à la compression ou réciproquement (fatigue), c'est la quasi-totalité des cristaux qui seront affectés. Le phénomène n'est donc pas aussi ténu !

Les essais ont également confirmé que le phénomène se produisait pour des contraintes très faibles (appliquées ou internes), quelques MPa, ce qui revient à dire qu'il faut peu d'énergie pour provoquer les modifications. Elles se traduisent pourtant par des créations de nouveaux domaines (nucléation) et des déplacements importants de parois.

Nous nous proposons d'expliquer que, partant d'une famille de grands domaines principaux, anti-parallèles (état démagnétisé), de direction de magnétisation donnée, séparés par des parois à 180°, on peut par un processus demandant peu d'énergie, retrouver une structure comparable c'est-à-dire constituée également de grands domaines anti-parallèles mais orientés à 90° par rapport à l'état initial. La figure II-25 représente un tel modèle.



**Figure II-25 :** Schéma du processus de la décomposition de parois à  $180^\circ$  en deux parois à  $90^\circ$  et la recombinaison de parois à  $90^\circ$  pour former de nouvelles parois à  $180^\circ$

Notre interprétation s'est appuyée sur les hypothèses suivantes:

- On considère généralement qu'une paroi à  $180^\circ$  est constituée de deux parois à  $90^\circ$  accolées.
- Une paroi à  $180^\circ$  est relativement épaisse (une centaine de couches atomiques) les atomes des couches médianes sont également dans des directions de facile aimantation perpendiculaires à celles initiales. Ces quelques épaisseurs atomiques sont donc en équilibre et peuvent constituer le germe d'un nouveau domaine orienté à  $90^\circ$ .
- Partant de ces deux considérations, on aboutit à la notion décomposition d'une paroi à  $180^\circ$  pour donner deux parois à  $90^\circ$  et réciproquement, la recombinaison de deux parois à  $90^\circ$  va reformer une paroi à  $180^\circ$  donnant d'autres domaines.
- Cette remarque revient à dire qu'avant et après transformation, le nombre des domaines reste le même et la longueur globale des parois comparable d'où un apport d'énergie faible (c'est bien ce que nous avons observé).

## 5 CONCLUSION

Nous avons effectué un certain nombre de mesures magnétomécaniques. Ceci nous a permis d'une part, d'appréhender davantage les conditions expérimentales, de montrer la faisabilité et la reproductibilité de la mesure magnétomécanique et d'autre part de mieux comprendre le mécanisme régissant le bruit magnétomécanique.

Les mesures magnétomécaniques sur différents états métallurgiques du même acier (état recuit, trempé, revenu) ont été faites et complétées par d'autres moyens de caractérisation (Barkhausen et PTE) pour une étude comparative.

Il est intéressant de noter que dans l'état recuit le phénomène magnétomécanique est plus important (réorganisation importante de la microstructure sous l'effet de la contrainte) par contre le phénomène est faible dans les autres états étudiés. En d'autre terme, l'effet des contraintes est suffisant pour provoquer une réorganisation importante de la microstructure dans le cas de matériaux purs mais insuffisant s'il y a des obstacles au déplacement des parois.

En s'appuyant sur les observations de domaines effectuées au microscope à effet Kerr, nous avons interprété la microstructure magnétique et sa réorganisation par une schématisation et montré que certaines configurations et passage d'une configuration à l'autre étaient plus ou moins facile.

Dans le cas de l'état recuit, le bruit magnétomécanique n'est pas si ténu. Il représente donc la contribution d'un nombre important de mouvements de parois. Par un modèle graphique, nous avons montré que des mouvements de parois à  $90^\circ$  pouvaient induire des modifications importantes de microstructure par la nucléation de nouveaux domaines principaux. Ce processus se fait avec très peu d'énergie c'est à dire que le phénomène peut avoir lieu pour des contraintes faibles, par contre nous constatons que l'effet magnétomécanique est un faible « moteur », il provoque une réorganisation profonde de la microstructure s'il y a peu d'ancrage mais décroît rapidement si les parois rencontrent des obstacles à leur déplacement l'effet devient alors beaucoup plus faible et distribué.



# **Chapitre III**

## **Dispositif expérimental Matériaux utilisés**



# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>103</b>
<b>2</b>	<b>CHAINE DE MESURE.....</b>	<b>104</b>
2.1	CHAINE DE MESURE DU BRUIT MAGNETO MECANIQUE.....	104
2.1.1	<i>Chaîne Barkhausen – Chaîne Magnéto mécanique (les différences) .....</i>	<i>104</i>
2.2	DESCRIPTIF DE NOTRE EQUIPEMENT DE MESURE DU BMM .....	106
2.2.1	<i>Capteurs.....</i>	<i>107</i>
2.2.2	<i>Préamplificateur .....</i>	<i>108</i>
2.2.3	<i>Ampli filtre .....</i>	<i>109</i>
2.2.4	<i>Mesure de la valeur efficace.....</i>	<i>111</i>
2.2.5	<i>Acquisition .....</i>	<i>112</i>
<b>3</b>	<b>MOYEN D'EXCITATION MECANIQUE .....</b>	<b>114</b>
3.1	PRINCIPE DES ESSAIS DE FLEXION ROTATIVE.....	114
3.2	MACHINE DE FLEXION ROTATIVE .....	115
3.2.1	<i>Principe.....</i>	<i>115</i>
3.2.2	<i>Etalonnage.....</i>	<i>116</i>
3.3	EPROUVETTES.....	118
<b>4</b>	<b>MATERIAUX CONSTITUANT LES EPROUVETTES.....</b>	<b>119</b>
4.1	FER ARMCO .....	119
4.1.1	<i>Analyse chimique .....</i>	<i>119</i>
4.1.2	<i>Micrographie optique .....</i>	<i>119</i>
4.1.3	<i>Propriétés mécaniques.....</i>	<i>120</i>
4.2	ACIER XC55 .....	120
4.2.1	<i>Analyse Chimique .....</i>	<i>120</i>
4.2.2	<i>Micrographie .....</i>	<i>120</i>
4.2.3	<i>Propriétés mécaniques.....</i>	<i>120</i>
<b>5</b>	<b>OPTIMISATION DES PARAMETRES DE MESURE.....</b>	<b>121</b>
5.1	LES MASSES .....	121
5.2	CHOIX DU FILTRE (OPTIMISATION DU RAPPORT SIGNAL/BRUIT).....	121
5.2.1	<i>Origine du bruit .....</i>	<i>121</i>
5.2.2	<i>Etude des bruits .....</i>	<i>122</i>
5.3	INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION SUR LE BRUIT .....	124
5.4	ULTIME VERIFICATION .....	125
<b>6</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>125</b>



## 1 INTRODUCTION

La technique de mesure du bruit magnétomécanique nécessite un appareillage parfaitement adapté et repose sur trois points :

- Mesurer le phénomène magnétomécanique le plus proprement possible et présenter les résultats sous une forme exploitable.
- Trouver un dispositif permettant l'application d'une contrainte variable de manière fiable, reproductible et peu bruitée.
- Choisir des matériaux ferromagnétiques qui présentent une microstructure simple et parfaitement définie ;

En premier lieu, nous exposons la réalisation du dispositif électronique nécessaire pour mesurer un phénomène électromagnétique très ténu et de relativement haute fréquence. Une fois mis en forme puis suffisamment amplifié, le signal mesuré peut être acquis de manière informatique. Comme nous envisageons des essais de longue durée, la mesure ne peut pas être continue mais déclenchée à intervalles plus ou moins rapprochés. Enfin les mesures doivent être archivées puis restituées sous une forme simple pour l'interprétation.

Ensuite, nous rappelons les principes des essais de fatigue en flexion rotative et présentons la machine adaptée que nous avons construite et mise au point pour permettre des conditions d'essais satisfaisantes (fiabilité et bruit). Rappelons que les essais ont été réalisés au Tchad, pays où les coupures d'électricité sont très fréquentes.

Puis, nous présentons le choix des matériaux utilisés, leurs caractéristiques mécaniques et métallurgiques.

Enfin, nous exposerons l'optimisation des paramètres de mesure.

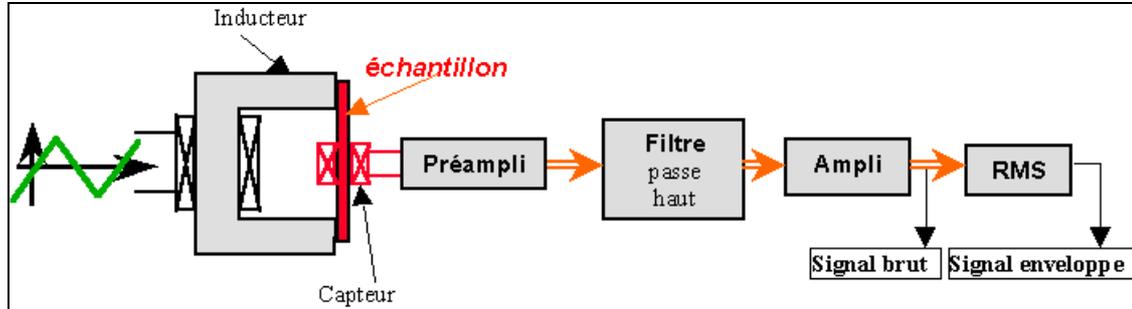
## 2 CHAÎNE DE MESURE

### 2.1 Chaîne de mesure du Bruit magnéto mécanique

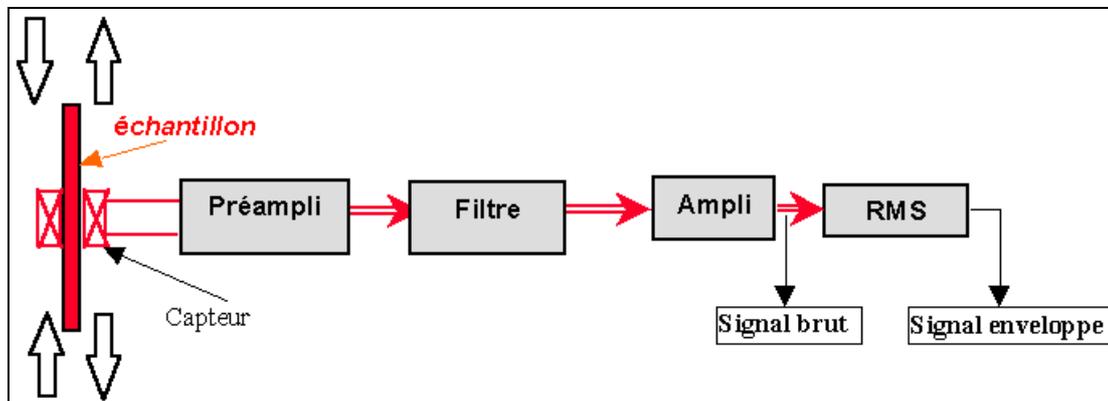
L'étude bibliographique et les expériences préliminaires ont montré l'existence et la possibilité de mesurer le bruit d'origine magnétomécanique. Les résultats présentés aux chapitres 1 et 2 ont été obtenus au moyen d'une chaîne de mesure initialement prévue pour mesurer le bruit BARKHAUSEN. Nous souhaitons, tout en bénéficiant de l'expérience acquise dans ce domaine, développer une chaîne de mesure spécifique, mieux adaptée, à la mesure du bruit d'origine magnétomécanique. Dans une première partie, nous ferons une étude critique des appareillages existants dans notre laboratoire et définirons les performances souhaitées. Nous décrirons ensuite le détail de la réalisation et les performances réellement obtenues.

#### 2.1.1 Chaîne Barkhausen – Chaîne Magnétomécanique (les différences)

Les figure III-1 et figur.III-2 représentent les deux chaînes de mesure en particulier la partie mise en forme du signal. On constate de prime abord que ces deux chaînes se ressemblent, la principale différence réside dans le mode d'excitation. Mais cette différence entraîne des conséquences sur les caractéristiques et performances du reste de la chaîne.

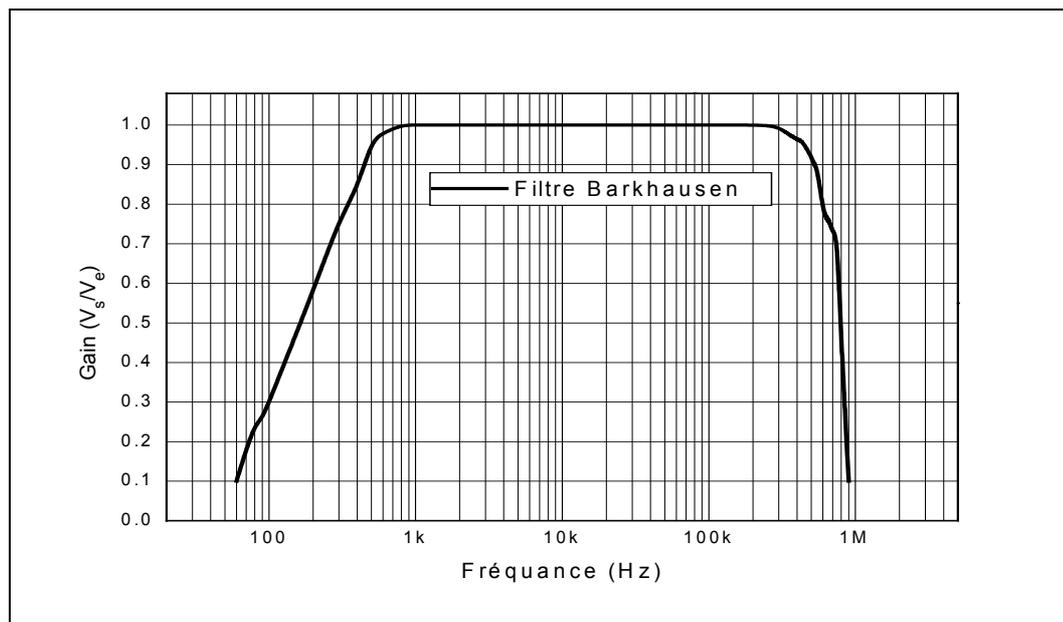


**Figure III-1 :** Schéma de principe de l'appareillage Barkhausen



**Figure III-2 :** Schéma de principe de l'appareillage magnétomécanique

- Pour la mesure Barkhausen, l'excitation magnétique triangulaire ou sinusoïdale à basse fréquence typiquement de 0,1 à 1 Hz induit des variations de flux importantes dans l'éprouvette (puisque'il est nécessaire de la saturer magnétiquement). Ces variations de flux seront mesurées intégralement par la bobine-captteur encerclante (150 spires, fil de 0,1 mm, impédance de l'ordre de 50  $\Omega$ ). Le signal mesuré par la bobine comporte donc deux composantes un signal (indésirable) de forte amplitude, quelques dixièmes de volts, de basse fréquence provenant de l'excitation ; sur lequel se superpose le tout petit signal Barkhausen proprement dit, celui que l'on souhaite mesurer (quelques dizaines de microvolts). Le gain du préampli est donc limité, typiquement 25, de manière à éviter la saturation sur la composante basse fréquence. Il faut également noter que toute imperfection (bruit) sur le courant d'excitation (en particulier le 50 Hz) sera perçue par le capteur. En raison de cette double sensibilité et de la nécessité d'éliminer les composantes basses fréquences, la bande de fréquence couramment utilisée pour mesurer le signal Barkhausen est de  $10^3$  à  $10^5$  Hz. Mais, rien ne dit qu'il n'existe pas une partie intéressante des signaux à plus basse fréquence. La figure III-3 représente la caractéristique du filtre Barkhausen utilisé dans notre laboratoire (filtre passe haut du troisième ordre) qui couvre la gamme moyenne fréquence. La coupure en haute fréquence est liée à la bande passante des amplis utilisés. Sa bande va de 1 KHz à 200 KHz.



**Figure III-3 :** *Caractéristiques Filtre Barkhausen*

- Pour la mesure magnétomécanique, le principe utilisé est relativement plus simple : d'une part, il n'y a plus besoin de fournir une excitation magnétique externe au niveau de l'éprouvette, d'autre part la contrainte n'entraîne pas de variation globale de flux, les seuls signaux captés par la bobine seront ceux d'origine micromagnétique qui nous intéressent. Par contre, d'après l'étude bibliographique, le niveau est plus faible (de 5 à 20 fois) ; soit de l'ordre de quelques microvolts. Rappelons que nous envisageons des mesures de surface et sous sollicitation rapide. La chaîne devra donc présenter un gain plus important (au moins 100 pour le préampli) et la fréquence devra aller du continu au MHz avec une possibilité d'ajuster la bande passante. Le signal final devra avoir quelques volts pour être converti correctement par la carte d'acquisition.

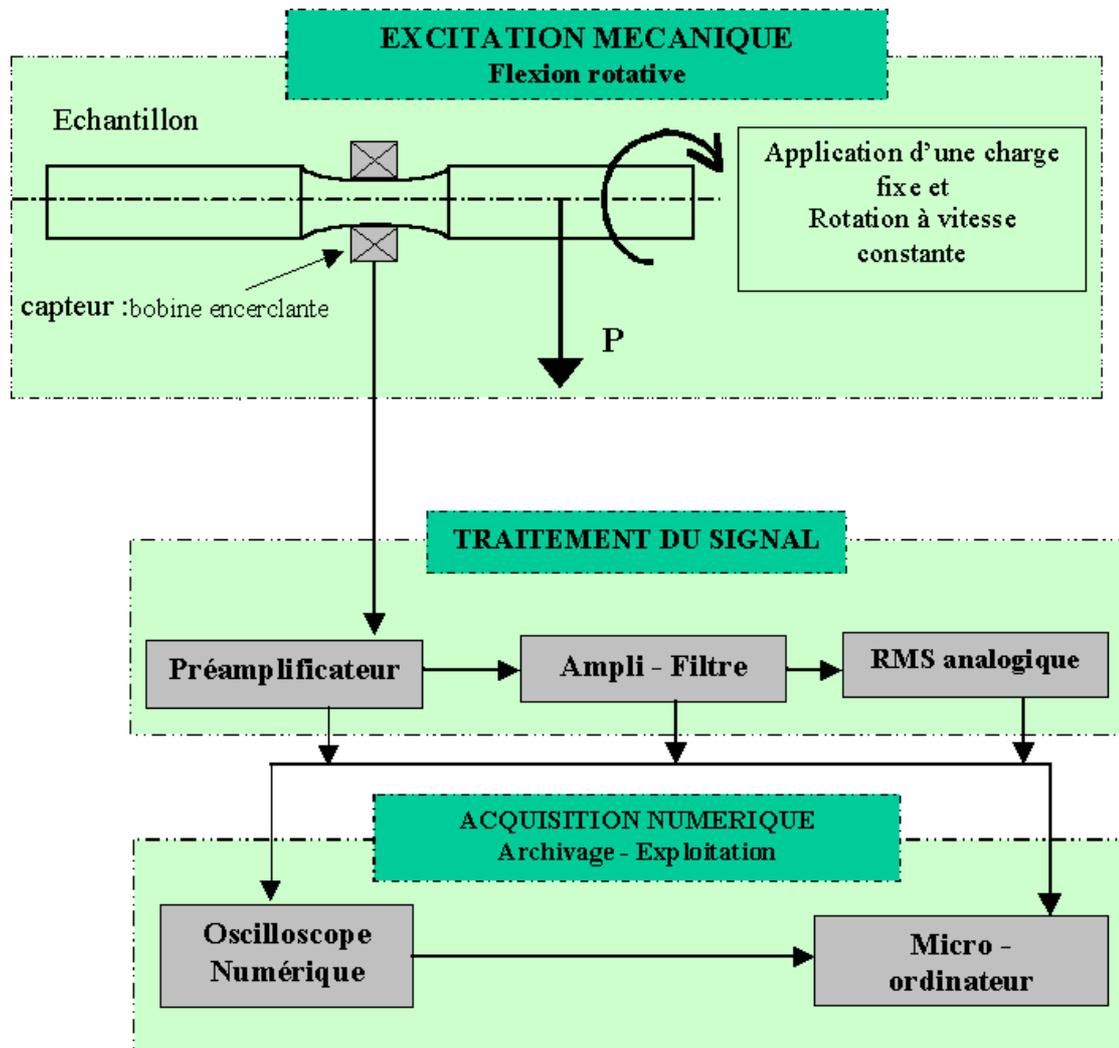
## 2.2 Descriptif de notre équipement de mesure de bruit magnétomécanique

Après avoir décrit les différences entre les principes des appareillages de mesure de bruit Barkhausen et magnétomécanique, nous allons détailler celui que nous avons réalisé. La figure III-4 représente le schéma général de notre dispositif qui comporte trois parties : l'excitation mécanique, la mesure proprement dite et l'acquisition du signal. Dans cette partie, nous présentons les deux derniers points.

La mesure du bruit magnétomécanique comporte : un capteur (une bobine encerclante ou de côté), un préamplificateur, un ampli-filtre passe bande. Le signal est ensuite mis en forme de manière à obtenir sa valeur efficace (RMS).

Deux systèmes d'acquisition sont ensuite utilisés conjointement :

- un oscilloscope numérique qui permet de visualiser en instantané le signal. Il est également raccordé à l'ordinateur ; un logiciel approprié permet le transfert des informations.
- Une carte d'acquisition analogique numérique associée à un ordinateur, permet l'acquisition directe des informations, l'archivage sous forme numérique et le traitement ultérieur.



**Figure III-4 :** Schéma synoptique du dispositif expérimental

### 2.2.1 Capteurs

Rappelons que, sous l'effet de la contrainte appliquée, en raison de l'effet magnétomécanique, processus présenté dans le chapitre précédent, la réorganisation de la microstructure magnétique se fait par des déplacements des parois de Bloch. Ces déplacements sont brusques et saccadés (ancrage, désancrage). Localement à chaque saut de paroi, il résulte une modification locale et brutale de l'aimantation du matériau qui entraîne de petites variations du flux magnétique. Elles sont mesurables en surface dans la section d'une bobine et la tension  $e(t)$  aux bornes de cette bobine est donnée par la loi de Lenz-Faraday :

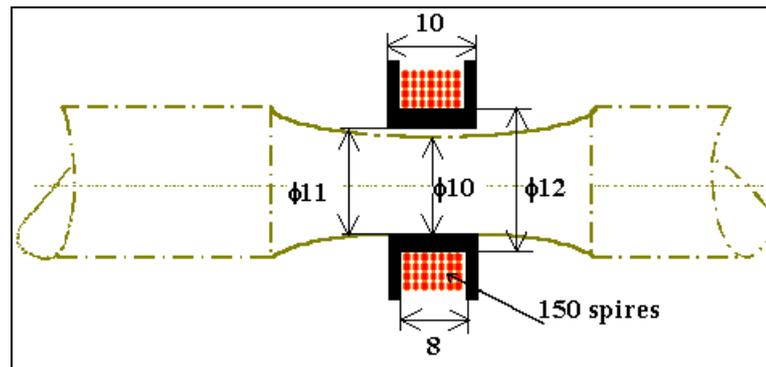
$$e(t) = -N \frac{dF}{dt} \text{ avec } N \text{ le nombre de spires}$$

Nous pouvons envisager deux sortes de capteurs :

- Une bobine encerclante pour une mesure globale comme utilisée dans le chapitre 2 ;
- Un capteur de côté pour une mesure plus ponctuelle afin de rechercher le maximum d'émission. (cf. Chapitre II Paragraphe 2-3).

#### 2.2.1.1 Bobine Encerclante

Nous utilisons comme capteur une bobine encerclante (réceptrice) de 150 spires réalisée avec du fil de 0.1mm de diamètre. Les spires sont jointives et bobinées sur quatre couches autour d'un support dont les dimensions sont données par la figure III-5. Son impédance est de l'ordre de 50  $\Omega$ . Afin d'améliorer le couplage, la bobine doit être la plus ajustée possible à la section de l'éprouvette. Pour des éprouvettes de forme toroïdale utilisées en fatigue, le support est constitué de deux demi-coquilles. Une fois ajustées, les parties sont assemblées par une colle rapide et le bobinage est réalisé à la main.



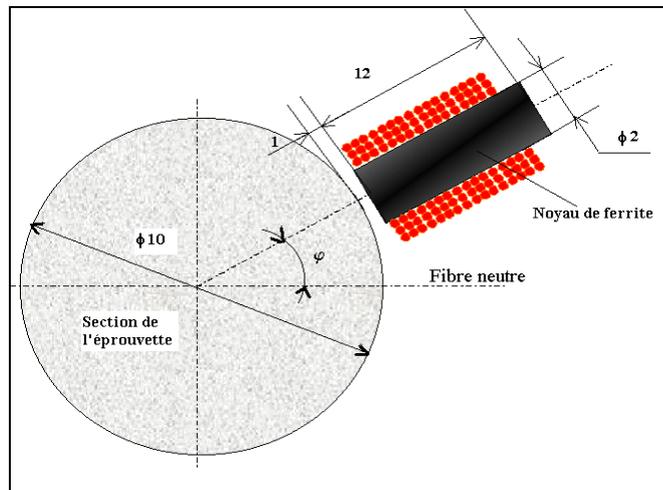
**Figure III-5 :** Bobine encerclante avec les dimensions du support

#### 2.2.1.2 Capteur de côté

Il est constitué d'une petite bobine placée autour d'un noyau de ferrite. Le signal étant plus faible, nous utilisons une bobine de 300 spires et de diamètre de fil de 0.1mm. Les spires sont jointives et bobinées sur plusieurs couches autour de la petite tige en ferrite (diamètre 2 mm) cf. figure III-6.

C'est un capteur beaucoup plus sensible au bruit électromagnétique environnant car le couplage capteur pièce n'est pas bon.

La position angulaire par rapport à la fibre neutre joue également un rôle important.



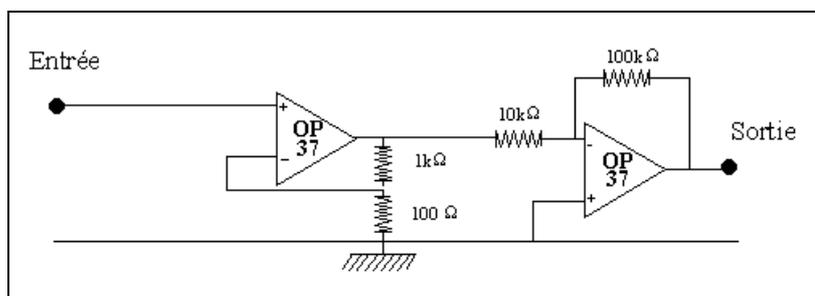
**Figure III-6 :** Capteur de côté

### 2.2.2 Préamplificateur

Le préamplificateur joue un rôle fondamental, de lui dépend toute la qualité de la mesure. Il a pour but d'adapter les impédances et de remonter le niveau du signal en sortie de la bobine. Il est placé le plus près possible du capteur afin d'effectuer une vraie mesure de tension, en particulier pour des fréquences élevées, et d'être moins sensible aux parasites.

La nécessité d'obtenir : un gain de l'ordre de 100, un faible niveau de bruit à l'entrée, une large bande passante au moins jusqu'à 1MHz, une impédance d'entrée la plus grande possible, nous a conduit au choix suivant :

- Ampli opérationnel très faible bruit large bande. Nous avons choisi l' OP37G de Analogie Device avec les caractéristiques suivantes :
  - Très faible bruit :  $3\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
  - Produit gain bande passante : 63 MHz
  - Température d'utilisation :  $25^\circ\text{C}$  à  $+85^\circ\text{C}$ .
  - utilisable pour le gain  $> 5$
- Un montage à deux étages avec un gain de l'ordre de 10 chacun, permettant d'augmenter la bande passante (produit gain bande passante).

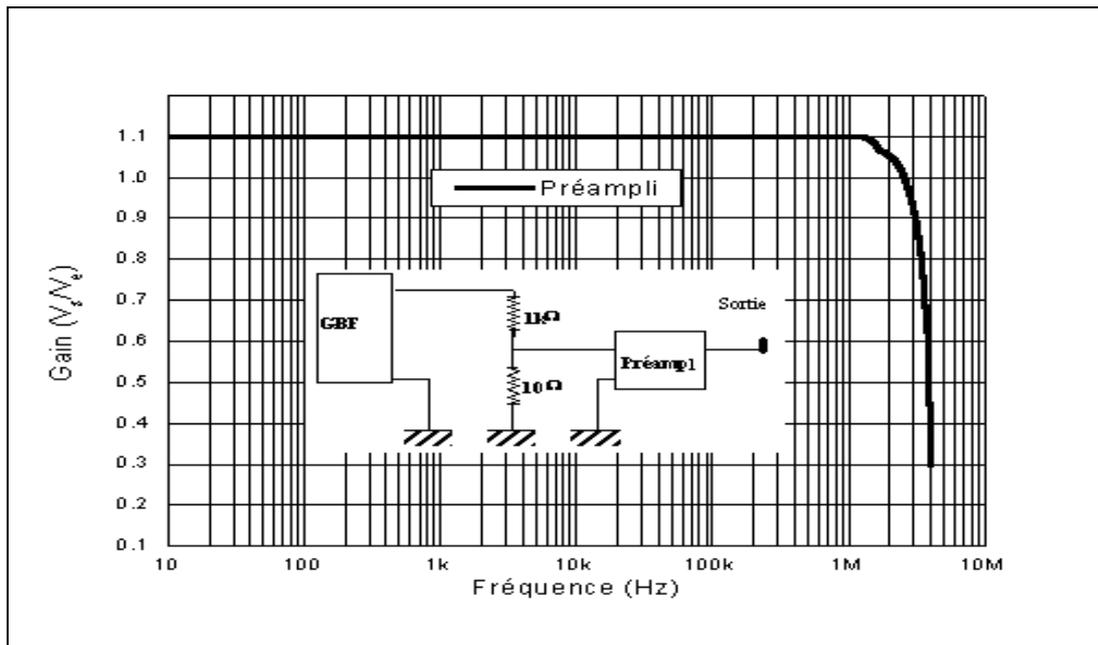


**Figure III-7 :** Préamplificateur à deux étages

- Le premier étage est un montage non-inverseur pour avoir une impédance d'entrée la plus grande possible, plusieurs MW dans notre cas soit un courant d'entrée de l'ordre de quelques nA avec un gain de 11.
- Le deuxième étage inverseur permet d'avoir à la sortie une impédance faible avec un gain de 10 soit un gain de 110 pour l'ensemble.

Le préampli est alimenté par une alimentation indépendante  $\pm 15$  V, découplée par rapport à la masse par 4 condensateurs : 2 de 10mF et 2 de 10 nF.

Afin de vérifier les performances de notre préampli, nous avons réalisé le montage ci-dessus et tracé la caractéristique du gain en fonction de la fréquence.



**Figure III-8** : Caractérisation du préamplificateur

Ce montage permet d'assurer un gain en tension de 110 avec une bande passante supérieure à 1 Mhz. Le bruit résiduel de l'ensemble bobine plus préampli, ramené à l'entrée, est de 2,3 mV.

### 2.2.3 Ampli filtre

Nous rappelons que la réorganisation des domaines de Weiss par déplacement des parois produit des perturbations magnétiques qui engendrent le bruit dans une large gamme de fréquence (de quelques Hz à plusieurs MHz). Le filtre est utilisé pour optimiser le rapport signal sur bruit. Il y a lieu de choisir une gamme de fréquence où le signal mesuré représentant le mieux le phénomène magnétomécanique.

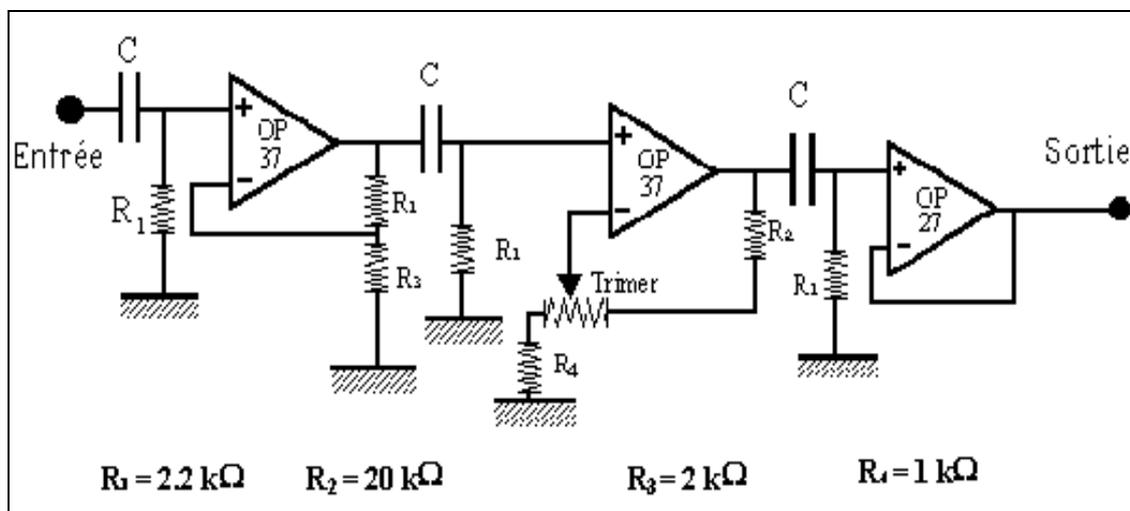
En résumé, le filtre doit avoir le cahier des charges suivant :

- Filtre passe bande,
- Gain 100 progressif,
- Faible bruit ;
- Fréquence haute la plus haute possible ;

- Fréquence basse, facilement ajustable du continu à 100 KHz ;
- Impédance compatible avec le préampli ;
- Coupure à 18 dB par octave (filtre du troisième ordre).

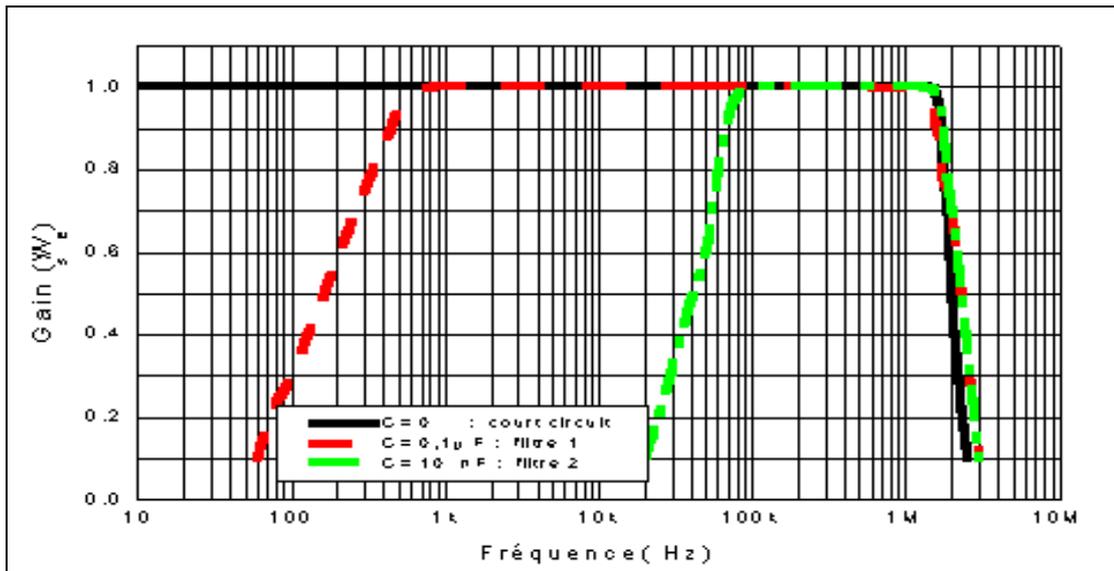
Nous avons fabriqué plusieurs filtres adaptés répondant à ce cahier des charges cf. schéma figure III-9. C'est un filtre à trois étages (trois premiers ordres en cascade). Les deux premiers étages présentent chacun un gain de 10, ils ont été réalisés à partir d'amplificateurs opérationnels "OP 37". Pour le troisième étage, (montage suiveur), le gain étant de 1, nous avons utilisé un "OP 27", car l'OP 37, de plus large bande passante, n'est utilisable que pour des gains supérieurs à 5, l'OP 27 offre les mêmes avantages sauf que son produit gain bande passante est inférieur 8 MHz.

Avec ce montage, il est possible de modifier la fréquence de coupure basse en changeant la valeur des condensateurs C.



**Figure III-9 :** *Filtre passe Haut*

Pour vérifier et tracer les caractéristiques, nous avons utilisé le même montage que pour le préampli. Nous avons fait varier la valeur des condensateurs pour ajuster la bande passante. La figure III-10 représente les caractéristiques pour trois valeurs des condensateurs : 0 (tout le spectre), 0.1 mF (filtre comparable à celui de Barkhausen), 10 nF (filtre passe bande haute fréquence). Dans le paragraphe III-5 "optimisation de l'appareillage de mesure", nous caractériserons les filtres en fonction de tous les paramètres expérimentaux ce qui a permis de choisir définitivement notre filtre.

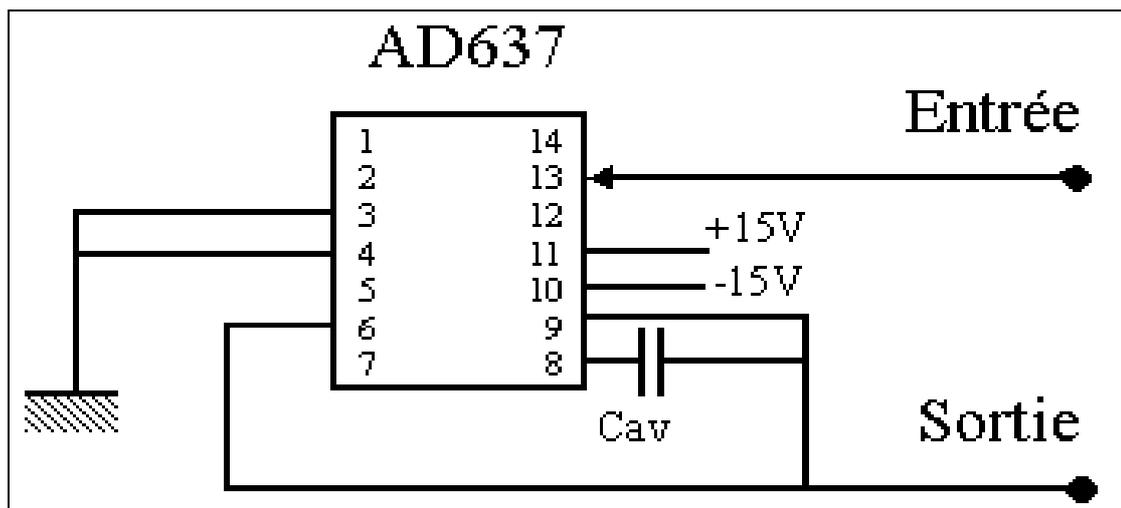


**Figure III-10 :** Caractéristiques de 3 types de filtres

#### 2.2.4 Mesure de la valeur efficace

Après amplification et filtrage, le signal se présente sous la forme d'une tension alternative de l'ordre du volt, de large spectre fréquentiel (Bruit). Nous souhaitons prendre un paramètre plus quantitatif : la valeur efficace ou RMS de ce signal. Nous utilisons un module RMS avec une constante de temps adaptée.

Ceci est fait grâce à un composant analogique de Analog Devices référencé AD 637 AK. Le schéma de montage est présenté sur la figure III-11. Le condensateur  $C_{av}$  permet de régler la constante de temps, nous avons choisi 25 ms d'où un  $C_{av}$  de 1 mF.



**Figure III-11 :** Schéma de câblage de AD 637

### 2.2.5 Acquisition

Nous envisageons de faire des essais de très longues durées (fatigue endurance) et avoir des caractérisations magnétomécaniques nombreuses et plus ou moins rapprochées tout au long de la vie de l'éprouvette, ce qui représente une quantité considérable de données. Un système d'acquisition et d'archivage de données autonome est nécessaire. Nous avons mis en place deux systèmes d'acquisition en parallèle : à partir d'un oscilloscope numérique et au moyen d'une carte d'entrée-sortie couplée à un micro-ordinateur.

#### 2.2.5.1 Oscilloscope numérique

Nous avons utilisé un oscilloscope numérique **Tecktronix 210** qui permet une visualisation et une acquisition en continu de signaux. Il permet de suivre en temps réel l'évolution des signaux et de surveiller certains paramètres de l'appareillage de mesure en particulier la nature du bruit. Il est également utilisé au début de chaque essai pour la mise au point. Ses principales caractéristiques sont :

- Bande passante de 60 MHz.
- Taux d'échantillonnage de 1 Géc/s et longueur d'enregistrement de 2500 points pour chaque voie.
- Ports de communication RS-232.
- Deux voies.
- Stockage de configuration et signaux.
- Moyennage de signaux et détection de crêtes.

#### 2.2.5.2 Carte d'acquisition

Pour l'acquisition numérique, nous avons acquis une carte d'interface multifonctions rapide FASTLAB d'EUROMASTER dont les caractéristiques principales sont ;

- Résolution 12 bits (4096 points) ;
- 8 Voies d'entrées simples ou 4 différentielles (programmables) ;
- Temps de conversion 1.25ms (800KHz) ;
- 16 gains programmables ;
- Impédance d'entrée 10 GOhms // 3pF
- Déclenchement numérique par logiciel, timer ou signal externe (TTL).

Le pilotage s'effectue à l'aide d'un programme que nous avons écrit en Turbo Pascal 6 sur un micro-ordinateur PC.

#### 2.2.5.3 La programmation

Nous avons développé un programme pour gérer l'acquisition et le stockage de données sur le disque dur. En résumé le programme se déroule de la manière suivante :

- ❖ Saisie des paramètres suivants :
  - Calibre : +10 V ;
  - Mode différentiel ou absolu ;
  - Gain par voie ;
  - Pas d'acquisition ;
  - Vitesse de rotation de la machine ;

- Charge à appliquer sur l'éprouvette ;
- Nom de fichier.
- ❖ Déclenchement d'acquisition, défini par le pas d'acquisition ;
- ❖ Acquisition et moyennage de 5000 points sur toutes les voies ;
- ❖ Enregistrement, directement sur le disque dur, des valeurs moyennées dans un fichier sous forme de tableau.

Il est possible d'intervenir à tout moment pour interrompre l'acquisition ou modifier n'importe quel paramètre en particulier le pas d'acquisition.

#### *2.2.5.4 le traitement de données*

Les données stockées sous forme de tableau sont importées et traitées au moyen d'un logiciel de traitement et d'analyse graphiques **Origin Graph 6.1**, qui nous permet en particulier de tracer les évolutions de bruits en fonction du nombre de cycles.

### 3 MOYEN D'EXCITATION MECANIQUE

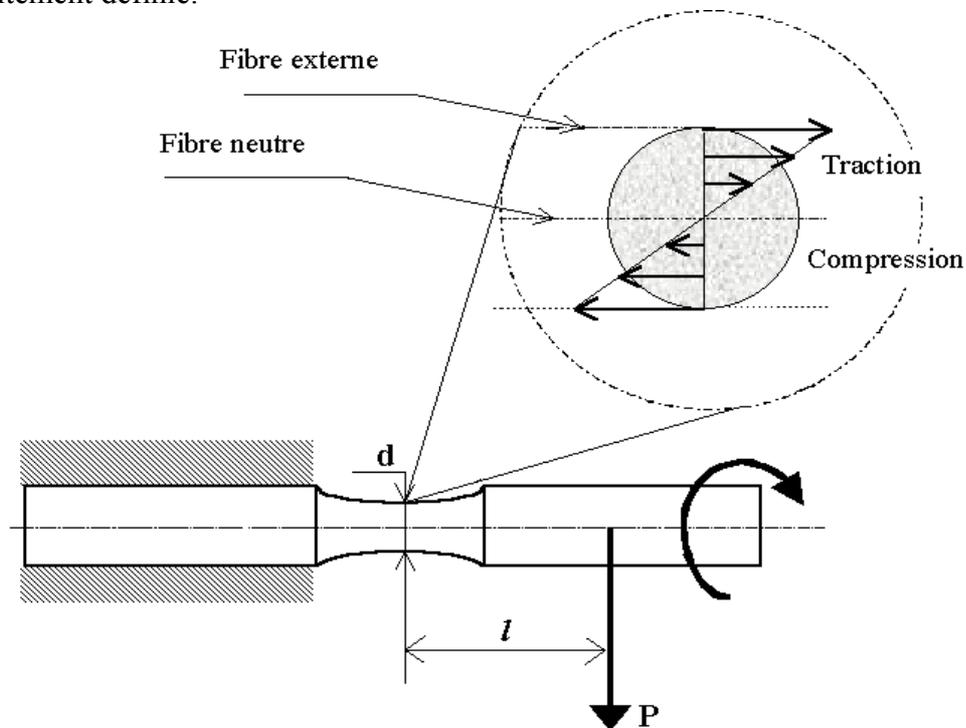
Nous avons décidé de faire la caractérisation in situ au cours de l'essai de la fatigue dans le domaine des grands nombres de cycles (fatigue endurance), donc sous sollicitation rapide et avons par conséquent choisi d'utiliser le moyen classique pour ce type d'essai : la flexion rotative. Dans cette partie, nous décrivons le principe de la flexion rotative et présentons la machine que nous avons construite et le type d'éprouvette utilisé.

#### 3.1 Principe des essais de flexion rotative

L'éprouvette de forme cylindrique est montée encastree à une extrémité (poutre cantilever). La contrainte s'obtient en exerçant un effort de flexion de direction fixe et d'amplitude constante. La fatigue est engendrée par la rotation de la pièce en conservant la flexion de direction fixe. Ainsi, toutes les fibres sauf la fibre neutre, sont successivement tendues puis comprimées. Les sollicitations agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale avec une valeur moyenne nulle. Chaque révolution correspond à une période ou à un cycle de fatigue.

L'effort étant appliqué en un point, le moment de flexion varie linéairement le long de l'éprouvette et est constant pour une section donnée.

Pour les fibres externes qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de la contrainte induite par la flexion est maximale. La vitesse de rotation étant maintenue rigoureusement constante pendant toute la durée de l'essai, la fréquence de sollicitation sera donc parfaitement définie.



**Figure III-12 :** Flexion rotative et répartition des contraintes dans la section utile de l'éprouvette

L'éprouvette présente un amincissement permettant de localiser la zone fatiguée. Cf. paragraphe 3.3.

La contrainte dans une fibre se calcule par la formule de Navier :

$$s = \frac{M}{I} n$$

$M$  : moment fléchissant par rapport à la section considérée  $M=Fl$

$F$  : charge appliquée ;

$l$  : distance de l'axe d'application de la charge à la section considérée ;

$I = \frac{\rho d^4}{64}$  : moment d'inertie d'une section circulaire par rapport à l'axe neutre ;

$n$  : distance de la fibre neutre à la fibre considérée ;

$d$  : diamètre de la section considérée ;

Pour la fibre externe  $n = \frac{d}{2}$ , la contrainte maximale s'écrit alors :

$$s = \frac{32l}{\rho d^3} F \quad \text{soit} \quad s = kF \quad (1)$$

Dans notre cas,  $l = 86 \text{ mm}$  ;  $d = 10 \text{ mm}$  soit  $k = 81,39 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ .

## 3.2 Machine de flexion rotative

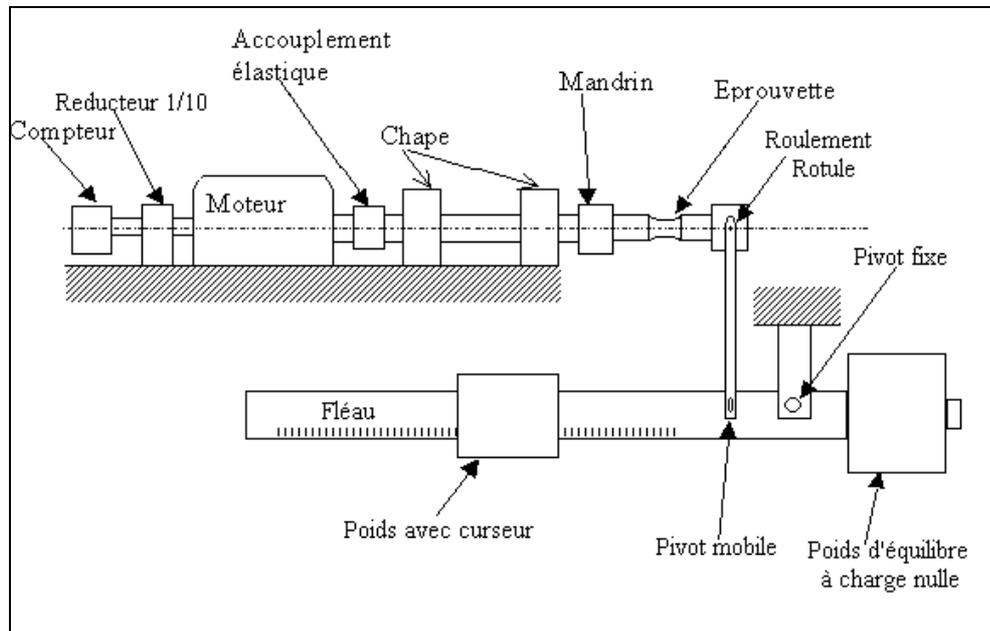
Partant d'un modèle existant à l'INSA et après avoir apporté certaines modifications aux plans, nous avons confié la réalisation de notre machine au Centre d'Etude et de Réalisation des Prototypes (CEREP) de l'INSA, puis elle a été transportée à N'Djaména où se sont déroulés les essais.

### 3.2.1 Principe

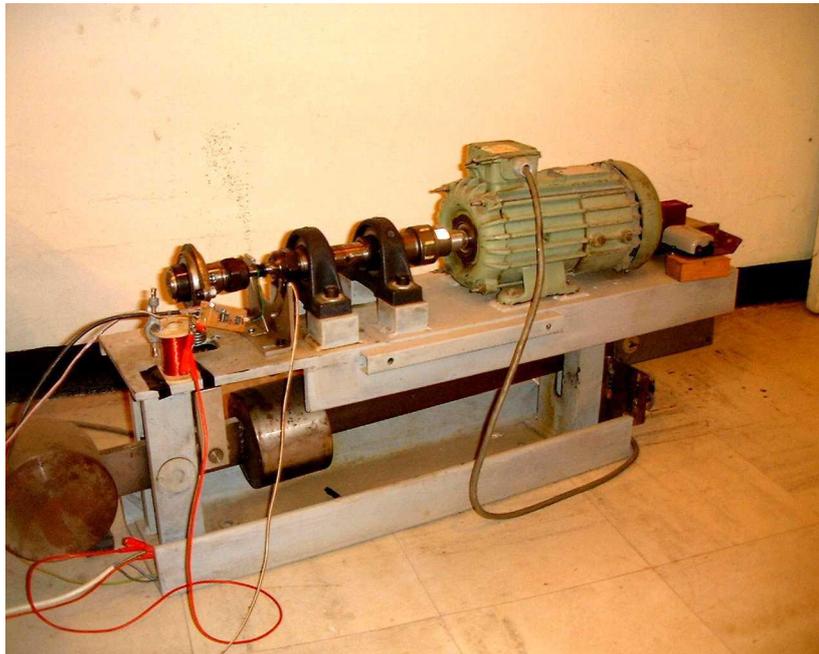
L'entraînement est assuré par un moteur asservi à vitesse variable allant de 0 à 3000 tr/mn relié à l'arbre porte pièce par un accouplement élastique. Un compteur mécanique à huit chiffres associé à un réducteur de 1/10 permet de suivre le nombre de tours. Un système de type «balance romaine» avec poids et curseur permet, tout en étant assez compact et léger d'appliquer des charges de 0 à 600 N. Cet effort est communiqué à l'éprouvette au moyen d'une chape montée sur un roulement à billes à rotule, permettant d'obtenir ainsi un axe d'application rigoureusement vertical, en dépit de la flexion de l'éprouvette.

Le système s'arrête automatiquement à la rupture de l'éprouvette.

Dans ce type de machine l'application de l'effort est mécanique (poids suspendu), il est donc indépendant des coupures éventuelles d'électricité très fréquentes dans notre pays (plusieurs fois par jours) ce qui permet de ne pas introduire de discontinuité dans le chargement. Seule la rotation sera interrompue.



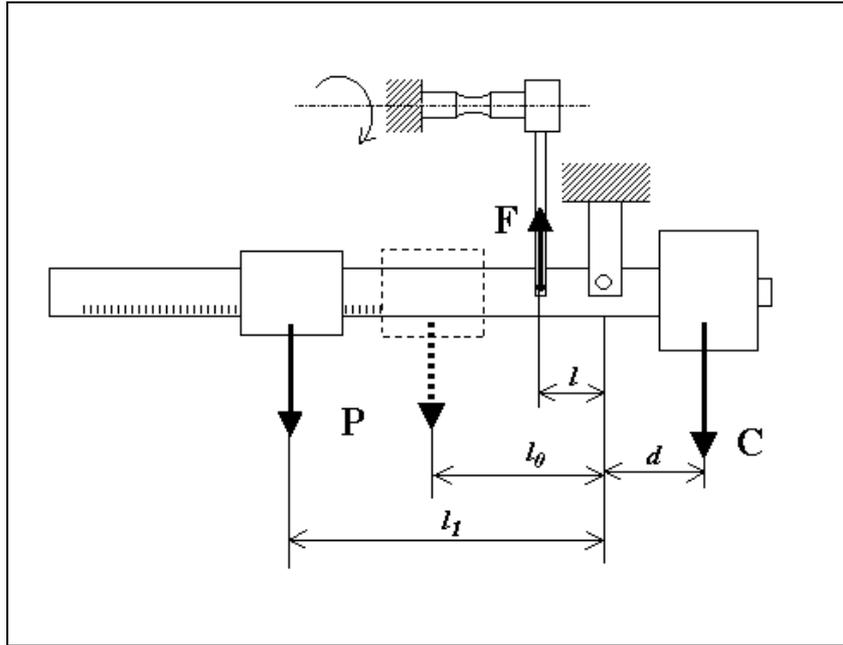
**Figure III-13** : Schéma simplifié de la machine de flexion



**Photo III-1** : Machine de flexion rotative

### 3.2.2 Etalonnage

Nous avons procédé à l'étalonnage de la machine afin de connaître, en fonction de la position du poids curseur, la force réelle  $F$  qui s'exerce sur l'éprouvette.



**Figure III-14 :** *Equilibre des forces*

Traduisons l'équilibre des moments au niveau du fléau (pivot fixe).

A l'équilibre  $F$  est nulle donc  $P \cdot l_0 = d \cdot C$ . L'équilibre est obtenu par le réglage de la distance  $d$ .

Pour obtenir une force  $F$  sur l'éprouvette, le poids  $P$  est décalé.  $P$  en position  $l_1$ , nous avons donc :  $P \cdot l_1 - F \cdot l = C \cdot d = P \cdot l_0$

D'où  $F = \frac{P(l_1 - l_0)}{l}$  avec  $P = 100 \text{ N}$ ,  $l = 60 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 160 \text{ mm}$ .

**Tableau III- 1 :** *valeurs de la charge appliquée sur l'éprouvette et la contrainte résultante en fonction de la position du curseur*

Repère	Position( $l_1 - l_0$ )	Valeur $F$ (N)	Contrainte maxi pour une éprouvette de $\varnothing 10 \text{ mm}$ (MPa)
1	30	50	41
2	60	100	81
3	90	150	122
4	120	200	163
5	150	250	203
6	180	300	244
7	210	350	285
8	240	400	326
9	270	450	366
10	300	500	407
11	330	550	448
12	360	600	488

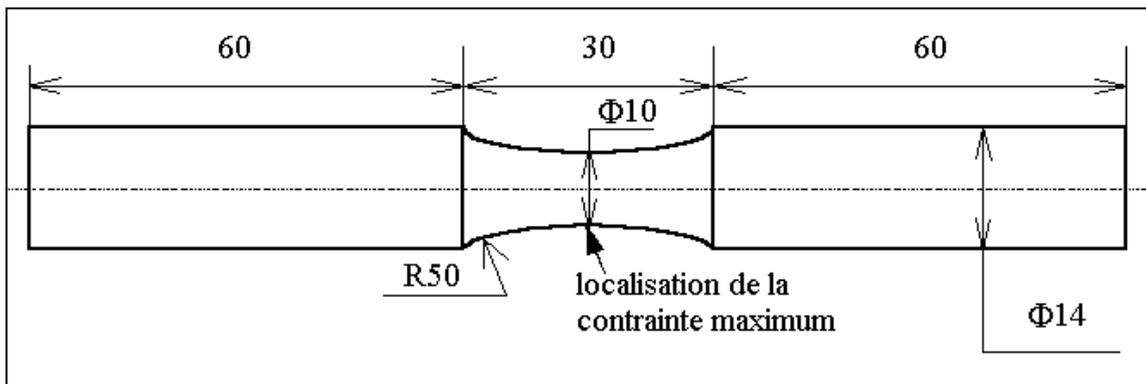
Nous signalons que dans ce tableau ne sont présentés que les repères principaux. Il y a des repères secondaires qui permettent d'avoir des valeurs intermédiaires de contraintes.

### 3.3 Epreuves

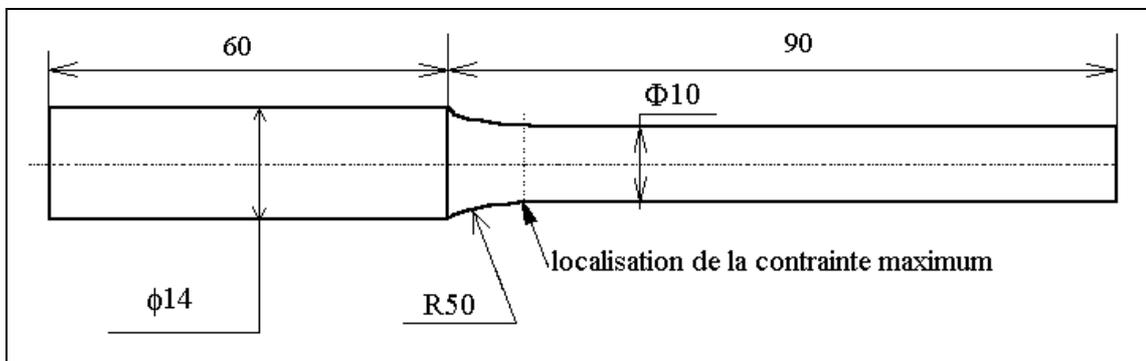
La forme de l'éprouvette doit essentiellement satisfaire aux conditions géométriques requises pour un essai de fatigue. De plus elle ne doit pas comporter de singularités conduisant à une localisation de l'endommagement. La plupart des ruptures par fatigue s'amorcent à la surface, la résistance à la fatigue peut être fortement influencée par l'état de surface.

Deux sortes d'éprouvettes de flexion rotative sont utilisées : une éprouvette de révolution avec une gorge de forme toroïdale à grand rayon (Fig. III-15), permettant de localiser la rupture et l'autre de forme cylindrique (Fig. III-16) avec un congé à grand rayon de raccordement. Ce deuxième type d'éprouvette permet l'utilisation d'un capteur unique (bobine encerclante).

L'usinage des éprouvettes a été soigné. La gamme de fabrication comprend : tournage, rectification de la partie utile, traitement de recuit sous vide, puis la partie utile est soigneusement et légèrement polie au papier abrasif fin (1200) sur la machine elle-même. Cette préparation a pour but de réduire les risques d'amorçages parasites dans les rayures.



**Figure III-15 :** *Éprouvette de forme toroïdale.*



**Figure III-16 :** *Éprouvette de forme cylindrique à grand rayon de raccordement.*

## 4 MATERIAUX CONSTITUANT LES EPROUVETTES

Nous souhaitons réaliser notre étude sur des matériaux dont les microstructures cristallines et magnétiques sont simples et bien connues. Nous avons choisi un matériau monophasé ferritique (fer pur) et matériau monoconstituant dur (perlite).

Pour la ferrite, notre choix s'est porté sur le fer ARMCO ; c'est un fer pratiquement pur et relativement peu onéreux. S'agissant de la perlite, nous avons opté pour un XC55. Cette nuance a été étudiée dans le Laboratoire dans le cadre du Bruit Barkhausen classique.

### 4.1 Fer Armco

#### 4.1.1 Analyse chimique

Le matériau utilisé est un fer pur commercial à 99.75%, obtenu à partir de ferrailles par affinage au four Martin après dégazage sous vide, ce qui permet d'éliminer les impuretés. Il est livré sous forme de barres rondes de diamètre 16 mm. Les concentrations en impuretés sont indiquées dans le tableau suivant :

**Tableau III-2 :** *Pourcentage en atome des éléments de composition*

Elément	C	Mn	P	S	Cu	N	Si
(%)	0,010	0,060	0,009	0,007	0,015	0,004	traces

Le traitement thermique de recuit a pour but de réaliser l'équilibre structural et de faire disparaître les contraintes résultant de l'étirage et de l'usinage.

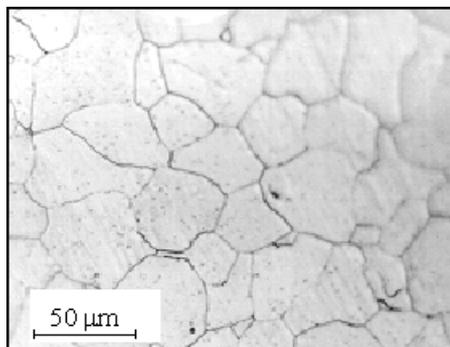
Le cycle de traitement sous vide comporte :

- Chauffage sous vide jusqu'à une température de recuit 950°C ;
- Maintien isotherme pendant 10 minutes ;
- Refroidissement lent.

Ce traitement a été réalisé par la Société VIDEXPRESS à Villeurbanne.

#### 4.1.2 Micrographie optique

Nous avons effectué plusieurs prélèvements pour vérifier l'homogénéité du produit après recuit. L'échantillon est poli mécaniquement puis attaqué au nital, nous avons fait des observations optiques (microscope Zeiss Axiophot) avec utilisation de plaques photographiques à développement rapide. Ensuite les photos sont numérisées.



**Photo III-2 :** *Observation du fer Armco*

Nous observons sur la photo III-2 une structure granulaire homogène de ferrite à basse teneur en carbone la taille moyenne des grains est de l'ordre de : 60  $\mu$ m.

#### 4.1.3 Propriétés mécaniques

Nous avons également relevé les propriétés mécaniques conventionnelles :

$R_{0,02}$ :	197 MPa	limite élastique conventionnelle ;
$R_m$ :	325 MPa	contrainte maximale ;
$A\%$ :	40	Allongement à la rupture ;
$HB$ :	96	Dureté Brinell

Du fait de son assez bonne pureté, le fer ARMCO constitue un matériau modèle vis-à-vis des matériaux complexes tels que les aciers industriels. L'essentiel de notre étude a été mené sur ce matériau.

## 4.2 Acier XC55

### 4.2.1 Analyse Chimique

C'est un acier élaboré au four Martin à partir des ferrailles et de fonte fondue, avec une addition d'oxyde de fer pour oxyder le carbone en excès. Il est fourni sous forme de barre de diamètre 25 mm. Les échantillons après usinage ont subi un traitement de recuit d'homogénéisation. Ce traitement a été réalisé au Laboratoire GEMPPM.

Le mode opératoire est le suivant : austénisation à 850°C pendant 30 minutes sous atmosphère neutre (azote hydrogéné) suivi d'un refroidissement lent dans le four.

**Tableau III-3 :** Pourcentages en masse des éléments d'additions (valeurs données par le fournisseur)

Elément	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Si
(%)	0,54	0,7	0,03	0,015	0,52	0,24	0,35

### 4.2.2 Micrographie



Nous avons procédé de la même manière que pour le fer ARMCO, pour obtenir les observations optiques de la microstructure.

Nous distinguons bien sur la photo une structure biphasée. La microstructure de XC55 recuit est de type perlite et ferrite avec près de 70% de perlite sous forme lamellaire.

**Photo III-3 :** Observation de XC55

### 4.2.3 Propriétés mécaniques

$R_{0,02}$ :	380 MPa	limite élastique conventionnelle ;
$R_m$ :	725 MPa	contrainte maximale ;
$A\%$ :	15	Allongement à la rupture.

## 5 OPTIMISATION DES PARAMETRES DE MESURE

Nous rappelons que le bruit magnétomécanique résulte de la réorganisation des domaines magnétiques sous l'action d'une contrainte variable. Son amplitude mesurée par la bobine encerclante est de quelques mV. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, paragraphe 2, une chaîne de mesure appropriée a été construite pour saisir cette information et la conditionner pour la rendre exploitable. Le signal obtenu correspond en fait à la superposition de plusieurs signaux. En effet sur celui désiré viennent s'ajouter des éléments parasites "bruits" provenant de certains éléments de la chaîne électronique et de la machine. C'est pourquoi, il est nécessaire de bien connaître la contribution de chaque maillon et à partir de là, de minimiser leurs influences pour optimiser la mesure.

Par conséquent, il y a lieu de s'affranchir de l'influence de certains facteurs tels que les problèmes de masse et de bien choisir la plage de fréquence.

### 5.1 Les masses

Les problèmes de masses étant très pénalisants en termes de mesure, nous avons particulièrement pris des précautions. Tous les appareils constituant notre dispositif ont été isolés de la terre du secteur. Nous avons réalisé une prise de terre spécifique de bonne qualité, uniquement utilisée pour notre étude. Nous avons choisi le montage étoile avec le point central près de l'éprouvette, de la bobine capteur et du préampli. Tous les autres appareils sont connectés à ce point de masse. Ce qui nous a permis de réduire très sensiblement les perturbations induites par les boucles de masses.

### 5.2 Choix du filtre (optimisation du rapport signal/bruit)

Le but du filtre est d'optimiser le rapport signal utile bruit. Nous rappelons que le bruit magnétomécanique est un signal présentant un large spectre de fréquences. Il y a lieu de choisir une gamme de mesure dans une plage où le bruit résultant des appareillages et de l'environnement magnétique (ondes radio, ordinateurs, ...) est petit devant celui représentant le phénomène magnétomécanique.

#### 5.2.1 Origine du bruit

La mesure du bruit peut se décomposer en trois parties :

- **le bruit électronique** : il correspond au signal mesuré avec tous les dispositifs électroniques branchés mais sans sollicitation mécanique : la machine de fatigue (moteur) arrêtée et aucune charge appliquée à l'éprouvette.
- **le bruit dynamique** : le moteur est mis en marche mais l'éprouvette n'est toujours pas chargée.
- **le signal total** : l'éprouvette tourne avec sa charge.

Afin de tester notre équipement nous nous sommes placé dans des conditions correspondant à un essai "moyen".

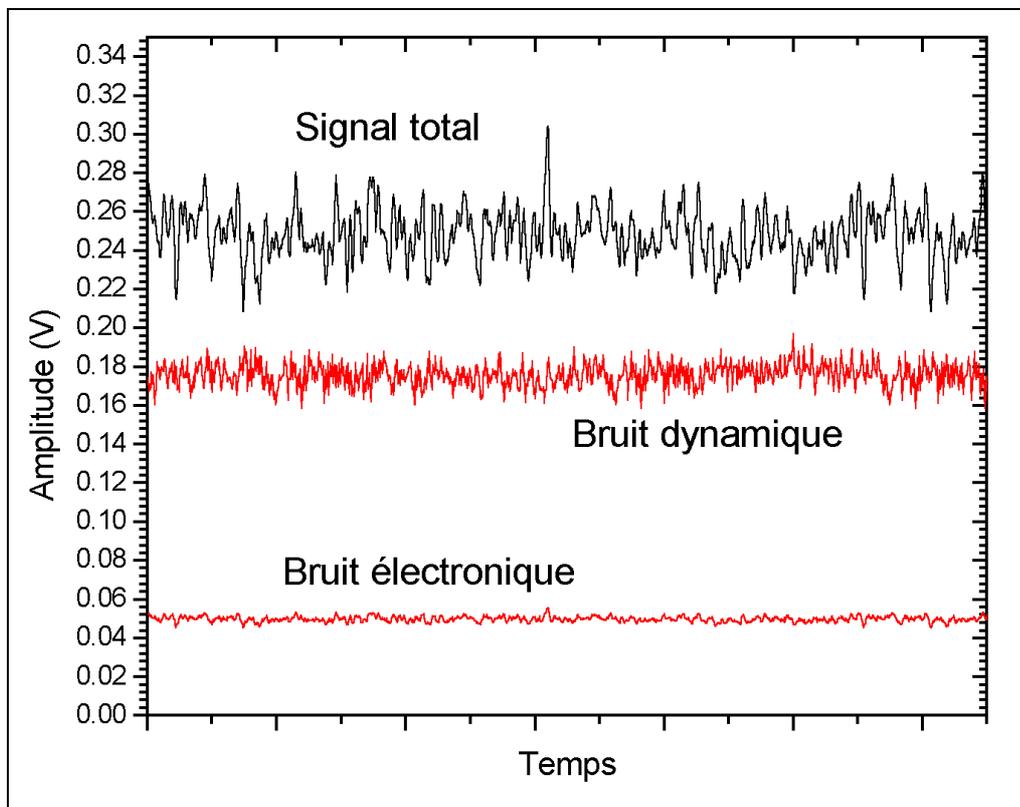
### 5.2.2 Etude des bruits

Le tableau suivant résume les conditions expérimentales et les caractéristiques des filtres décrits au paragraphe 2.2.3.

**Tableau III-4** : conditions expérimentales pour l'étude des bruits

<b>Excitation mécanique</b>	
Charge	190 MPa (limite de fatigue)
Vitesse de rotation	1000 tr/mn
<b>Mesure du signal magnéto-mécanique</b>	
Capteur	Type : bobine encerclante Nombre de spires : 150 $r$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : 110
Ampli Filtre 1	Gain : 100 Du continu à 1 MHz (large bande)
Ampli Filtre 2	Gain : 100 De 1Khz à 1MHz (type mesure Barkhausen)
Ampli Filtre 3	Gain 100 De 100 kHz à 1 MHz (haute fréquence)
Module RMS	Constante de temps : 25 ms

La figure III-17 représente un exemple de différents bruits acquis en utilisant le filtre 2 du type Barkhausen.



**Figure III-17:** Exemple de bruits mesurés sur l'oscilloscope avec le filtre type Barkhausen

Le signal total est la somme des bruits vus précédemment plus le signal magnétomécanique, le bruit dynamique représente une proportion importante, en un mot, le rapport signal magnétomécanique sur bruit n'est pas très favorable.

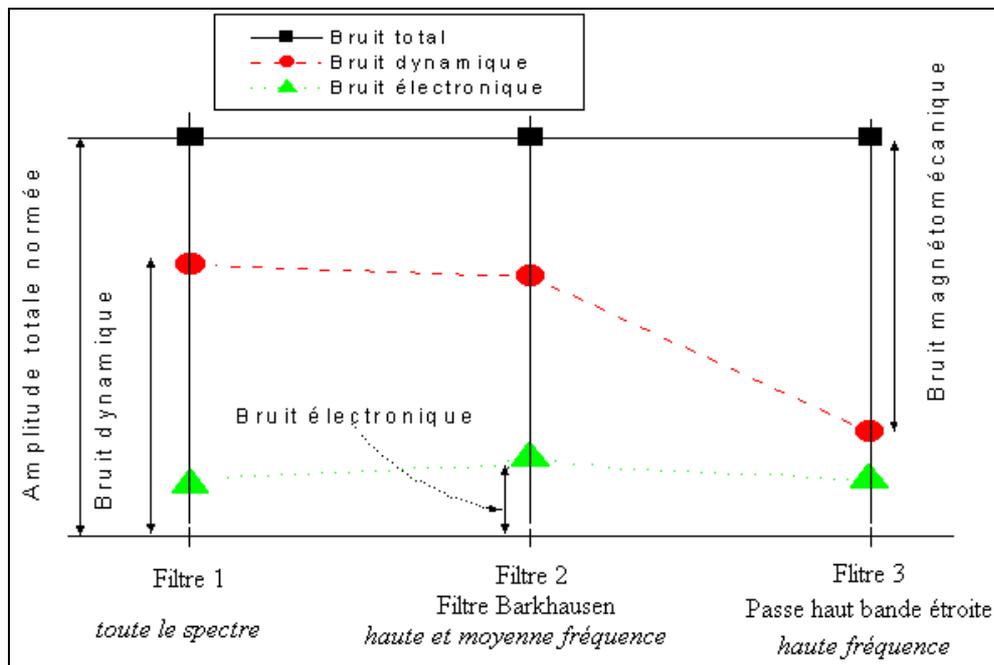
C'est pourquoi nous avons réalisé et testé trois filtres, les caractéristiques ont été données au paragraphe 2.2.3 fig.III-10 de ce Chapitre. Nous les avons montés en parallèle pour acquérir simultanément les signaux issus de chacun d'eux. Dans la première voie, nous prenons tout le spectre du signal, c'est-à-dire que le filtre ne présente pas de fréquence de coupure basse, uniquement une coupure haute vers 1 MHz. Dans le deuxième cas, nous utilisons le filtre type Barkhausen qui élimine les basses fréquences. Dans la troisième voie, nous utilisons un filtre passe bande (haute fréquence) allant de 100 KHz jusqu'à 1MHz.

Ces expériences ont été refaites plusieurs fois et les résultats obtenus restent concordants. Le dispositif est d'une reproductibilité appréciable. En déchargeant et/ou en arrêtant le moteur, nous retombons pratiquement sur les valeurs initiales.

Il faut rappeler que ces mesures sont faites avec une bobine encerclante et représentent une valeur moyennée du phénomène tout autour de l'éprouvette.

**Tableau III-5 :** Valeurs efficaces et pourcentage des bruits pour les différents filtres

	Large spectre		Filtre type Barkhausen		Filtre haute fréquence	
	efficace	%	efficace	%	efficace	%
<i>Signal brut</i>	2.50	100%	0.270	100%	0.150	100%
<i>Bruit électronique</i>	0.34	14%	0.052	19%	0.022	15%
<i>Bruit dynamique</i>	1.70	68%	0.180	67%	0.040	27%
<i>Bruit magnétomécanique</i>	0.80	32%	0.090	33%	0.110	73%



**Figure III-18:** Rapport signal/bruit pour les trois filtres

**Le filtre large spectre** est intéressant car nous sommes certain de mesurer tout le phénomène, mais nous mesurons aussi tous les parasites en particulier le 50Hz et ses harmoniques. Dans ce cas, le signal total est important (2,5V) le bruit dynamique à lui seul représente 68 % du signal total et le bruit électronique contribue à la hauteur de 14%. Ce qui veut dire que le bruit engendré par le moteur électrique est prépondérant.

**Le filtre type Barkhausen** correspond à un compromis bien adapté à cette mesure mais qui manifestement n'apporte pas un avantage particulier. Dans notre cas, le signal global est 10 fois plus faible et le rapport signal sur bruit n'est pas meilleur que pour le filtre large spectre.

**Le filtre haute fréquence** donne un signal global évidemment beaucoup plus petit (0,15V) avec un signal utile du même ordre de grandeur que pour le filtre type Barkhausen. Dans ce cas le rapport signal sur bruit est de l'ordre de 70% ce qui semble très honorable.

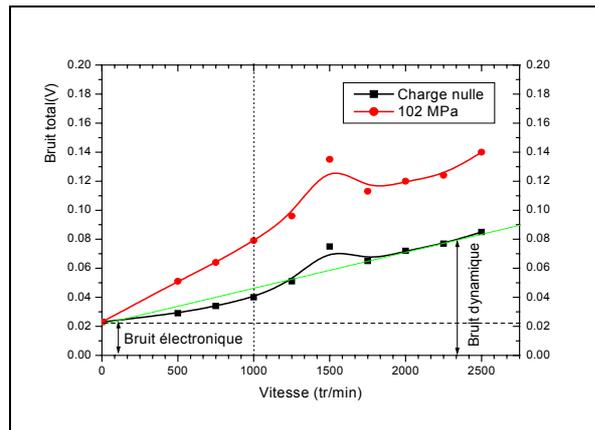
En conclusion :

- Le bruit magnétomécanique présente donc une composante importante dans la gamme 100 KHZ 1MHZ. Comme il est indiqué dans la bibliographie plus le signal est haute fréquence, plus il provient des couches de surface. Cette remarque est importante dans notre cas, car la contrainte varie avec la profondeur.
- Il nous semble donc tout à fait légitime de considérer que le signal correspond aux couches de surface et que pour une faible profondeur (quelques centièmes de mm) la contrainte est homogène et égale à celle mesurée ou calculée en surface.
- Pour la suite de la caractérisation nous utilisons ce filtre qui semble bien adapté aux mesures envisagées. A chaque essai ou reprise d'essai, les différents bruits sont systématiquement mesurés. Si nous constatons une différence de leur amplitude moyenne, nous reprenons l'essai. ce qui correspond à un gage de reproductibilité. Le signal présenté dans les différents essais correspond à la partie utile du signal c'est à dire au signal total moins le bruit dynamique.

### 5.3 Influence de la vitesse de rotation sur le bruit

Pour déterminer la vitesse de rotation optimale, nous avons mesuré l'évolution du bruit pour différentes vitesses de rotation. D'abord nous effectuons l'essai à vide c'est -à- dire que nous mesurons uniquement le bruit dynamique, puis nous appliquons une charge et suivons l'évolution du signal pour des vitesses de rotation croissantes.

La figure III-19 représente le bruit mesuré en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le signal augmente linéairement sauf à 1500 tr/mn, où il existe une singularité que l'on retrouve quelle que soit la charge. Cette perturbation provient probablement des harmoniques de 50 Hz.



**Figure III-19 :** *Bruit total en fonction de la vitesse de rotation*

Il convient donc d'éviter cette vitesse. Nous pouvons choisir soit une vitesse inférieure à 1500 tr/mn soit supérieure. Nous avons choisi 1000 tr/mn pour la suite de notre travail.

#### 5.4 Ultime vérification

Compte tenu de l'apport important de bruit lié au moteur, nous nous sommes posé la question de savoir si nous mesurons réellement le bruit magnétomécanique et non pas un artefact lié au moteur.

Pour vérifier et évaluer la réelle influence du moteur, nous l'avons désaccouplé du dispositif. Afin de générer une rotation de l'éprouvette sans introduire de bruit électrique, nous avons utilisé le principe du lanceur à ficelle. Une ficelle fine a été enroulée autour de l'arbre d'entraînement puis déroulée en tirant progressivement à vitesse la plus constante possible. A notre grande satisfaction, nous avons obtenu une augmentation du signal de 100 mV en valeur efficace.

*Nous mesurons bien un signal d'origine magnétomécanique avec un rapport signal sur bruit de l'ordre de 70% pour du fer pur.*

## 6 CONCLUSION

Après avoir analysé l'appareillage Barkhausen et bénéficié de l'expérience acquise dans ce domaine par notre laboratoire, nous avons entièrement construit une chaîne d'acquisition performante spécifique du bruit magnétomécanique. Pour la partie excitation mécanique, nous avons choisi la flexion rotative. Après avoir exposé le principe, nous avons décrit notre machine de flexion rotative. Ensuite, les matériaux et les éprouvettes utilisés ont été présentés.

En dernier lieu, pour optimiser les mesures, nous avons caractérisé chaque maillon de la chaîne et déduit les meilleurs paramètres expérimentaux.

Avec ce dispositif, nous sommes capable de faire la caractérisation en fatigue avec une reproductibilité satisfaisante.



# Chapitre V

## Approche numérique du bruit magnétomécanique



# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>155</b>
<b>2</b>	<b>MODÉLISATIONS ANTÉRIEURES DÉVELOPPÉES DANS NOTRE LABORATOIRE.....</b>	<b>156</b>
2.1	MODELE DE C. GATELIER [3] ET J. CATTY [4] .....	156
2.2	MODELE DE X. KLEBER [63] .....	156
<b>3</b>	<b>CAS DU MAGNETOMECHANIQUE : LES ENERGIES .....</b>	<b>157</b>
3.1	ENERGIE MAGNETOSTATIQUE .....	158
3.2	ENERGIE ELASTIQUE EMMAGASINEE, DUE AUX REGIONS DEFORMEES .....	162
3.3	ENERGIE DES PAROIS .....	163
3.4	CONCLUSION .....	165
<b>4</b>	<b>PRÉSENTATION DU MODÈLE ET DES HYPOTHÈSES.....</b>	<b>166</b>
4.1	FORCE DE RAPPEL .....	166
4.2	FORCE MOTRICE.....	166
4.3	ANCRAGES.....	166
4.4	RESUME DES HYPOTHESES DE NOTRE MODELE .....	167
4.5	APPLICATION DU MODELE.....	168
4.5.1	<i>Calculs préliminaires</i> .....	168
4.5.2	<i>Programme principal</i> .....	168
4.5.3	<i>Résultat type</i> .....	169
4.6	RESULTATS ET ANALYSES .....	170
4.6.1	<i>Reconstitution d'un signal magnéto-mécanique</i> .....	170
4.6.2	<i>Influence de l'amplitude des ancrages</i> .....	172
4.6.3	<i>Influence du nombre d'ancrages</i> .....	173
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE CE MODELE .....</b>	<b>174</b>



## 1 INTRODUCTION

Rappelons que, s'il est possible d'utiliser le bruit magnétomécanique ou le bruit Barkhausen dans des procédés de contrôle non destructif, c'est en raison de l'interaction entre la microstructure cristalline et la microstructure magnétique. Dans le cas du bruit magnétomécanique, la contrainte appliquée provoque le déplacement de parois de Bloch (principalement des parois à  $90^\circ$ ). Ces déplacements sont freinés par les imperfections de la microstructure cristalline (joints de grains, précipités, atomes en solutions, dislocations, etc.) qui constituent autant d'ancrages plus ou moins efficaces et plus ou moins stables. Il serait intéressant de pouvoir disposer d'un outil informatique permettant de modéliser le phénomène ancrage/déancrage afin d'appréhender les influences relatives, d'une part des paramètres microstructuraux (nature et nombre des ancrages), d'autre part des paramètres expérimentaux (amplitude et mode d'application de la contrainte).

Nous n'aborderons pas dans ce chapitre le passage du phénomène physique au signal électrique mesuré. Nous considérons simplement que le déplacement d'une paroi provoque une variation locale de l'aimantation qui se traduit par un « pulse » électrique aux bornes de la bobine capteur. Nous admettons implicitement qu'il y a proportionnalité entre l'amplitude du « pulse » et le volume balayé par la paroi. Le signal final étant la somme de tous les « pulses ».

Partant d'un modèle développé dans notre laboratoire pour simuler le Bruit Barkhausen, nous avons cherché à identifier les importances relatives des différentes énergies intervenant dans l'équilibre de la microstructure magnétique. Nous proposons ensuite une simplification de la microstructure magnétique pour aboutir à un modèle à une seule dimension qui traduit le déplacement d'une paroi dans un cristal parsemé d'ancrages. Dans ce cas, la position de la paroi est déterminée par l'équilibre entre : une force motrice qui est reliée la contrainte appliquée, une force de rappel qui tend à ramener la structure magnétique dans son état initial (terme lié à l'énergie magnétostatique) et une force d'ancrage liée aux obstacles.

Cette modélisation nous permet de remonter à une signature assez représentative du bruit magnétomécanique tel que nous l'obtenons expérimentalement. Nous présentons enfin l'influence de quelques paramètres : l'amplitude maximale de la contrainte appliquée, le nombre d'ancrages, l'efficacité des ancrages.

## 2 MODÉLISATIONS ANTÉRIEURES DÉVELOPPÉES DANS NOTRE LABORATOIRE

### 2.1 MODELE DE C. GATELIER [3] ET J. CATTY [4]

Cette modélisation a pour but de comprendre les phénomènes d'aimantation et de magnétostriction lors de l'application d'un champ magnétique et/ou d'une contrainte. Le modèle est basé sur la minimisation de l'enthalpie libre du système. Seulement deux énergies liées au matériau sont prises en compte (l'énergie magnétoélastique et l'énergie d'anisotropie cristalline). Le calcul revient à chercher le minimum d'énergie quand on introduit une énergie extérieure due à l'application d'un champ magnétique ou d'une contrainte.

Le calcul porte, dans un premier temps, sur un monocristal monodomaine (maille cristalline). On recherche la direction d'aimantation la plus favorable pour laquelle l'enthalpie est minimum. Puis le calcul est étendu à un polycristal, constitué de 96 monocristaux monodomains. Au départ, pour chaque monodomaine, l'aimantation est dirigée suivant la direction cristallographique de facile aimantation [100]. Pour un champ appliqué donné, le minimum d'enthalpie est calculé. On en déduit une aimantation et une déformation moyennes résultantes. Il est alors possible de remonter à la courbe de magnétostriction et à la dérivée de l'aimantation en fonction du champ. Les courbes obtenues pour différents champs ou états de contrainte sont en plus ou moins bon accord avec l'expérience.

Ce modèle est très intéressant en raison du calcul des énergies et rend assez bien compte de la microstructure magnétique de base, mais il ne prend pas en compte d'une part l'énergie magnétostatique qui nous semble très importante, car c'est elle qui est responsable de l'existence même des domaines, ni les défauts responsables de l'aspect discontinu de la magnétisation qui provoque le bruit magnétique.

### 2.2 MODELE DE X. KLEBER [63]

Ce modèle est fondamentalement différent et vise à reproduire un bruit magnétique. Que ce bruit soit d'origine magnétique (bruit Barkhausen), ou d'origine mécanique (bruit magnétomécanique), il provient des mouvements discontinus des parois de Bloch accrochées à des ancrages plus ou moins forts. Dans cet esprit, X.KLEBER a développé un modèle assez simple prenant en compte un ensemble de parois à  $180^\circ$  en mouvement dans un matériau parsemé d'ancrages plus ou moins forts. Le problème est traité en termes d'équilibre de forces au niveau de chaque paroi. Chacune est soumise à une force motrice qui tend à la déplacer (le champ magnétique appliqué  $H$ ), une force de rappel liée à l'énergie magnétostatique qui tend à reconstituer la structure initiale et une force d'ancrage que la paroi doit vaincre pour s'arracher à l'obstacle.

Les parois n'étant pas indépendantes, l'équilibre est calculé au moyen d'un algorithme de simulation de Monté-Carlo. En faisant croître le champ  $H$  appliqué, différents états d'équilibre métastables successifs sont trouvés correspondant à des variations brutales de l'aimantation du matériau donc à un bruit.

Ce modèle part des hypothèses suivantes :

- Le modèle est unidimensionnel, axe  $OX$  (sens de déplacement des parois). Il concerne un seul cristal en cours de magnétisation qui comporte plusieurs domaines et de multiples ancrages.

- Les domaines sont séparés par des parois planes rigides, perpendiculaires à l'axe OX. Les directions de magnétisation des domaines contigus sont opposées (parois à 180°), l'excitation (H) est parallèle aux parois et perpendiculaire à la direction de déplacement OX. Le nombre de parois est fixé au départ. Elles sont réparties aléatoirement dans le cristal. Elles sont toutes accrochées à un ancrage (elles ne peuvent pas rester entre deux ancrages).
- Les ancrages sont fixes, répartis aléatoirement (sur la direction OX). Ils sont en plus grand nombre que les parois. Un ancrage fonctionne en tout ou rien, chacun disposant d'une force d'ancrage constante dans le temps mais d'amplitude aléatoire gaussienne. La force d'ancrage est la même, que la paroi se déplace dans un sens ou dans l'autre.

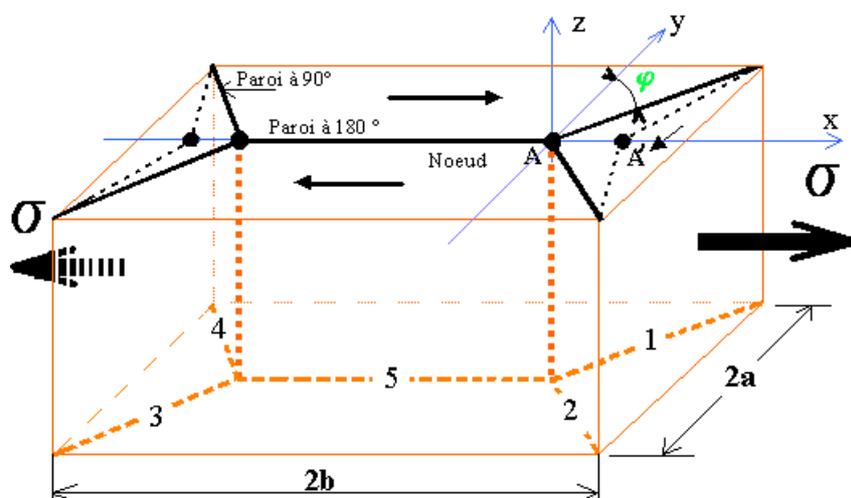
En utilisant ce modèle, KLEBER a pu reconstituer : d'une part un signal Barkhausen, d'autre part un cycle avec hystérésis et une courbe de première magnétisation. Il a fait ensuite varier les paramètres des ancrages (beaucoup de petits ancrages de faible efficacité ou de plus ancrants mais moins nombreux). Les résultats obtenus sont conformes à ceux trouvés expérimentalement.

### 3 CAS DU MAGNETOMECHANIQUE : LES ENERGIES

Dans le même esprit, nous avons cherché à développer un modèle de bruit magnétomécanique, c'est-à-dire simuler les mouvements de parois sous une excitation mécanique.

Dans ce cas, les parois en mouvement sont celles à 90°, l'effet moteur est lié à la contrainte appliquée, la force de rappel peut être liée à plusieurs causes : modification de l'énergie magnétostatique, modification de l'énergie magnétoélastique induite par modification de dimension dans la direction considérée, énergie de parois due à la modification de la longueur des parois à 90° et à 180°.

Nous avons dans un premier temps été conduit à choisir un petit volume de matière élémentaire représentatif cf. figure V-1, puis pour ce volume, à estimer les variations des différentes énergies consécutives à un déplacement de parois à 90°.



**Figure V-1** : Volume élémentaire quadridomaine

Pour le calcul nous avons utilisé les grandeurs suivantes :

- $a$  : demi-largeur du cristal
- $b$  : demi-longueur du cristal
- $j$  : angle des parois à  $90^\circ$  avec la direction AY
- $l$  : longueur commune des parois à  $90^\circ$ , variable suivant  $j$
- $x$  : abscisse du point A
- $I_s$  : aimantation à saturation dans la direction de facile aimantation de la matière considérée.
- Quatre parois à  $90^\circ$  ; numérotées de 1 à 4
- Une paroi à  $180^\circ$  ; repérée 5

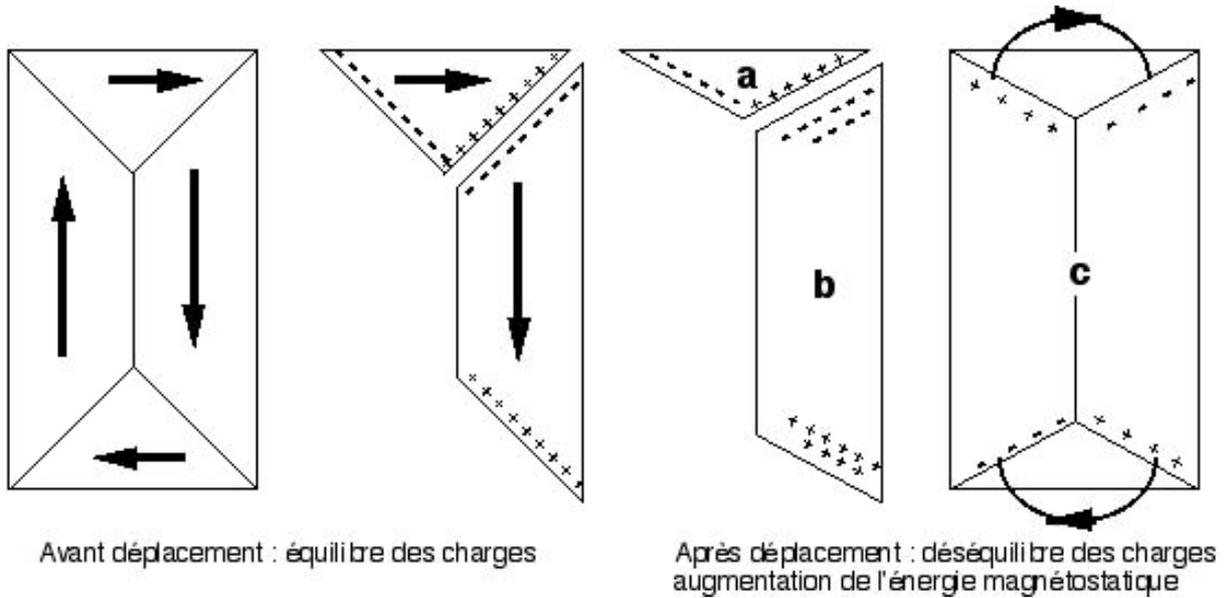
En l'absence de contrainte, pour ce modèle à l'équilibre, on a :  $j = \frac{\pi}{4}$  et  $x = 0$ , ce qui correspond à une énergie magnétostatique nulle.

Si une contrainte de traction est appliquée suivant la direction AX, les parois à  $90^\circ$  vont se déplacer ; il correspondra à une nouvelle position d'équilibre A' d'abscisse ( $x$ ) et un angle

$$j < \frac{\pi}{4}.$$

### 3.1 ENERGIE MAGNETOSTATIQUE

Le déplacement des parois entraîne des perturbations locales de l'aimantation. Cette dispersion (ou les discontinuités d'aimantation sur les surfaces des domaines) crée des pôles magnétiques fictifs qui sont à l'origine d'un champ démagnétisant  $H_d$ . Le déplacement des parois induit donc une densité de pôles équivalents à la magnétisation d'intensité  $I_s$  dans chaque domaine. En séparant par la pensée le quadridomaine en domaine de fermeture et en domaine principal, nous obtiendrions la répartition des charges comme indiquée sur la figure V-2. La partie gauche représente le cristal en absence de contrainte. Les charges sont équivalentes dans les deux types de domaine. Lorsqu'une contrainte est appliquée, les domaines de fermeture deviennent plus petits d'où une diminution de charges sur la face, corrélativement les domaines principaux deviennent plus grands et des charges supplémentaires apparaissent. En reconstituant le cristal, on ne retrouve plus un état d'équilibre, mais il reste des charges qui conduiront à des lignes de champ extérieures augmentant l'énergie magnétostatique.



**Figure V-2:** *a) Répartition des pôles fictifs dans le domaine de fermeture, b) Répartition des pôles fictifs dans le domaine principal, c) Répartition des pôles fictifs résiduels.*

En tenant compte des expressions établies au chapitre I paragraphe 2.3.4, il est possible d'exprimer les densités des pôles sur chaque interface :

**pour le domaine de fermeture**

$$w_{f+} = I_s \sin j \quad (1)$$

$$w_{f-} = -I_s \sin j \quad (3)$$

**pour le domaine principal**

$$w_{p+} = I_s \cos j \quad (2)$$

$$w_{p-} = -I_s \cos j \quad (4)$$

Il faut remarquer que pour  $j = \frac{\pi}{4}$ , les charges sont égales (c'est donc bien la configuration qui minimise l'énergie).

Au total, sur la paroi 2, nous avons l'expression de la densité suivante :

$$w_2 = w_{f+} + w_{p-} = I_s (\sin j - \cos j) \quad (5)$$

De même pour la paroi 1 :

$$w_1 = I_s (\cos j - \sin j) = -w_2 \quad (6)$$

Le système étant supposé isolé, nous avons donc la répartition globale de pôles magnétiques résiduels comme indiquée sur la partie droite de la figure V-2.

En référence au livre de CHIKAZUMI [8], l'énergie magnétostatique résultante peut s'écrire :

$$U = \frac{1}{2} \iint_{Sp} w \mathcal{F} ds \quad (7)$$

où  $\mathcal{F}$  représente un flux traversant la surface  $Sp$ .

$$\mathcal{E} = \iint \frac{w}{4\mu m_0 r} ds \quad (8)$$

Mais la résolution de ces équations est délicate en raison des intégrations successives. Néanmoins, on peut aussi partir de l'expression générale de l'énergie magnétostatique suivante :

$$U = \frac{m_0}{2} \iiint H_d^2 dv \quad (9)$$

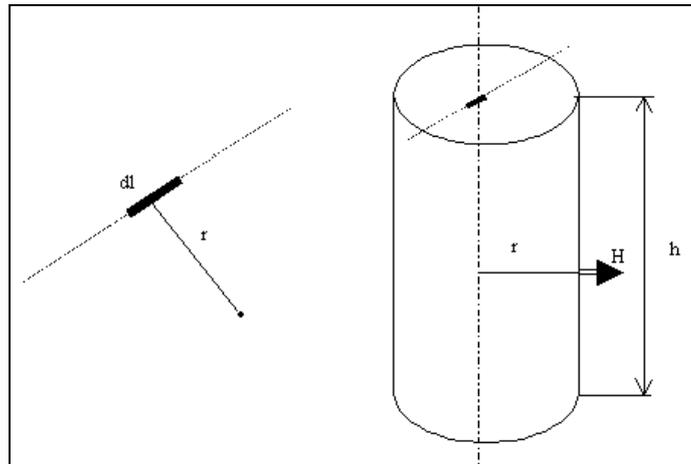
Où  $H_d$  est le champ démagnétisant produit par les charges.

Afin de calculer  $H_d$ , nous pouvons utiliser le théorème de Gauss, le flux de  $H$  sortant d'une surface est égal à la masse magnétique totale intérieure à cette surface.

$$\iint H_d ds = \frac{m}{m_0} \quad (10)$$

$m$  : masse magnétique ;

La solution de ce problème est simple dans le cas d'une géométrie cylindrique.



**Figure V-3** : Cylindre pour le calcul de la contribution de  $dl$

La bande de largeur  $dl$  peut être assimilée à un fil ;  $H_d$  est radial et uniforme (en module) pour un cylindre de hauteur  $h$  et de rayon  $r$  :

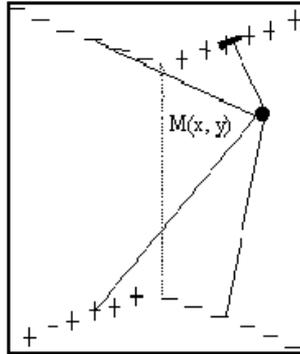
Dans ce cas l'équation (10) s'écrit :

$$H_d \cdot 2\pi r h = \frac{w h dl}{m_0} \quad \text{soit} \quad H_d = \frac{w dl}{2\pi m_0 r} \quad (11)$$

ou encore en passant en vectoriel :

$$\vec{H}_d = \frac{w dl \vec{r}}{2\pi m_0 r^2} \quad (12)$$

Pour le modèle considéré il est alors possible de calculer en un point quelconque  $M(x,y)$ , (voir figure V-4), la contribution de chaque paroi au champ démagnétisant. Pour avoir l'énergie globale, il suffit alors d'intégrer numériquement sur tout le domaine.



**Figure V-4:** Contribution de quatre parois au point  $M$  pour un déplacement  $x$  donné

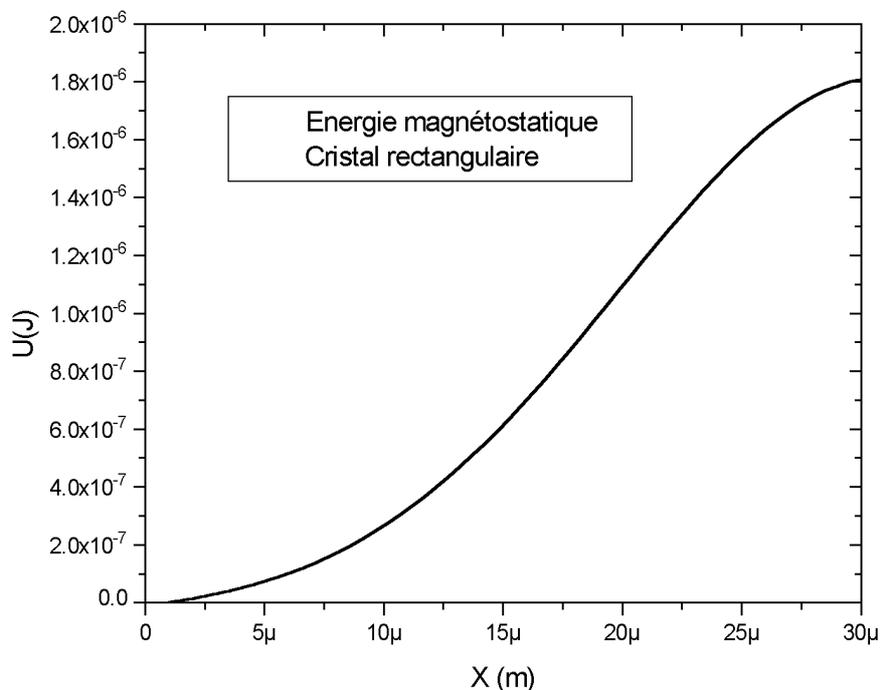
Les données suivantes ont été utilisées pour estimer l'énergie magnétostatique dans le cas d'un cristal rectangulaire.

$$a = 30 \text{ mm}$$

$$b = 10.a = 300 \text{ mm}$$

$$m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

La figure V-5 représente l'énergie magnétostatique globale du cristal en fonction du déplacement de la paroi.



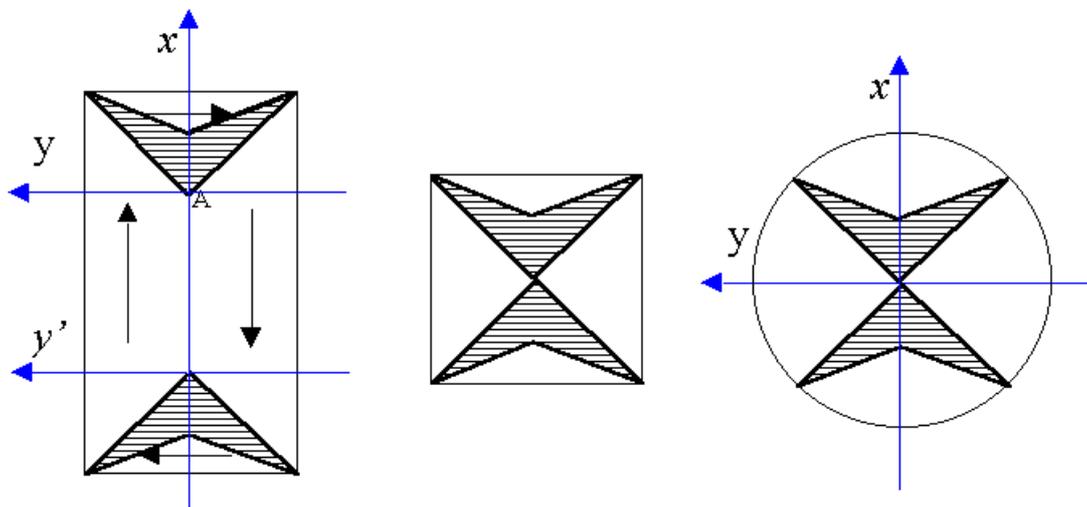
**Figure V-5:** Energie magnétostatique dans un quadridomaine rectangulaire

On observe une augmentation progressive de l'énergie en fonction du déplacement et un phénomène de saturation quand la paroi approche de la surface du cristal.

### 3.2 ENERGIE ELASTIQUE EMMAGASINEE, DUE AUX REGIONS DEFORMEES

Comme il a été dit dans le premier chapitre, la présence des domaines de fermeture diminue considérablement l'énergie magnétique du matériau, mais introduit une déformation des domaines en raison du phénomène de magnétostriction. Il en résulte des déformations élastiques de compatibilité. Ces déformations sont contrôlées par les caractéristiques mécaniques du matériau considéré.

La partie gauche de la figure V-6 ci-dessous représente le modèle quadridomaine, en grisé est schématisée la surface concernée par le déplacement des parois. Afin de faciliter le calcul, nous avons considéré, dans un premier temps, un cristal carré qui, pour ce cas, est équivalent car le volume compris entre les axes  $Y$  et  $Y'$  ne participe pas à déformation. Puis, afin de trouver une solution analytique, nous sommes passé à une géométrie cylindrique telle que représentée sur la partie droite de la figure V-6. Ce problème peut alors être traité par la méthode de l'inclusion d'ELSHELBY.



**Figure V-6** : Simplification du modèle pour le calcul de l'énergie élastique

A cette déformation élastique correspond une énergie  $E_{el}$  donnée par la relation suivante :

$$E_{el} = -\frac{1}{2} V s_{ij} e_{ij}^T \quad (13)$$

$V$  : volume

$s_{ij}$  : tenseur des contraintes

$e_{ij}^T$  : tenseur des déformations

En faisant de nombreuses hypothèses simplificatrices, le problème peut être traité analytiquement. Le détail des calculs est présenté en annexe I. On aboutit à la formule assez simple :

$$E_{el} = 0.716m \left( \frac{B_1}{C_{12} - C_{11}} \right)^2 (a - x)^2 \quad (14)$$

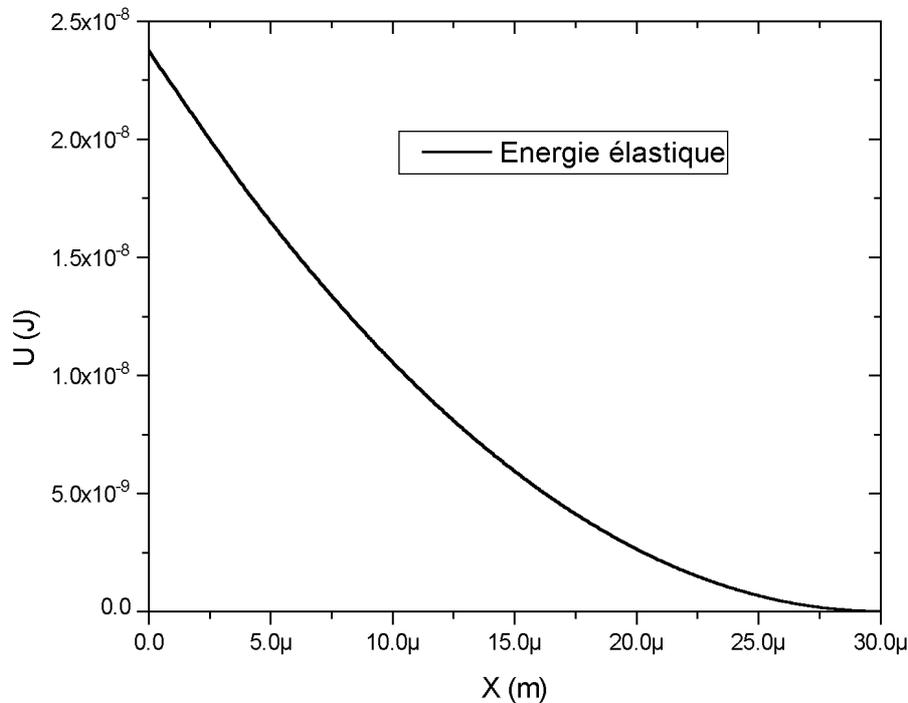
Les grandeurs  $B_1$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  ont été définies chapitre I paragraphe 2.3.3, nous prendrons les valeurs suivantes:

$$m : 8,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$B_1 : -2,9510^6$$

$$C_{12} : 1,4610^{11} \text{ N/m}^2$$

$$C_{11} : 1,1210^{11} \text{ N/m}^2$$



**Figure V-7** : Energie élastique

Comme nous pouvons nous en attendre, cette énergie est croissante avec le déplacement de la paroi. Elle intervient donc comme un terme de rappel pour la paroi, mais elle est très faible par rapport à l'énergie magnétostatique.

### 3.3 ENERGIE DES PAROIS

Compte tenu du volume élémentaire considéré (cristal à quatre domaines) l'action d'une contrainte entraîne le déplacement des parois à  $90^\circ$  qui séparent les domaines de fermetures des domaines principaux (voir Figure V-8). Il résulte :

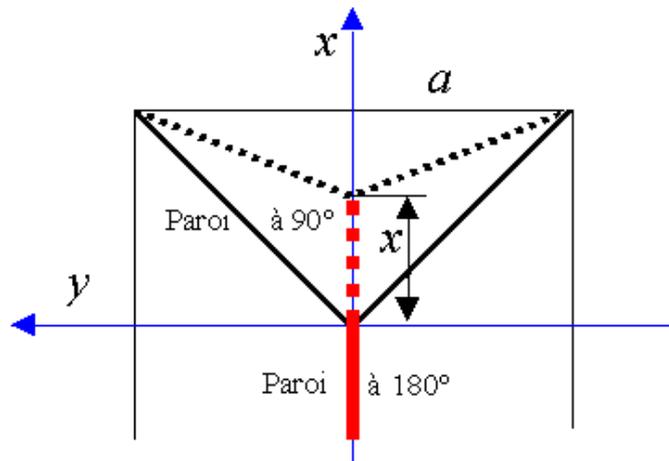
1. Une augmentation de la longueur des parois à  $180^\circ$  qui passent progressivement de :  $(2b-2a)$  à  $2b$ .
2. Une diminution de la longueur des parois à  $90^\circ$  qui passent de :  $4 \cdot a\sqrt{2}$  à  $4 \cdot a$

Comme il a été rappelé dans le chapitre I paragraphe 2.3.5, le calcul de l'énergie d'une paroi est très compliqué car il fait intervenir : des tensions internes, l'anisotropie magnétocristalline et l'énergie d'échange. Le problème est généralement traité globalement en termes d'énergie par unité de surface. NEEL [10] propose la formule :

Chapitre I équation 15 
$$g = 2p\sqrt{AK}$$

Nous prendrons pour une paroi à  $90^\circ$ :  $\mathcal{G}_{90^\circ} = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$

Et pour une paroi à  $180^\circ$ :  $\mathcal{G}_{180^\circ} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$



**Figure V-8** : Modification de la forme des parois

Parois à  $90^\circ$  :

La diminution de longueur des quatre parois à  $90^\circ$  est donnée par la formule :

$$Dl_{90} = 4 \left( a\sqrt{2} - \sqrt{2a^2 + x^2 - 2ax} \right) \quad (15)$$

Le système rend donc une énergie de :

$$E_p^{90} = \mathcal{G}_{100}^{90} Dl_{90} = 4 \mathcal{G}_{100}^{90} \left( a\sqrt{2} - \sqrt{2a^2 + x^2 - 2ax} \right) \quad (16)$$

Parois à  $180^\circ$  :

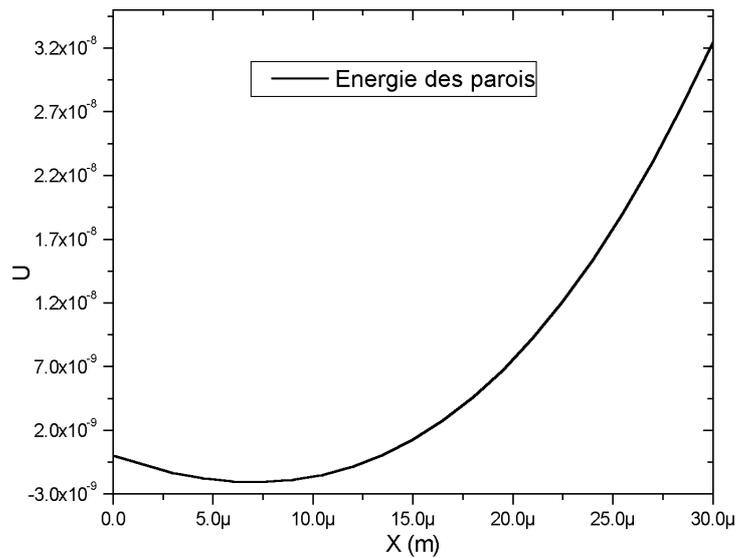
L'augmentation de longueur de la paroi à  $180^\circ$  est de :

$$Dl_{180} = 2 \cdot x \quad (17)$$

Le système absorbe donc une énergie de :

$$E_p^{180} = 2 \mathcal{G}_{100}^{180} \cdot x \quad (18)$$

Globalement la variation d'énergie due à la modification de la longueur des parois est représentée sur la figure V-9.



**Figure V-9** : *Energie des parois*

### 3.4 CONCLUSION

Bien qu'avec beaucoup d'hypothèses simplificatrices, nous avons pu déterminer les ordres de grandeurs des différentes énergies (magnétostatique, élastique emmagasinée et des parois) en fonction de la position de la paroi à  $90^\circ$ . On constate globalement une augmentation de ces différentes énergies. Il faut fournir de l'énergie pour écarter la paroi de sa position d'équilibre. Réciproquement, l'effet magnétostatique, l'élasticité emmagasinée et l'énergie des parois vont engendrer une force de rappel qui va tendre à ramener la paroi vers sa position d'équilibre. Par contre, ces trois énergies n'ont pas toutes la même importance ; l'énergie magnétostatique est très prépondérante (de l'ordre de  $10^{-6}$  J) alors que les autres énergies sont de l'ordre de quelques  $10^{-8}$  J. Compte tenu de cette différence, pour la suite des calculs, nous négligerons les deux dernières énergies pour **ne prendre en compte que l'énergie magnétostatique**.

## 4 PRÉSENTATION DU MODÈLE ET DES HYPOTHÈSES

La modélisation proposée vise à reproduire les mouvements des parois à 90° qui se déplacent sous l'effet d'une contrainte dans un matériau ferromagnétique parsemé d'obstacles. Le problème revient à rechercher à chaque instant l'équilibre entre **une force motrice** extérieure croissante, liée à la contrainte, **une force de rappel** liée à la microstructure magnétique et **des ancrages** liés à la microstructure cristalline.

### 4.1 FORCE DE RAPPEL

Dans le paragraphe précédent, nous avons explicité, pour le modèle à quatre domaines (voir figure V-1), les importances relatives des différentes énergies et montré que l'énergie magnétostatique était largement prépondérante. La dérivée de cette énergie par rapport au déplacement de la paroi permet d'accéder à une grandeur proportionnelle à une force qui tend à reconstituer la microstructure magnétique initiale.

### 4.2 FORCE MOTRICE

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre I 4.1, le fait d'appliquer une contrainte va modifier la microstructure magnétique. Dans le cas d'une contrainte de traction appliquée dans la direction des domaines principaux (voir figure V-8), ces derniers vont avoir tendance à grandir au détriment des domaines de fermeture. Tout se passe comme si la contrainte exerçait une force sur les parois à 90°. Afin de simplifier les calculs J. DEGAUQUE [24] introduit pour chaque domaine, par analogie avec la magnétisation, la notion de champ magnétique fictif  $H_s$ . C'est un champ qui produirait le même déplacement de parois.

Dans notre cas, l'équation (14), du chapitre I paragraphe 4.1, s'écrit :

$$H_s \gg \frac{3}{2} \frac{l_{100}}{I_s} \sigma \quad (19)$$

Le champ fictif  $H_s$  est dans la même direction que la contrainte.

Il est alors possible de remonter à une force équivalente appliquée sur la paroi :

$$F_s = 2 \vec{I}_s \vec{H}_s S \quad (20)$$

Où  $S$  est la projection de la surface de la paroi sur la direction de  $H_s$ .

Dans notre cas  $S = (a \cdot \text{épaisseur})$ . Pour une épaisseur unité l'expression de la force est :

$$F_s \gg 6 l_{100} a \sigma \quad (21)$$

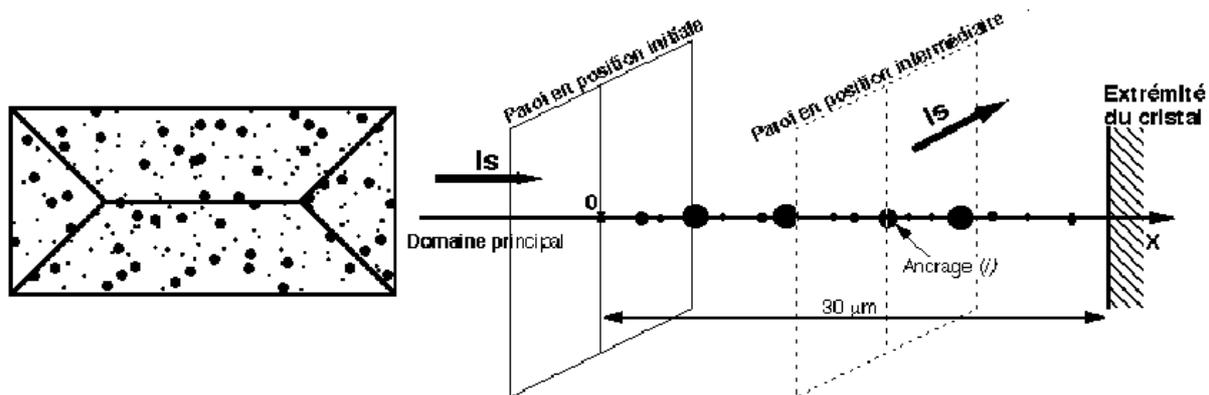
Il faut donc retenir que la force résolue au niveau de chaque paroi à 90° est proportionnelle à la contrainte appliquée et est indépendante de la position de la paroi.

### 4.3 ANCRAGES

Ils correspondent à des imperfections du cristal. L'efficacité de chaque ancrage est considérée comme distribuée autour d'une valeur moyenne et leurs positions sont également aléatoires dans le cristal. Dans le cas du modèle à quatre domaines, le passage d'un modèle volumique à

un modèle plan, à deux dimensions, est assez facile. Il correspond par exemple à une projection de l'ensemble sur la face supérieure. (Voir figure V-10).

Afin de simplifier encore plus les calculs nous proposons le passage à une seule dimension comme représenté sur la figure V-10. L'axe OX représente la direction suivant laquelle se déplace la paroi, c'est aussi la direction de la contrainte et la direction de magnétisation du domaine principal (domaine de gauche). Les ancrages, en nombre fini, sont répartis aléatoirement entre la position d'équilibre ( $x=0$ ) et l'extrémité du cristal (zone hachurée).



**Figure V-10** : Passage du modèle 2D au modèle unidimensionnel

#### 4.4 RESUME DES HYPOTHESES DE NOTRE MODELE

- Une seule dimension, l'axe Ox.
- Une seule paroi à  $90^\circ$  qui sépare un domaine principal d'un domaine de fermeture.
- Une position d'équilibre initial :  $x = 0$  ;  $s = 0$  ; Energie magnétostatique = 0
- La paroi se déplace de la position d'équilibre vers l'extrémité du cristal (qu'elle n'est pas obligée d'atteindre mais qu'elle ne peut en aucun cas franchir).
- Les obstacles en nombre fini sont répartis aléatoirement entre  $x=0$  et l'extrémité du cristal.
- Chaque obstacle est doté d'une force d'ancrage fixe qui fonctionne en tout ou rien et dont l'amplitude est distribuée entre 0 et une valeur maximale, suivant une loi gaussienne.
- Dans le cas d'une contrainte croissante (déplacement de la paroi de gauche vers la droite), l'énergie magnétostatique s'oppose au déplacement (force de rappel). Inversement lors du déchargement, l'énergie magnétostatique devient la force motrice qui tend à ramener la paroi vers sa position d'équilibre. La contrainte, non encore nulle, s'oppose à ce mouvement. L'efficacité de chaque ancrage est identique que la paroi se déplace de gauche à droite ou de droite à gauche. Ce phénomène est générateur d'hystérésis.
- La paroi est obligatoirement accrochée à un ancrage. Elle va donc se déplacer brutalement pour aller d'un ancrage à un autre. Ce déplacement entraîne un changement de la direction de magnétisation d'une partie du cristal et provoque donc une variation locale de flux. Nous admettons que ce déplacement génère sur la bobine capteur un pulse dont l'amplitude est proportionnelle au déplacement.
- Il est envisageable de reconstituer un polycristal en faisant fonctionner plusieurs cellules simultanément. On peut considérer que le bruit mesuré, par la bobine encerclante, correspond à la somme des pulses générés par chaque cellule.

## 4.5 APPLICATION DU MODELE

La programmation de la modélisation est réalisée en TURBO-PASCAL sur un ordinateur PENTIUM.

### 4.5.1 Calculs préliminaires

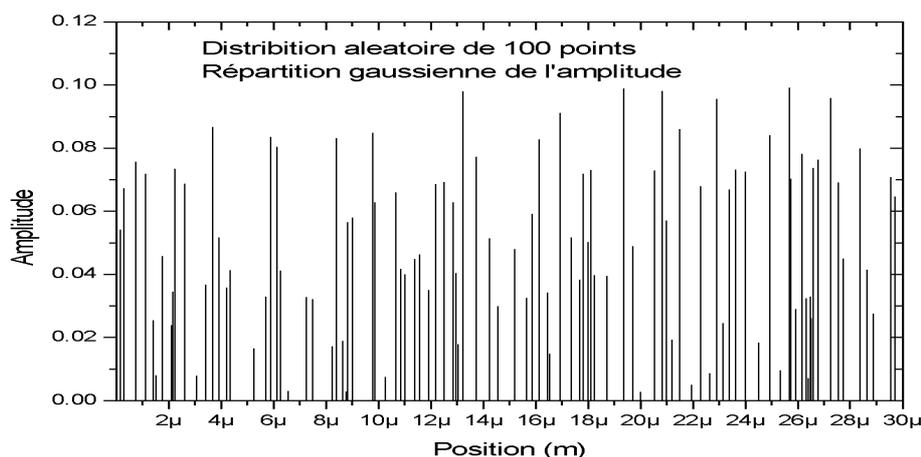
Les obstacles sont censés représenter des imperfections cristallines différentes pour chaque cristal mais constantes dans le temps. Afin de reproduire un polycristal, nous avons créé un ensemble de 30 tableaux (cristaux) de mille lignes et de deux colonnes. La première représente la position c'est un nombre tiré aléatoirement entre 0 et 30 mm et classés par ordre croissant. La seconde représente l'amplitude de l'ancrage, c'est un nombre aléatoire tiré entre 0 et 0,1.

Lors de l'application :

L'amplitude des forces d'ancrage peut être modifiée par un facteur multiplicateur ;

Le nombre d'ancrages (compris entre 0 et 1000) est donné en choisissant l'incrément de lecture du tableau.

La figure V-11 représente une distribution aléatoire de 100 points d'ancrage avec leurs amplitudes.



**Figure V-11** : Exemple d'une distribution des ancrages

### 4.5.2 Programme principal

Il comporte trois parties correspondant respectivement : à l'introduction des paramètres, à l'augmentation de la contrainte de traction de 0 à  $S_{\max}$ , avec un pas incrémental fixé et à la diminution de la contrainte de  $S_{\max}$  à 0 (déchargement) avec le même incrément.

Première partie :

Entrée des paramètres :

Nombre d'ancrages, amplitude maximale des ancrages, contrainte maximum, incrément de contrainte et répartition des ancrages à partir d'un des trente tableaux disponibles.

Deuxième partie :

Contrainte croissante en partant de 0.

Incrément de la contrainte : on compare la nouvelle contrainte (force motrice) à la somme force d'ancrage plus la force de rappel magnétostatique (force résistante). Si la force motrice est supérieure à la force résistante, alors la paroi saute l'obstacle et va à l'obstacle suivant où le même calcul est effectué avec la nouvelle force motrice. La paroi s'arrêtera lorsque la force résistante locale sera supérieure à la force motrice. La distance parcourue par la paroi est enregistrée et représente l'amplitude du saut. On procède alors à un nouvel incrément de contrainte et ainsi de suite jusqu'à la contrainte maximale. L'extrémité du cristal est représentée par un ancrage infranchissable.

Les résultats apparaissent sous forme d'un tableau où figure, en fonction de la contrainte appliquée, la position de la paroi, le N° de l'obstacle qui bloque la paroi et la distance parcourue par la paroi s'il y a eu saut.

### Troisième partie :

Décroissance de la contrainte en partant de  $S_{max}$ .

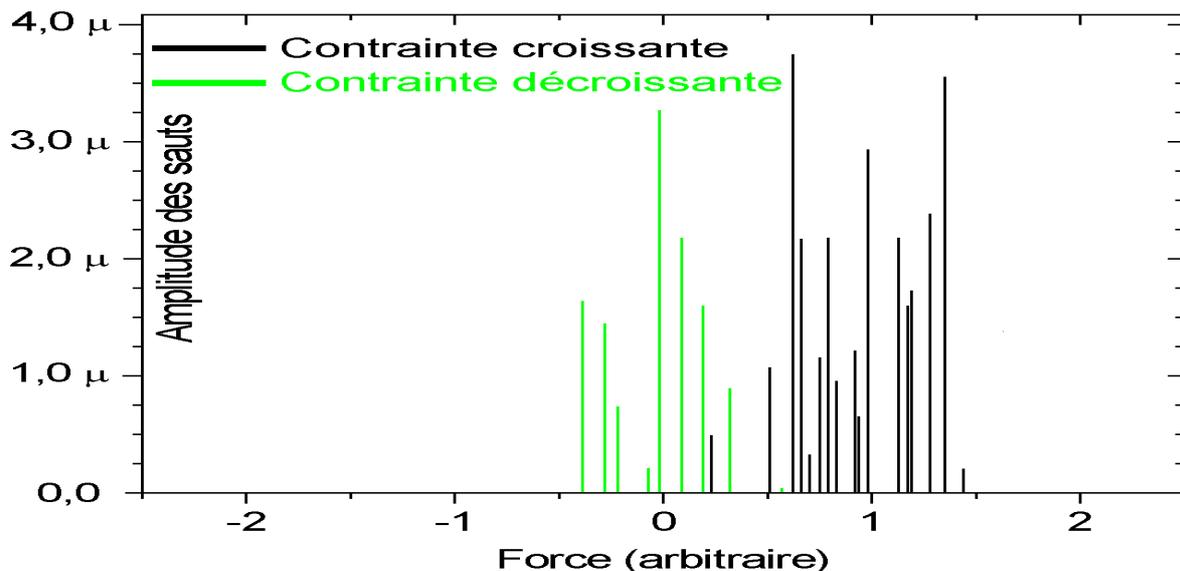
Décrément de la contrainte : le principe du programme est le même sauf que la force motrice devient la force de rappel d'origine magnétostatique et que la force résistante devient la somme de la force d'ancrage plus la force correspondante à la contrainte. Le calcul est arrêté soit lorsque tous les obstacles ont été franchis (retour de la paroi à sa position de départ) soit pour une contrainte négative égale en valeur absolue à la contrainte maximale appliquée.

Les résultats sont enregistrés de la même manière.

### 4.5.3 Résultat type

Les résultats présentés sur la figure V-12 correspondent aux paramètres suivants :

- Taille de la cellule :  $a = 30 \text{ mm}$  ;
- Force maximale représentant l'énergie magnétostatique = 1 Unité ;
- Force maximale correspondant à la contrainte appliquée = 2,5 Unités ;
- Incrément de force = 0,01 Unités ;
- Cristal N° 03 ; contenant 100 obstacles (d'amplitude gaussienne et de position aléatoire).



**Figure V-12** : Signal type obtenu pour un seul cristal.

En noir : contrainte croissante de 0 à 2,5 Unités

En vert : contrainte décroissante de + 2,5 Unités à - 2,5 Unités

**La partie noire** représente les pulses obtenus en contrainte croissante.

On observe que les événements n'apparaissent pas pour les faibles contraintes, avec néanmoins de plus forts événements en début et en fin de signal. Ce résultat est dû à la forme de la courbe correspondant à l'énergie magnétostatique en fonction de la position de la paroi.

Quantitativement on obtient dans ces conditions :

- Dix-sept événements pour 100 obstacles ;
- Amplitude moyenne des pulses : 1,76 ;
- Position finale :  $x = 30$  mm ; la paroi a atteint l'extrémité du cristal.

**La partie verte** représente le retour de la paroi lorsque la contrainte décroît.

On observe une forte hystérésis puisque les premiers événements apparaissent vers une contrainte de  $+0,25U$ . Lorsque la contrainte repasse par zéro, la paroi n'a pratiquement pas bougé de l'extrémité du cristal. Ce qui revient à dire que, pour ce type d'ancrage, l'énergie magnétostatique est insuffisante pour ramener la paroi dans sa position initiale (d'équilibre). Il faut donc appliquer une contrainte négative pour faire déplacer la paroi. Celle-ci ne reviendra cependant pas à sa position initiale même pour une contrainte de compression égale en valeur absolue à la contrainte initialement appliquée. Quantitativement on obtient :

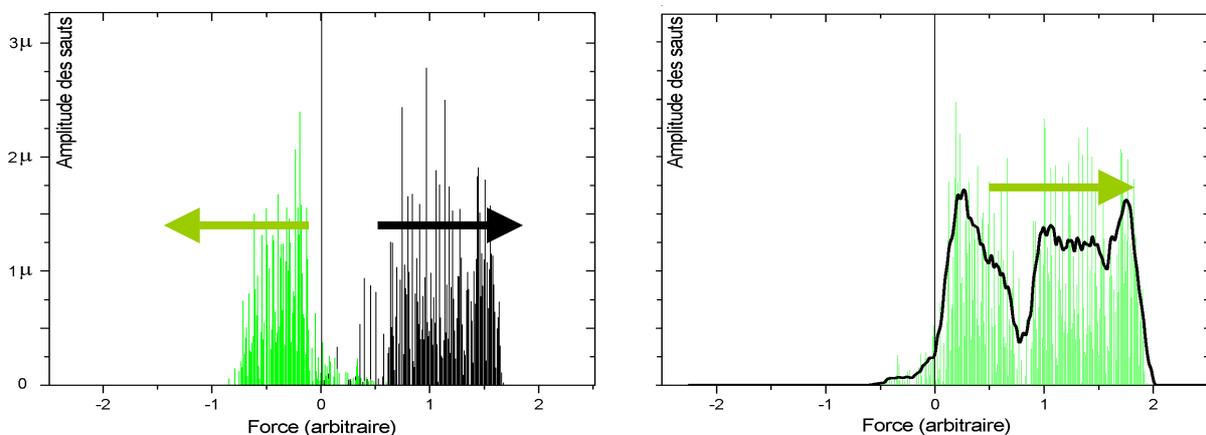
- Neuf événements ;
- Amplitude moyenne des pulses : 1,70 ;
- Pour une force de  $-2,5 U$ ,  $x = +11$  mm ; la paroi n'est pas revenue à sa position de départ.

Ce résultat représente le signal d'un seul cristal. Nous avons cherché à reproduire l'effet statistique d'un polycristal et l'effet globalisant du capteur (bobine encerclante). En gardant tous les paramètres constants, nous répétons trente fois le modèle sur trente répartitions différentes d'obstacles. Le résultat final correspond à la sommation des pulses, en fonction de la contrainte appliquée.

## 4.6 RESULTATS ET ANALYSES

### 4.6.1 Reconstitution d'un signal magnétomécanique

Ce résultat vise à illustrer la possibilité grâce à ce modèle de reconstituer un signal magnétomécanique. Il correspond à trente cristaux tous de même taille et tous orientés dans la direction de la contrainte. Les autres paramètres sont ceux indiqués dans l'exemple précédent.



**Figure V-13 :** Reconstitution d'un signal magnétomécanique en sommant les résultats de trente cristaux.

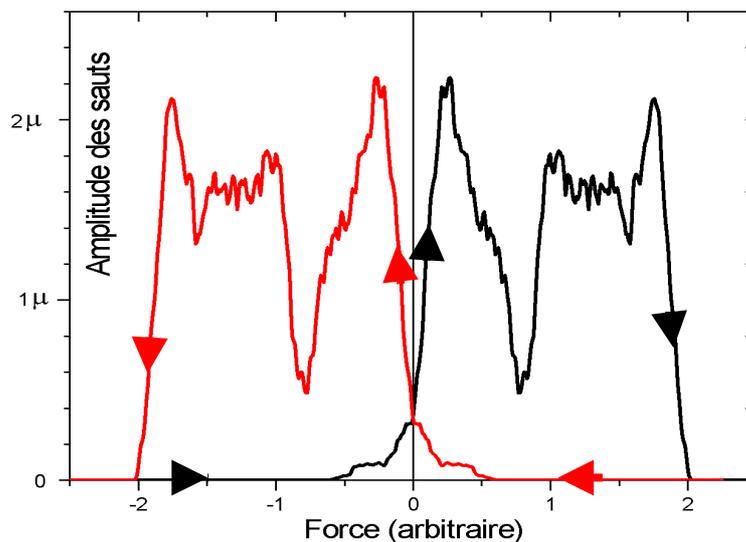
- *Partie gauche : ensemble des pulses correspondant à trente signaux ; en noir : contrainte croissante ; en vert : contrainte décroissante ;*
- *Partie droite : en vert ou grisé reconstitution d'un signal global en contrainte croissante en partant de la compression ; en noir enveloppe du signal.*

Le bruit global (partie gauche figure V-13) est obtenu en sommant les pulses correspondant aux trente cristaux en fonction de la contrainte. La partie noire correspond à une contrainte croissante de 0 à  $S_{\max}$  et la partie verte à la contrainte décroissante de  $S_{\max}$  à  $-S_{\max}$ .

Afin de reconstituer le signal global, nous postulons que le comportement est symétrique en traction et en compression (ce qui n'est pas évident a priori). Il est alors possible de reconstituer un signal global correspondant à une variation de contrainte de  $-S_{\max}$  à  $+S_{\max}$ . Ce résultat est obtenu en sommant la courbe noire précédente avec la courbe verte inversée en contrainte, cf. la partie droite de la figure V-13. La courbe en noire représente l'enveloppe du signal.

Toujours en postulant la symétrie traction compression, il est possible d'inverser la courbe et de reconstituer un signal complet (papillon) tel qu'obtenu expérimentalement par exemple figure II-3 du chapitre II paragraphe 2.2. Le résultat est reporté sur la figure V-14.

La courbe noire correspond à la partie contrainte croissante, la courbe rouge à la contrainte décroissante



**Figure V-14** : bruit magnétomécanique reconstitué

Remarques :

- Ce signal correspond aux paramètres indiqués précédemment. Une modification de ces paramètres conduit à des formes très différentes. Nous avons choisi celui-ci car il est très illustratif.
- Le signal en noir présente deux parties : la première bosse assez pointue correspond au retour d'une famille de parois à  $90^\circ$  sous l'effet de l'énergie magnétostatique. La seconde bosse de forme plus étalée correspond au déplacement d'une autre famille de parois sous l'effet de la contrainte de traction. Dans notre cas en raison de la grande hystérésis et du fait que tous les cristaux sont identiques en taille et orientation, ces bosses sont très séparées.

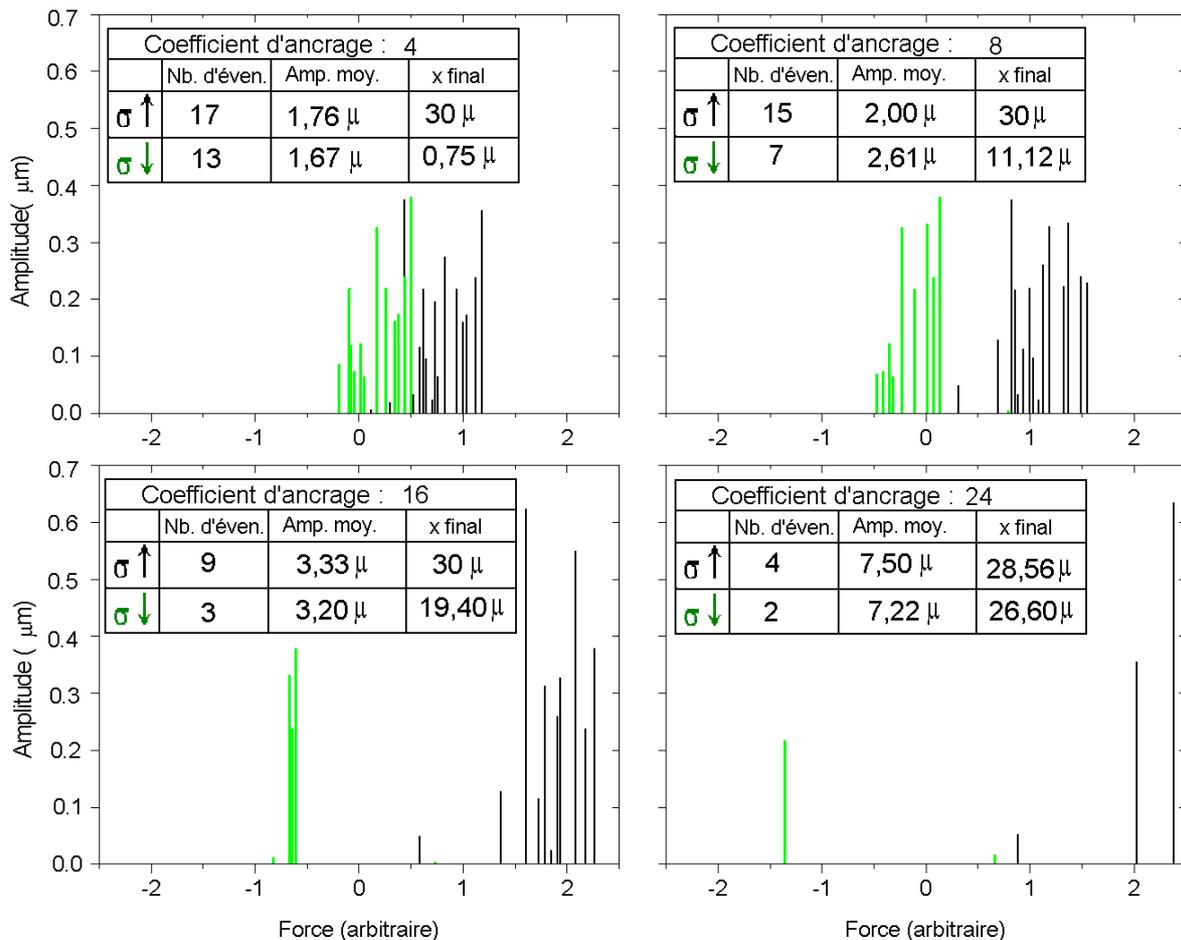
Nous avons ensuite cherché à mettre en évidence l'effet de certains paramètres.

### 4.6.2 Influence de l'amplitude des ancrages

La figure V-15 représente, pour un seul même cristal, quatre résultats pour des amplitudes d'ancrages différents (des plus petits aux plus grands).

Les autres paramètres sont les mêmes que ceux des figures V-12 et V-13.

En noir est représenté le bruit pour la contrainte croissante ( $\sigma >$ ) et en vert ou en grisé est représenté le bruit pour la contrainte décroissante ( $\sigma \downarrow$ ). Les résultats quantitatifs sont portés dans les encadrés



**Figure V-15 :** Evolution du bruit en fonction de l'amplitude d'ancrage

On observe pour des ancrages de plus en plus forts :

En contrainte croissante  $\sigma >$  :

- Les événements commencent à apparaître pour des contraintes de plus en plus élevées ;
- Ils se terminent de plus en plus tardivement ;
- La paroi n'atteint pas le bout du cristal pour les plus grands obstacles ;
- Le nombre d'événements diminue et corrélativement, l'amplitude moyenne augmente.

En contrainte décroissante  $s_{fl}$  :

- L'hystérésis est de plus en plus marquée (les signaux en  $s_{>}$  et en  $s_{fl}$  sont de plus en plus séparés) ;
- Pour des obstacles à coefficient d'ancrage supérieur à 8, la paroi ne revient jamais à sa position de départ ;
- Pour les plus forts ancrages, la paroi reste bloquée en bout du cristal, l'énergie magnétostatique est insuffisante pour la mettre en mouvement. La microstructure magnétique est bloquée ;
- L'amplitude moyenne des événements est comparable en  $s_{>}$  ou en  $s_{fl}$  ce qui revient à dire que les événements sont de même nature que la contrainte soit croissante ou décroissante et qu'ils ne dépendent que de la nature des obstacles.

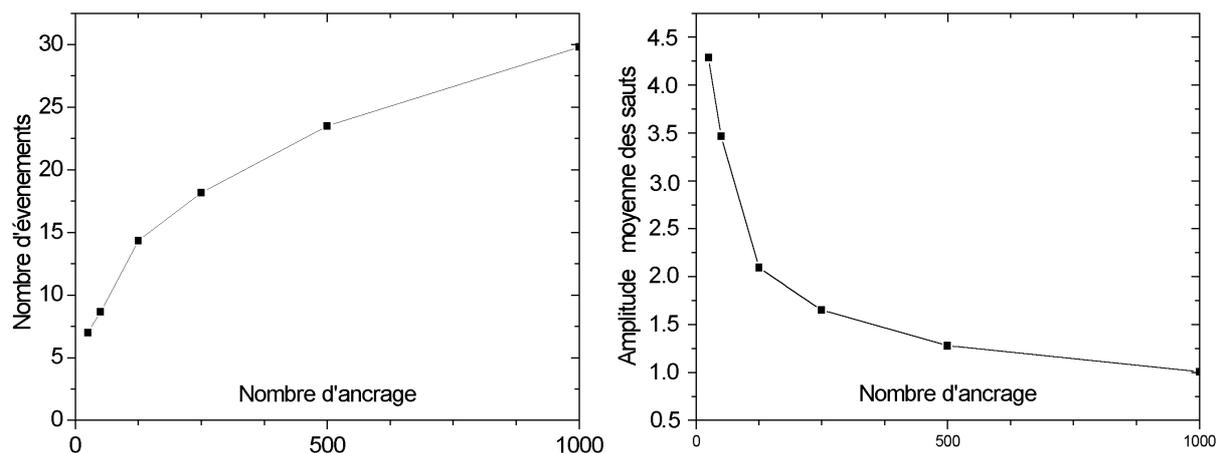
L'ensemble de ses résultats est conforme à l'expérience :

Chapitre II paragraphe 2.4.2 : entre l'état recuit et l'état trempé et revenu ; nous avons « durci les ancrages ». On observe bien une diminution du signal et une augmentation de l'hystérésis. Il est probable que pour l'état trempé et revenu, les parois soient peu mobiles ce qui correspond aux cas des ancrages forts.

Ces résultats sont à rapprocher aux courbes expérimentales, Chapitre IV paragraphe 3.3, figure IV-6. La différence entre les courbes, correspondant au fer ARMCO et à l'acier XC55, illustre l'effet des ancrages sur l'amplitude du signal à contrainte comparable.

#### 4.6.3 Influence du nombre d'ancrages

Dans cette partie, nous avons fait varier l'incrément de lecture des tableaux représentant les cristaux. Si l'incrément est de 1 nous prenons tous les ancrages soit 1000. S'il est de 2 nous ne prenons qu'un ancrage sur deux et ainsi de suite jusqu'à ne prendre qu'un ancrage sur 40 soit 25 ancrages. Nous comptons ensuite le nombre d'événements correspondant, tous les autres paramètres étant fixés.



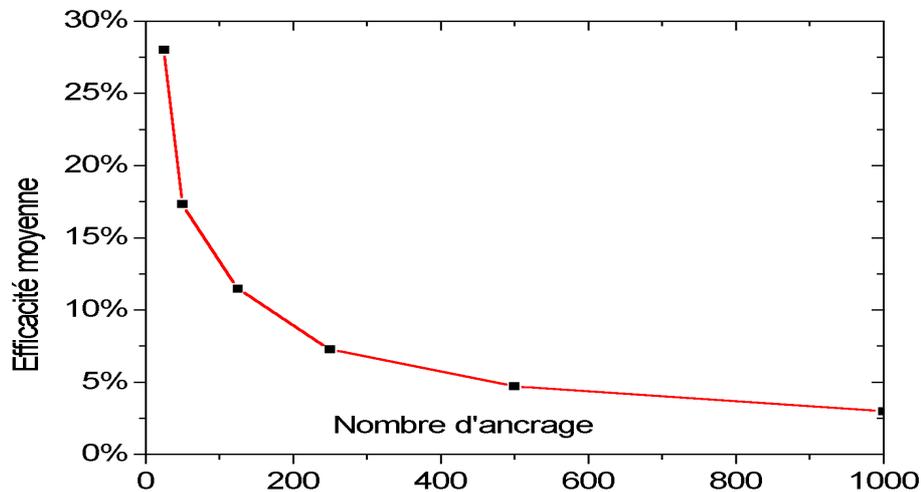
**Figure V-17 :** Influence du nombre d'ancrages

La partie gauche représente le nombre d'événements en fonction du nombre d'ancrages.

La partie droite représente l'amplitude moyenne des sauts en fonction du nombre d'ancrages.

Analyse :

Comme on peut s'y attendre, le nombre d'évènements augmente avec le nombre d'ancrage mais non proportionnellement. Corrélativement, l'amplitude moyenne des sauts diminue. De même cette amplitude ne décroît pas uniformément la courbe présente une cassure entre 100 et 200 ancrages. On peut interpréter ce résultat en termes d'efficacité des ancrages.



**Figure V-18** : Efficacité des ancrages en fonction du nombre d'ancrages ; pourcentage d'ancrages ayant bloqué la paroi en fonction du nombre total d'ancrages.

On observe une décroissance très rapide de la courbe c'est-à-dire que la proportion d'obstacles utiles, diminue avec leur nombre. Par exemple, avec 1000 obstacles, moins de 5% sont vus par la paroi, alors que près de 30% sont perçus si on ne met que 25 obstacles.

Ces résultats sont difficilement comparables à l'expérience car nous ne disposons pas de résultats où les obstacles sont de même nature et de même taille mais en nombre plus ou moins grands. Généralement ces deux paramètres varient en sens inverse.

## 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION DE CE MODELE

Notre travail a permis de montrer qu'il était possible par un modèle relativement simple de reconstituer un signal magnétomécanique et d'appréhender l'influence de certains paramètres. Il est évidemment loin de rendre compte complètement du phénomène. A partir de cette première approche, il serait assez facile de perfectionner ce modèle en introduisant les points suivants :

- Introduire des tailles de cristaux différents.
- Introduire la désorientation des cristaux en fonction de la contrainte ; on se rapprocherait ainsi du modèle de J. CATTY.
- Simuler la précipitation ; en partant du principe d'un volume d'obstacle constant et en introduisant une relation entre le nombre et la taille des obstacles. (S'ils sont plus gros, ils sont moins nombreux).
- Simuler l'agitation thermique en introduisant le temps et en donnant une variation aléatoire de l'efficacité des ancrages en fonction du temps. Cette notion devrait permettre de s'approcher du traînage magnétique.

# **Chapitre IV**

## **Caractérisation de la fatigue**



# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>131</b>
<b>2</b>	<b>PARAMETRES DE L'ESSAI DE FATIGUE</b> .....	<b>131</b>
2.1	COURBE DE WÖLHER .....	131
2.2	METHODES EN ESCALIER OU METHODE DIXON ET MOOD .....	132
2.3	EVOLUTION MICROSTRUCTURALE.....	133
<b>3</b>	<b>MESURES MAGNETOMECHANQUES ; LES DIFFERENTS PARAMETRES.</b> <b>135</b>	
3.1	LA TEMPERATURE.....	136
3.1.1	<i>température induite par la déformation</i> .....	136
3.1.2	<i>Évolution des différents bruits en fonction de la température</i> .....	137
3.2	INFLUENCE DE LA VITESSE D'APPLICATION DE LA CONTRAINTE.....	138
3.3	AMPLITUDE DU SIGNAL EN FONCTION DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE .....	140
3.4	ESSAI COMPLEMENTAIRE : SUPERPOSITION D'UN CHAMP MAGNETIQUE CONSTANT DANS LE SENS LONGITUDINAL DE L'EPROUVETTE.....	142
<b>4</b>	<b>SUIVI EN FATIGUE</b> .....	<b>144</b>
4.1	RESULTATS - INTERPRETATIONS.....	144
4.1.1	<i>Résultats</i> .....	144
4.1.2	<i>Interprétation</i> .....	147
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>149</b>



## 1 INTRODUCTION

Le dispositif expérimental construit et mis au point, présenté dans le chapitre III, permet de mesurer le bruit magnétomécanique en cours d'essais de fatigue en flexion rotative. Dans ce chapitre, il s'agit de voir si l'effet magnétomécanique peut être à la base d'une méthode de contrôle non destructif appliquée aux pièces en rotation soumises à une flexion de direction fixe. Nos essais consistent principalement à mettre en évidence une corrélation entre l'endommagement du matériau et l'évolution du signal magnétomécanique.

Ce chapitre comportera donc quatre parties :

- Avant de commencer l'étude proprement dite, il y a lieu de déterminer les paramètres mécaniques de la fatigue de manière à se placer en fatigue endurance avec une rupture vers  $10^7$  cycles. Nous avons profité également de ces essais pour caractériser le mode d'endommagement du matériau.
- Ensuite, nous avons étudié l'influence des différents paramètres de l'essai sur le bruit magnétomécanique : température, vitesse de rotation et contrainte.
- Les essais de fatigue endurance proprement dits ont été effectués à différents niveaux de sollicitation : légèrement inférieures puis supérieures à la limite d'endurance.
- Compte tenu des connaissances acquises sur le bruit magnétomécanique et sur la fatigue, nous présentons une tentative d'interprétation de nos résultats.

## 2 PARAMETRES DE L'ESSAI DE FATIGUE

Nous souhaitons appliquer la mesure du bruit magnétomécanique pour caractériser l'endommagement en fatigue endurance d'un fer ARMCO à l'état recuit. Avant de procéder à ces essais, il est indispensable de connaître le domaine de sollicitation qui conduit à la fatigue endurance. La technique la plus utilisée consiste à déterminer la courbe de Wöhler. Cette méthode, très simple, nécessite par contre pour être fiable un grand nombre d'éprouvettes. Le nombre de nos éprouvettes étant très limité en raison du prix de fabrication, nous avons réalisé une courbe de Wöhler avec 7 éprouvettes soit une seule par niveau de contrainte. Cette série d'essai a permis d'obtenir un ordre de grandeur de la limite d'endurance, puis pour la déterminer plus précisément nous avons utilisé la méthode des escaliers moins consommatrice d'éprouvettes.

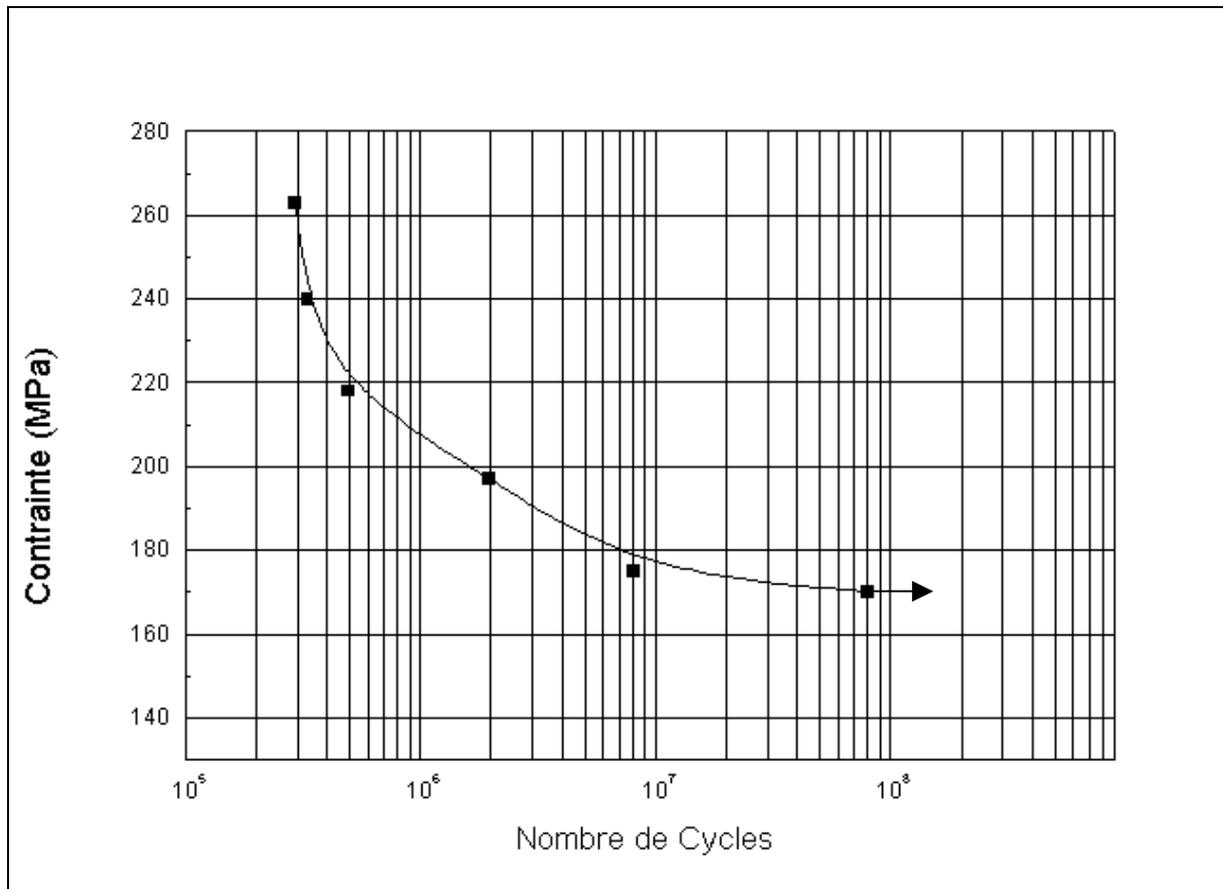
### 2.1 COURBE DE WÖHLER

La courbe de Wöhler définit la relation [contrainte - nombre de cycles à rupture] ou courbe  $s-N$ .

Pour tracer cette courbe, nous avons utilisé des conditions expérimentales proches de celles envisagées pour notre étude : essai en flexion rotative, éprouvette de fatigue « haltère » identique à celle présentée figure III-15, vitesse de rotation retenue 1000 tr/mn et température ambiante ( $35^\circ$ ).

Partant d'une contrainte de 265 MPa, qui conduit à une rupture de l'éprouvette en 300 000 cycles. Pour chaque nouvelle éprouvette, nous décrétons la contrainte ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de rupture avant  $10^7$  cycles.

La figure IV-1 représente les résultats obtenus : les contraintes sont en ordonnée et le nombre de cycles à rupture en abscisse. Par commodité, le nombre de cycles est en échelle logarithmique.



**Figure IV-1** : Courbe de Wölher du fer Armco

Comme le prévoit la théorie, la courbe présente bien une partie décroissant rapidement puis une asymptote (vers 170 MPa pour notre cas). Ce qui veut dire que pour une contrainte inférieure à cette valeur, il n'y aura pas de rupture. C'est la limite d'endurance recherchée. Mais ce résultat est très approximatif ; il aurait fallu effectuer plusieurs essais pour chaque taux de chargement. Il est très important pour nous de déterminer cette limite avec précision car nous souhaitons travailler dans son voisinage. C'est pourquoi, partant de cet ordre de grandeur, nous avons utilisé la méthode de Dixon et Mood [59] qui permet avec un petit nombre d'éprouvettes (15) de déterminer assez précisément la limite d'endurance.

## 2.2 METHODES EN ESCALIER OU METHODE DIXON ET MOOD

Il existe plusieurs méthodes statistiques plus ou moins rigoureuses, plus ou moins longues et coûteuses pour situer précisément la limite d'endurance.

Pour mettre en œuvre la méthode de Dixon et Mood, il faut choisir quatre niveaux de contraintes régulièrement espacés au voisinage de la limite d'endurance présumée. Si la première éprouvette essayée se rompt, l'éprouvette suivante est essayée au niveau

immédiatement inférieur ; dans le cas contraire, elle est essayée au niveau immédiatement supérieur. Ce processus est ensuite poursuivi jusqu'à épuisement de toutes les éprouvettes (15 dans notre cas). La limite d'endurance à 50% d'éprouvettes rompues est donnée par la moyenne statistique des résultats obtenus.

$$s_D = s_0 + d \left( \frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$s_0$  : la plus faible contrainte utilisée ;

$d$  : l'espacement des niveaux successifs ;

$N = \sum N_i$  : nombre total des réponses les moins fréquentes ;

$A = \sum iN_i$  : la somme des produits du nombre de réponses considérées à chaque niveau par le rang  $i$  de ce niveau ;

Le tableau IV-1 présente l'ordre des essais avec le niveau des contraintes correspondant. Les éprouvettes rompues sont désignées par o et celles non rompues par x.

**Tableau IV-1 : Ordre des essais**

s	Ordre des essais															i	N <sub>i</sub>	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
163											x						3	1
173	x						x		o		x		x				2	4
183	o		x		x		o		o				o		o		1	2
193				o		o											0	

x : éprouvette non rompue

o : éprouvette rompue.

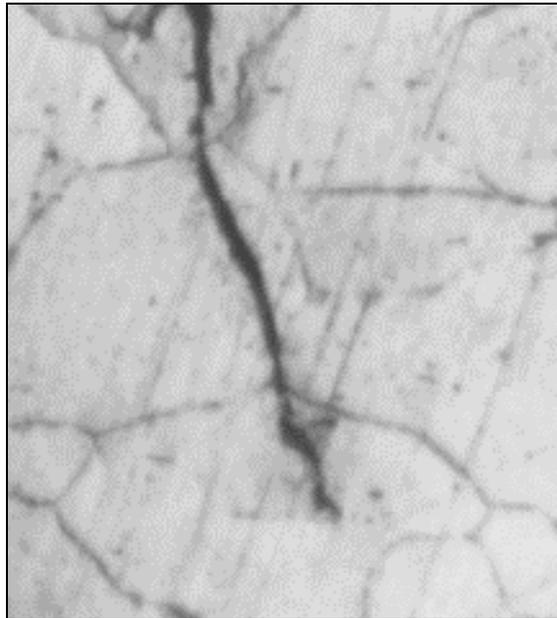
Sur les 15 éprouvettes utilisées, il y a eu 8 éprouvettes non rompues et 7 éprouvettes rompues à  $10^7$  cycles suivant les charges indiquées dans le tableau ci-dessus. Donc le type d'événements le moins fréquent est donc « éprouvette rompue ». En appliquant la formule (1) et en considérant les valeurs suivantes  $s_0=163$  MPa,  $d=10$  MPa,  $N = 7$ , nous obtenons la limite de notre matériau  $s_d = 178$  MPa.

Cette valeur est tout à fait cohérente avec la courbe de Wölher. Nous considérerons donc, pour la suite de notre travail, que la limite d'endurance du fer ARMCO utilisé est de 178 MPa. Rappelons que la limite élastique est de 197 MPa.

## 2.3 EVOLUTION MICROSTRUCTURALE

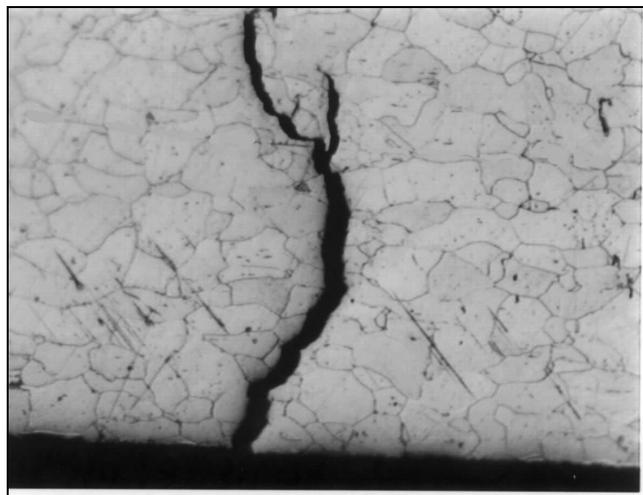
Dans l'étude bibliographique (chapitre I paragraphe 6.1), il apparaît que l'endommagement par fatigue peut se produire suivant deux mécanismes assez différents : l'un appelé haute température qui se rapproche du comportement des CFC, avec apparition de bandes de glissements persistantes qui conduisent à un amorçage de la fissuration intragranulaire, l'autre basse température plus spécifique des CC correspond à des incompatibilités de déformations

entre grains qui aboutissent à un amorçage de la fissuration en intergranulaire. Compte tenu de la vitesse de déformation utilisée è de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-2}$  et de la température de  $35^{\circ}\text{C}$ , nous nous trouvons probablement d'après MAGNIN et al [49], [50], dans une zone intermédiaire. Profitant des essais réalisés pour déterminer la courbe de Wölher nous avons effectué des prélèvements d'échantillons afin de faire quelques observations microstructurales. La première série porte sur l'extrémité des fissures. Elle a été réalisée sur des pièces non rompues. La micrographie (photo IV-1) obtenue en microscopie optique grossissement  $50\times 10$ , après polissage mécanique et attaque au Nital à 4%, représente à fort grossissement le début d'une fissure.



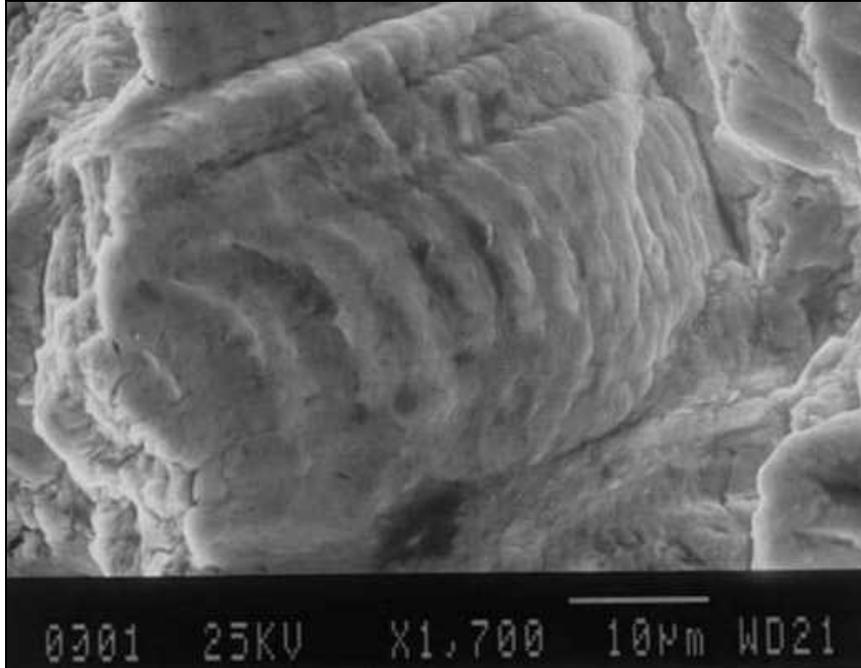
**Photo IV-1** : Fissure transgranulaire

On observe très nettement une propagation transgranulaire. La micrographie (photo IV-2) obtenue également en microscopie optique mais à grossissement plus faible et près de la surface (partie sombre en bas de la photo) montre également une progression transgranulaire de la fissure. Beaucoup de grains semblent coupés en deux. On observe également des ramifications.



**Photo IV-2** : Fissure

La micrographie (photo IV-3) obtenue au Microscope à Balayage sur la surface de fracture d'une pièce rompue montre un grain de ferrite sectionné par la fissure et présentant des stries qui correspondent aux cycles de fatigue. Cette structure est caractéristique d'un faciès de rupture par fatigue transgranulaire. Le joint de grain ne constituant pas un obstacle à la propagation de la fissure.



**Photo IV-3** : Observation du faciès de rupture

Toutes ces observations concordent pour attester que nous avons à faire à une propagation de fissure transgranulaire. Nous avons par ailleurs observé, sur le même échantillon, de nombreuses autres familles de fissures en cours de propagation (multifissuration). À la suite de ces observations, il est possible de conclure que pour notre matériau, du fer presque pur (microstructure uniquement ferritique), pour une température de l'ordre de 35°C et pour la vitesse de sollicitation, le mode d'endommagement est plutôt haute température. Ce résultat n'est pas tout à fait en accord avec les travaux de MAGNIN et al. Mais la grande différence provient probablement de la nature de l'acier le nôtre est beaucoup plus ductile donc une plus grande mobilité des dislocations ce qui se traduit probablement par un décalage des courbes (figure I-29 du chapitre I) vers la droite.

### **3 MESURES MAGNETOMECHANQUES ; LES DIFFERENTS PARAMETRES**

Nous disposons d'un équipement performant permettant d'appliquer une sollicitation en flexion rotative et de mesurer le bruit magnéto-mécanique de manière fiable cf. chapitre III. Avant d'entreprendre l'étude de la fatigue proprement dite, il nous a semblé important de quantifier les influences des différents paramètres. Nous décrirons successivement l'influence de la température, de la vitesse de rotation et de la contrainte de flexion.

### 3.1 LA TEMPERATURE

Ce chapitre comporte deux parties : tout d'abord, la quantification de l'échauffement induit par la déformation cyclique, ensuite pour une même sollicitation cyclique, nous avons porté l'éprouvette à différentes températures et suivi l'évolution du signal magnétomécanique. Les conditions expérimentales communes sont résumées dans le tableau suivant :

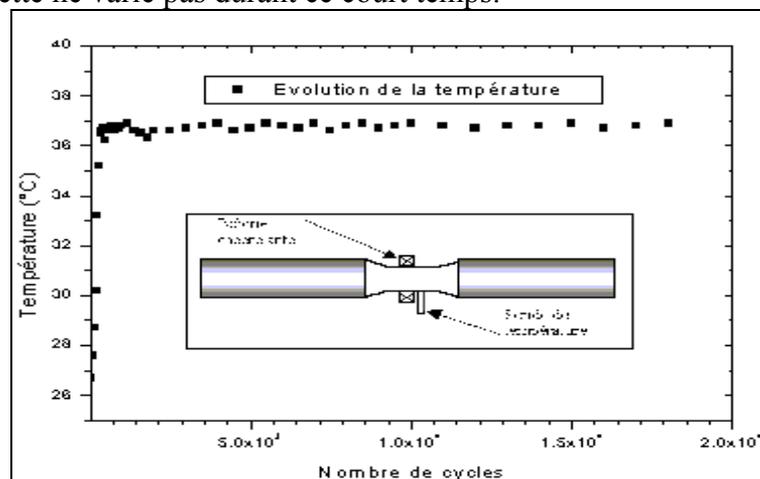
**Tableau 2** : Conditions expérimentales

Excitation mécanique	
Éprouvette	Fer ARMCO, recuite, diamètre utile 10mm
Contrainte	190 MPa
Vitesse de rotation	1000 tr/min
Mesure du signal magnétomécanique	
Capteur	Type : bobine encerclante Nombre de spires : 150 $\varnothing$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : 110
Filtre 3	Bande : 100 kHz – 2 MHz
Amplificateur large bande	Gain : 100 en 2 étages
Module RMS	Constante de temps : 25 ms

#### 3.1.1 température induite par la déformation

Il est admis que lors de l'essai de fatigue, la température au sein de l'éprouvette augmente d'une manière plus ou moins importante. La température d'équilibre est atteinte après un certain temps de déroulement de l'essai. Nous voulons savoir d'abord si cette température est importante et ensuite si son évolution a un effet sur la mesure magnétomécanique.

La mesure de la température est réalisée au niveau de la partie utile de l'éprouvette juste à côté de la bobine encerclante. Nous utilisons une très petite sonde de surface en platine de 100W (ref Correge sonde pt100 PTE 101 T) qui est couplée thermiquement par une goutte d'huile. La mesure ne peut pas être faite en continu, la machine est donc périodiquement arrêtée. La mesure étant très rapide (15 secondes), on considère que la température de la zone utile de l'éprouvette ne varie pas durant ce court temps.



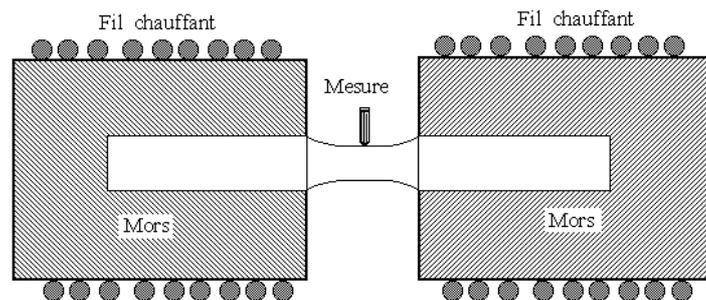
**Figure IV-2** : Evolution de la température en fonction du nombre de cycles

La figure IV-2 montre l'évolution de la température en fonction du nombre de cycles. Nous observons une augmentation de la température au tout de début du cyclage. Après la température atteint un palier et ne varie pratiquement pas. Nous pouvons admettre raisonnablement que l'échauffement induit par la déformation cyclique reste faible, moins de 10°C, et ne doit donc pas avoir de répercussion sur le processus de fatigue. Par contre il est important de déterminer si cette évolution affecte la mesure magnétomécanique elle même.

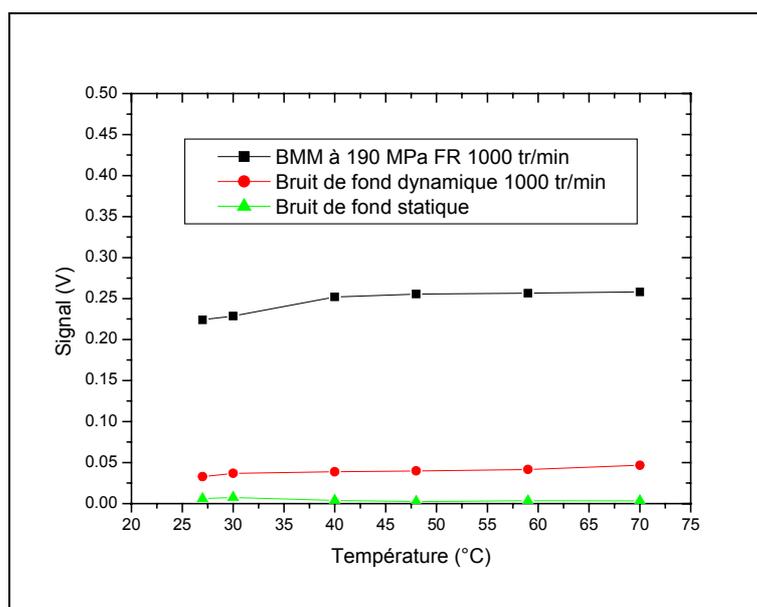
### 3.1.2 Évolution des différents bruits en fonction de la température

Nous nous proposons de déterminer l'influence réelle de la température sur l'évolution des différents bruits décrits au chapitre II en fonction de la température de l'éprouvette. L'éprouvette a été chauffée à l'aide d'un ruban chauffant enroulé autour des deux mors cf. figure IV-3. Nous tenons à faire remarquer que ces deux mors sont relativement massifs devant les dimensions de l'éprouvette ce qui permet d'avoir une inertie thermique appréciable. L'éprouvette est ainsi chauffée très progressivement pour atteindre la température de 70°C au niveau de la partie utile. La température est mesurée par le même dispositif que précédemment.

Après quoi, nous effectuons les mesures des différents bruits : électronique, dynamique et magnétomécanique et ce à différentes températures au fur et à mesure que l'éprouvette refroidit.



**Figure IV-3 :** Schéma de chauffage de l'éprouvette



**Figure IV-4 :** Evolution des bruits en fonction de la température

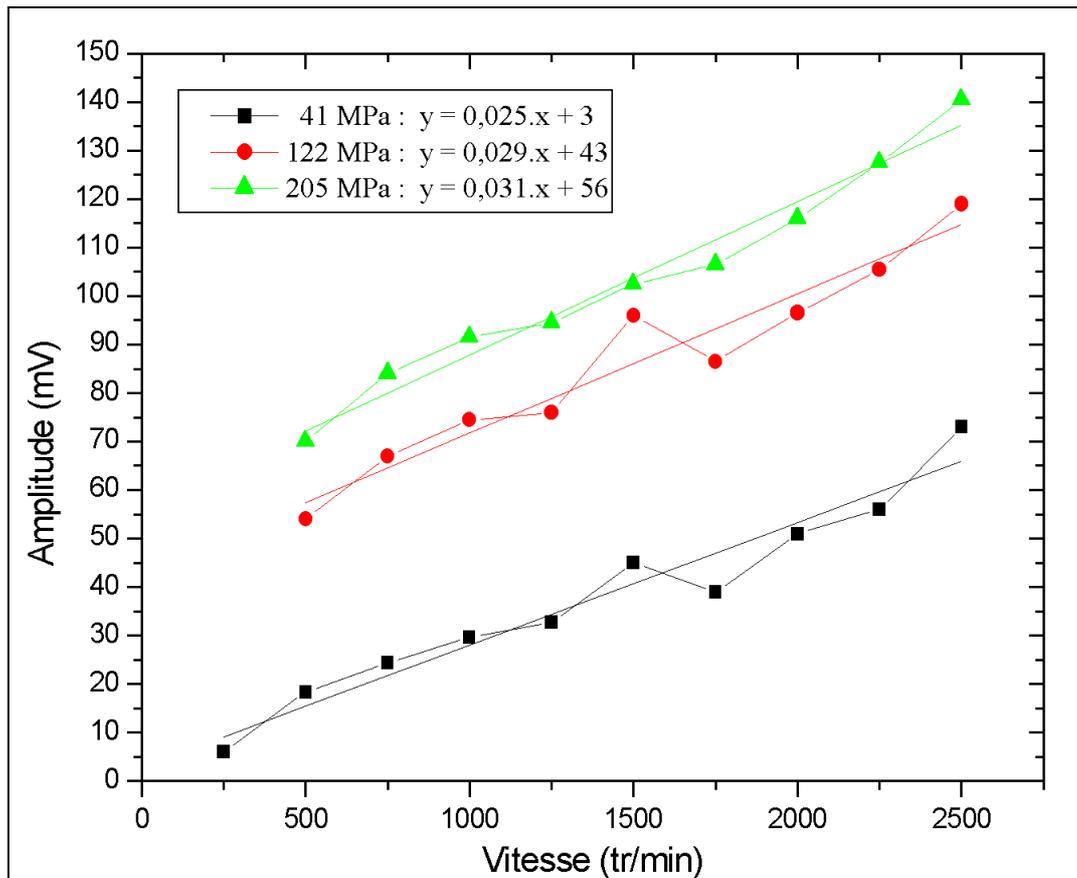
On observe une très légère augmentation du signal magnétomécanique mais de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la mesure et de la reproductibilité. Il est donc raisonnable de considérer que dans la gamme de température 30 – 70 °C le signal magnétomécanique est peu affecté par la température. Ce résultat est très important car d'une part, les essais sont relativement longs parfois plusieurs jours et le local où ils sont effectués n'est pas climatisé ; d'autre part, si des variations sont observées sur le signal magnétomécanique en début d'essai, ils ne seront pas imputables à l'échauffement de l'éprouvette.

### 3.2 INFLUENCE DE LA VITESSE D'APPLICATION DE LA CONTRAINTE

Comme il a été décrit dans la partie bibliographique, la vitesse d'application de la contrainte (vitesse de rotation dans notre cas) est un paramètre influent. A plusieurs titres, elle joue un rôle prépondérant sur l'essai de fatigue et peut favoriser certains comportements et en inhiber d'autres, elle intervient sur la mesure proprement dite puisqu'elle fait varier le nombre d'événements (sauts de parois) que le capteur mesure par unité de temps, elle peut jouer sur la sensibilité même de la mesure par le biais du traînage magnétique dans le cas du fer à bas carbone ; enfin elle intervient sur la durée globale de l'essai. La machine est équipée d'un moteur à vitesse variable pilotée électroniquement, ce qui nous permet de faire varier la vitesse de rotation de 0 à 3000 tr/mn. Tous les autres paramètres seront fixés. La caractérisation est effectuée pour quatre niveaux de contrainte.

**Tableau IV-3** : Conditions expérimentales

<b>Excitation mécanique</b>	
Éprouvette : fer ARMCO ; diamètre utile 10 mm	
Contraintes	0, 41, 122, 205 MPa
Vitesses de rotation	0 à 2500 tr/min
<b>Mesure du signal magnétomécanique</b>	
Capteur	Type : bobine encerclante de section Nombre de spires : 150 $\varnothing$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : 110
Filtre 3	Bande : 100 kHz – 2 MHz
Amplificateur large bande	Gain : 100 en 2 étages
Module RMS	Constante de temps : 25 ms
Température du local :	27 °C



**Figure IV-5 :** Evolution du bruit magnétomécanique en fonction de la vitesse d'application de la sollicitation, flexion rotative (matériau : fer Armco recuit).

La figure IV-5 représente l'amplitude du signal magnétomécanique, en fonction de la vitesse de rotation, pour trois niveaux de contraintes (41, 122, 205 MPa).

Nous constatons pour les différentes contraintes, une croissance presque linéaire du signal en fonction de la vitesse de rotation, avec des pentes assez proches.

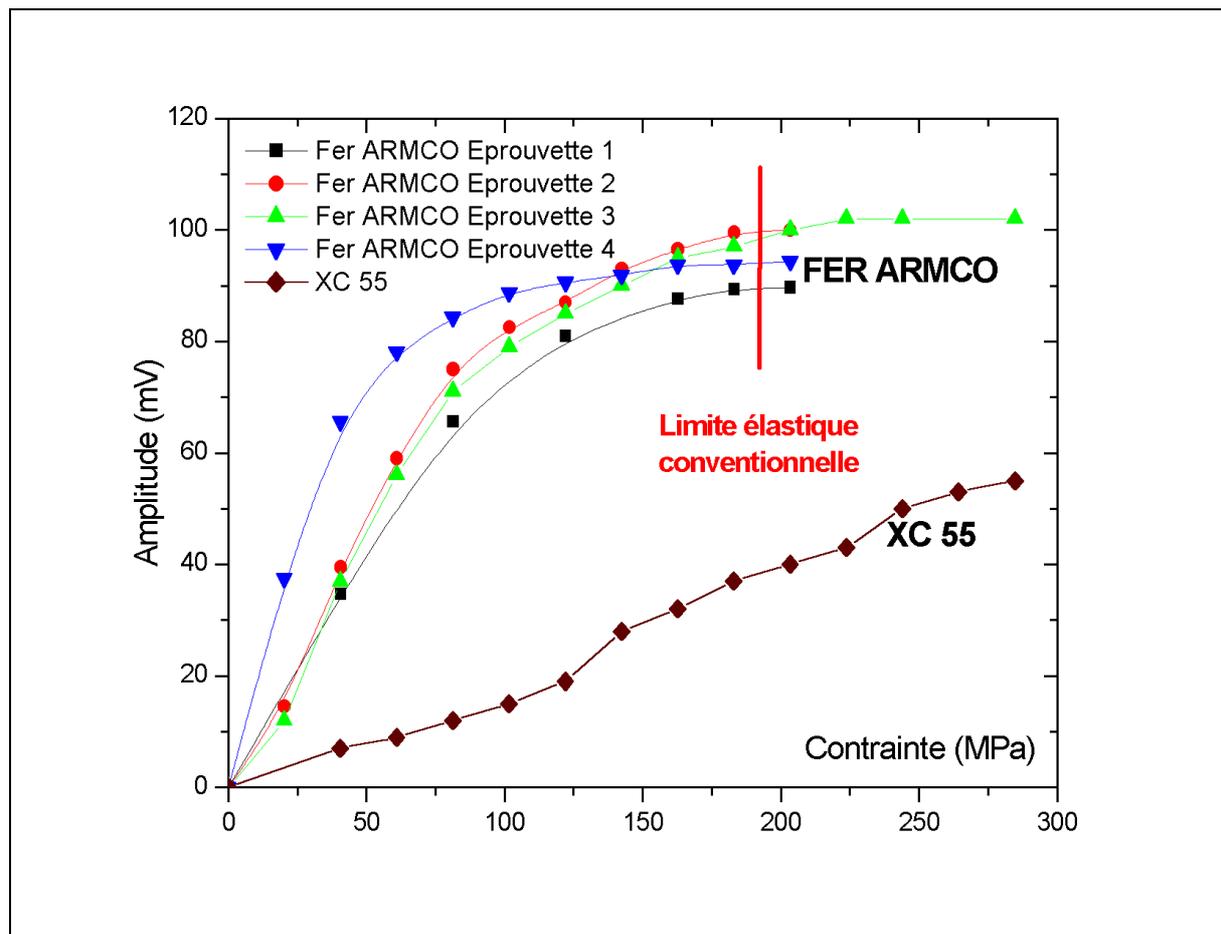
Nous avons déjà obtenu un résultat analogue en sollicitation traction-compression sur machine de fatigue hydraulique (chapitre II-2-3). Rappelons l'interprétation qui est la même : la mesure représente la valeur efficace du signal. Si on fait l'hypothèse d'un nombre d'événements constant ; lorsque la vitesse de rotation augmente, le nombre d'événements par unité de temps croît proportionnellement. Ce résultat est donc conforme à ce que nous attendions et confirme que la mesure caractérise bien le bruit d'origine magnétomécanique. Par contre la proportionnalité n'est pas la même en fonction de la contrainte. Nous expliquerons cette différence dans le paragraphe suivant.

Nous devons à ce stade fixer une vitesse d'essai. Si elle est faible, le signal sera plus ténu et l'essai durera plus longtemps. Nous avons observé, pour les grandes vitesses de rotation, une instabilité de notre appareillage (vibrations) et une augmentation de la température de l'éprouvette. Par ailleurs, nous avons montré que dans le paragraphe 5-3 Chapitre III que le bruit dynamique, c'est-à-dire machine tournant mais sans charge, présentait une anomalie vers 1500 tr/mn probablement due à des harmoniques du 50 Hz. On retrouve un peu cette anomalie sur les courbes de la figure IV-5. Il est donc préférable d'éviter la plage au voisinage de 1500 tr/mn.

### 3.3 AMPLITUDE DU SIGNAL EN FONCTION DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE

Nous avons observé dans le paragraphe précédent que le signal augmentait en fonction de la contrainte appliquée. Nous allons chercher à quantifier et expliquer cette augmentation. Les conditions expérimentales sont identiques à celles exposées dans le tableau IV-1, la vitesse de rotation est fixée à 1000 tr/min et la contrainte varie de 0 à 285 MPa.

Dans cette partie, nous avons utilisé deux matériaux : fer ARMCO (4 éprouvettes) et l'acier XC55, tous deux à l'état recuit, avec des éprouvettes cylindriques (cf. figure III-16 du chapitre III). Cette forme d'éprouvette permet d'utiliser le même capteur pour plusieurs éprouvettes. Ce qui permet d'améliorer la reproductibilité et les comparaisons.



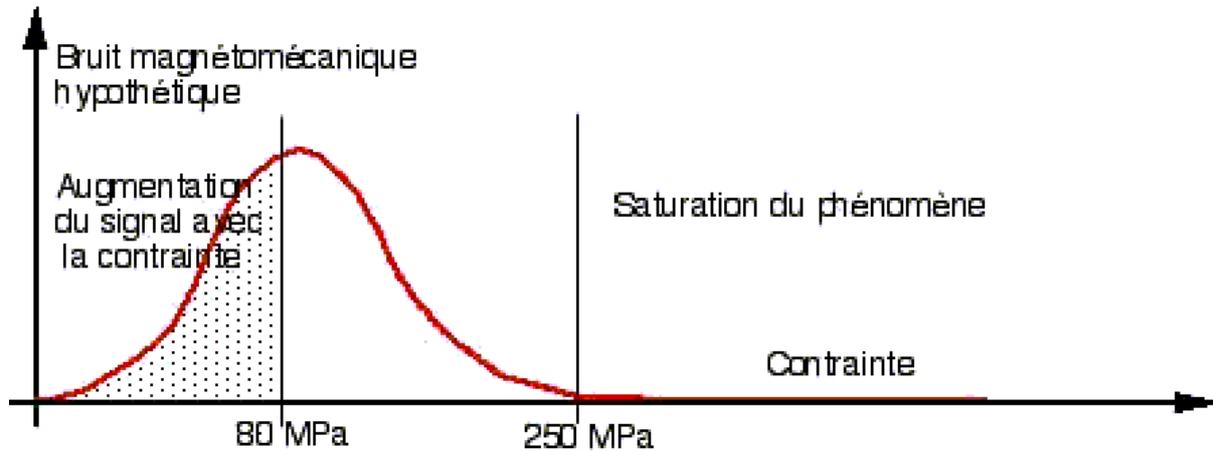
**Figure IV-6 :** Evolution du signal magnéto-mécanique en fonction de la Contrainte maximum.

La figure IV-6 représente, pour les deux matériaux, l'évolution du signal magnéto-mécanique en fonction de la contrainte.

**Pour le Fer ARMCO** ; au début, le signal augmente rapidement d'une manière presque linéaire jusque vers 80 MPa. Il présente une sorte d'asymptote horizontale au-dessus de 180 MPa. Il semble que le phénomène sature.

Cette saturation peut s'expliquer par le fait que le bruit magnéto-mécanique se produit pour des contraintes assez faibles. Si la contrainte appliquée est suffisante pour entraîner la modification de tous les domaines possibles, une contrainte plus forte n'apportera pas de nouveaux événements.

La première partie s'explique simplement par le fait que lorsque la contrainte croît, on va plus loin sur la courbe du bruit magnétomécanique c'est-à-dire qu'on provoque davantage d'événements.



**Figure IV-7 :** Evolution schématique du bruit magnétomécanique en fonction de la contrainte

Le schéma ci-dessus (Figure IV-7) représente sous la forme d'une courbe vaguement gaussienne un signal magnétomécanique hypothétique en fonction de la contrainte.

Le signal mesuré par notre méthode représente la valeur efficace. Il est approximativement proportionnel à l'aire sous la courbe. Suivant la contrainte atteinte, la surface sera plus ou moins grande ; exemple la surface en pointillés pour une contrainte maximale de 80 MPa.

Entre 0 et 80 MPa, l'aire augmente rapidement en fonction de l'amplitude maximale atteinte.

Entre 80 MPa et la saturation, il existe un domaine intermédiaire qui correspond à la décroissance de l'activité magnétomécanique.

Nous ne faisons pas intervenir dans cette discussion l'effet de la diminution de la contrainte avec la profondeur, car nous pensons que compte tenu de la gamme de fréquence concernée, les signaux ne peuvent provenir que de l'extrême surface et correspondent donc à la contrainte en surface.

On remarque que la partie asymptotique correspond aux contraintes supérieures à la limite élastique conventionnelle. Ce type de résultat avait été observé par D.W. SHIN dans son travail de thèse [28].

La dispersion est importante aux faibles contraintes, elle est attribuée à la très grande sensibilité du BMM à l'état de contrainte interne du matériau. Il est fort possible qu'au montage de l'éprouvette 4, nous l'ayons légèrement endommagée. Par contre la reproductibilité aux fortes contraintes est tout à fait acceptable.

Dans le paragraphe 2-1 au début de ce chapitre, la limite d'endurance a été déterminée (178 MPa). Les essais de caractérisation de l'endommagement se passeront donc au voisinage de cette contrainte, légèrement en dessous et légèrement en dessus. Nous constatons que nous nous trouvons au début de la saturation ce qui semble très favorable car nous allons prendre en compte l'ensemble du phénomène.

**Pour l'acier XC55 à l'état recuit**, nous obtenons un signal beaucoup plus faible qui croît pratiquement de manière linéaire avec la contrainte. Nous interprétons ce résultat comme pour le signal Barkhausen par un étalement du phénomène vers les plus fortes contraintes, dû au freinage des déplacements des parois de Bloch au sein de la perlite. Pour des contraintes inférieures à 300 MPa, valeur assez faible pour cet acier, nous ne devons pas avoir atteint le maximum de la courbe ; le phénomène n'est donc pas encore saturé.

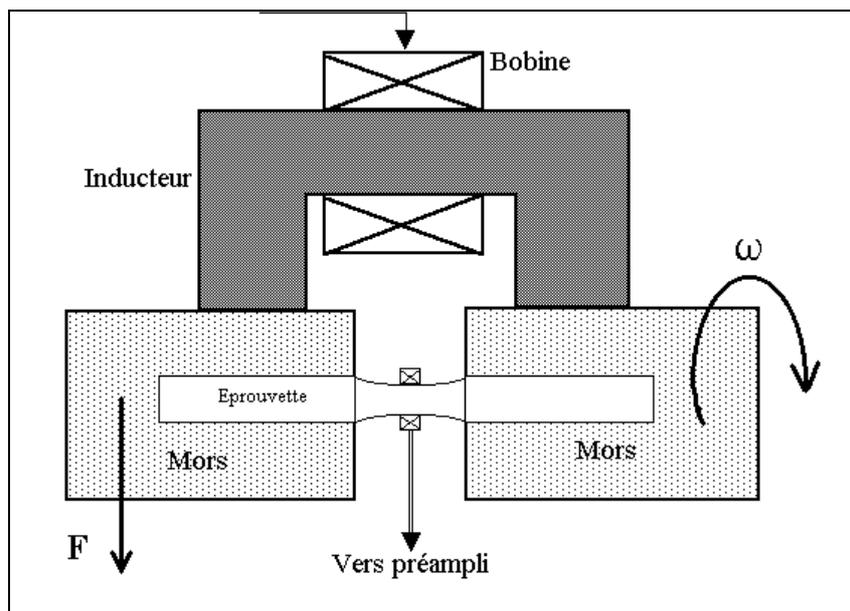
### 3.4 ESSAI COMPLEMENTAIRE : SUPERPOSITION D'UN CHAMP MAGNETIQUE CONSTANT DANS LE SENS LONGITUDINAL DE L'EPROUVETTE

Profitant de la possibilité offerte par notre dispositif expérimental, nous avons réalisé un essai complémentaire en appliquant un champ magnétique constant dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Cette expérience a pour but de saturer le matériau magnétiquement, les moments magnétiques des atomes de fer devraient donc normalement être tous orientés dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Il ne devrait plus y avoir de domaines de WEISS et donc plus de parois de BLOCH.

Le champ magnétique est produit par l'intermédiaire d'un gros inducteur en U appliqué sur les mors de la machine cf. figure IV-8. Un champ, de l'ordre de 2 KA/m, est ainsi obtenu au voisinage de la partie utile de l'éprouvette.

Le tableau suivant résume les conditions expérimentales :

Excitation mécanique	
Éprouvette : fer ARMCO ; diamètre utile 10 mm	
Contrainte maxi	190 MPa
Vitesse de rotation	1000 tr/min.
Mesure du signal magnétomécanique	
Capteur	Type : bobine encerclante de section Nombre de spires : 150 $\phi$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : *110
Filtre 3	Bande 100 kHz - 2 MHz
Amplificateur large bande	Gain : *100 en 2 étages
Module RMS	Constante de temps : 25 ms
Pas d'acquisition	20 secondes



**Figure IV-8 :** Schéma : mesure du BMM sous champ magnétique

Dans le tableau, nous présentons les valeurs efficaces des différents bruits d'une part dans le cas où il n'y a pas de champ appliqué et d'autre part le cas où un champ constant est appliqué.

**Tableau IV-4** : Valeurs efficaces des bruits avec ou sans champ magnétique appliqué

	Sans champ magnétique	Avec champ magnétique
<i>Bruit électronique</i>	22 mV	26 mV
<i>Bruit dynamique</i>	40 mV	45 mV
<i>Signal total</i>	180 mV	138 mV
<i>Bruit magnétomécanique</i>	140 mV	83 mV

Nous constatons que le bruit électronique a augmenté légèrement (+4mV), ce qui semble tout à fait normal. En effet, l'application d'un champ magnétique introduit des perturbations électromagnétiques.

Le bruit d'origine purement magnétomécanique sous champ est encore de 83 mV. Il a effectivement beaucoup diminué, mais il est loin d'être nul comme le laissait prévoir la théorie.

Probablement, en raison de la rotation de l'éprouvette, nous introduisons le courant de Foucault. C'est pourquoi, nous ne saturons pas l'éprouvette.

Il faut rappeler que nous ne prenons que la partie très haute fréquence des événements.

Le champ est longitudinal, ce qui veut dire qu'il favorise les mêmes domaines que la traction. Mais chaque partie de la surface de l'éprouvette passe alternativement de la traction à la compression. Ce résultat veut-il dire que la contrainte de compression est suffisante pour remettre en mouvement des parois ou créer de nouveaux domaines ?

Compte tenu du temps imparti, nous n'avons pas eu l'opportunité d'approfondir ce point.

## 4 SUIVI EN FATIGUE

Ayant déterminé la limite de fatigue de notre matériau dans le paragraphe précédent et quantifié les influences de certains paramètres expérimentaux, nous allons maintenant faire un suivi en continu (in situ) du bruit magnéto-mécanique lors des essais de fatigue. Ces essais ont été effectués avec des sollicitations de part et d'autre de cette limite. Dans le tableau ci-dessus, nous rappelons les principales conditions expérimentales :

**Tableau IV- 5 : Les principales conditions expérimentales**

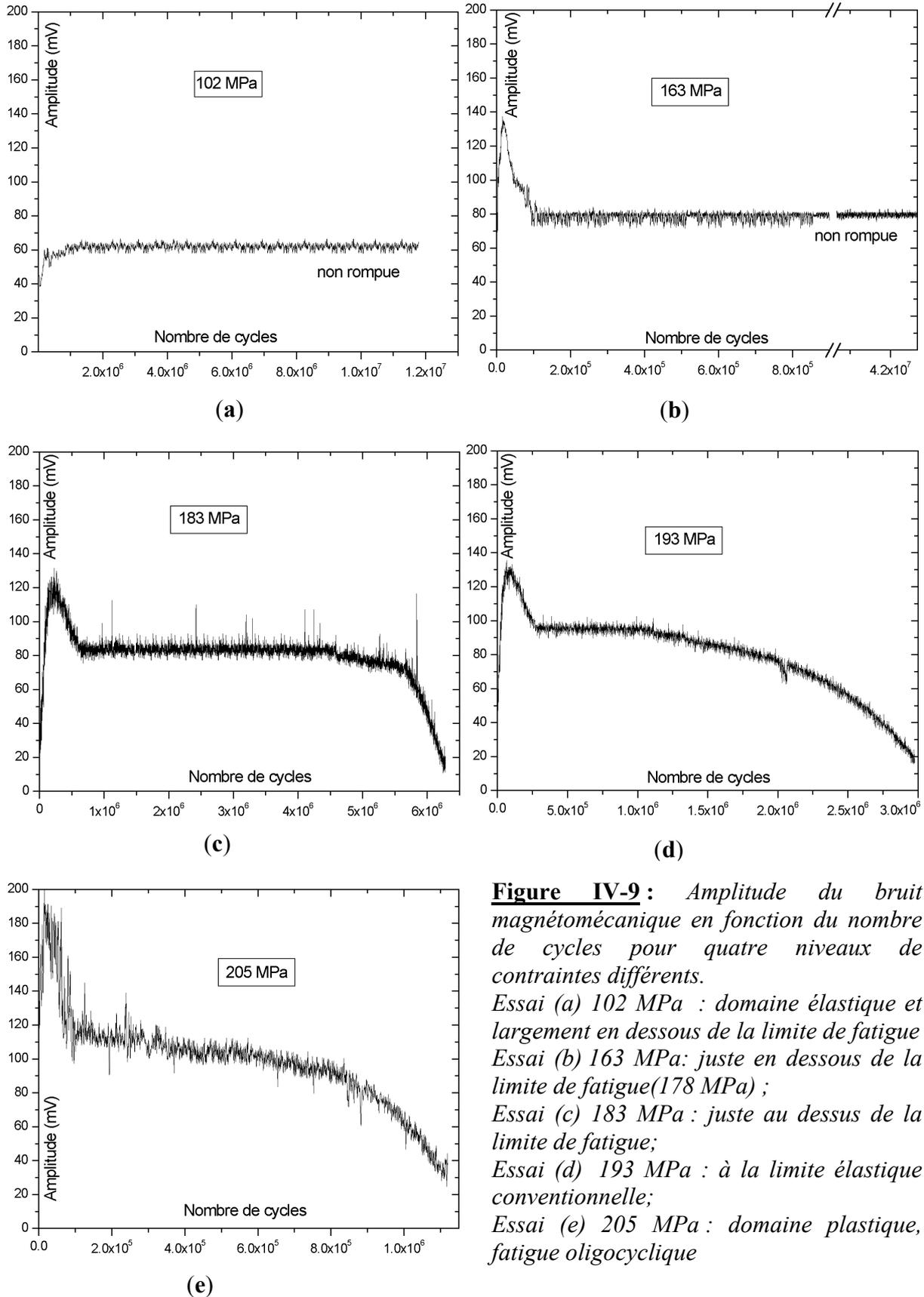
<b>Température</b>	
Local	27 °C
<b>Eprouvette / Matériau</b>	
Eprouvette	forme alter, diamètre utile 10mm
Limite d'endurance	178 MPa
Matériau	Fer ARMCO, recuit
<b>Excitation mécanique</b>	
Contrainte	102-205 MPa
Vitesse de rotation	1000 tr/mn
<b>Mesure du signal magnéto-mécanique</b>	
Capteur	Type : bobine encerclante Nombre de spires : 150 $\varnothing$ fil = 0,1 mm
Préamplificateur	Gain : 110
Filtre 3	Bande : 100 kHz – 2 MHz
Amplificateur large bande	Gain : 100 en 2 étages
Module RMS	Constante de temps : 25 ms
<b>Acquisition et archivage du signal</b>	
Intervalle d'acquisition	0.05 min

Pour une charge donnée, nous lançons l'acquisition du bruit magnéto-mécanique (comme décrit dans le chapitre III) jusqu'à la rupture. S'il n'y a pas rupture nous arrêtons l'essai vers  $10^7$  cycles.

### 4.1 RESULTATS - INTERPRETATIONS

#### 4.1.1 Résultats

Sur la figure VI-9, nous représentons quelques exemples typiques de bruits magnéto-mécaniques en fonction du nombre de cycles tels qu'ils ont été acquis après soustraction du bruit dynamique. Compte tenu de la durée variable des essais, l'échelle des abscisses est différente pour les 5 essais.



**Figure IV-9 :** Amplitude du bruit magnétomécanique en fonction du nombre de cycles pour quatre niveaux de contraintes différents.

Essai (a) 102 MPa : domaine élastique et largement en dessous de la limite de fatigue

Essai (b) 163 MPa: juste en dessous de la limite de fatigue(178 MPa) ;

Essai (c) 183 MPa : juste au dessus de la limite de fatigue;

Essai (d) 193 MPa : à la limite élastique conventionnelle;

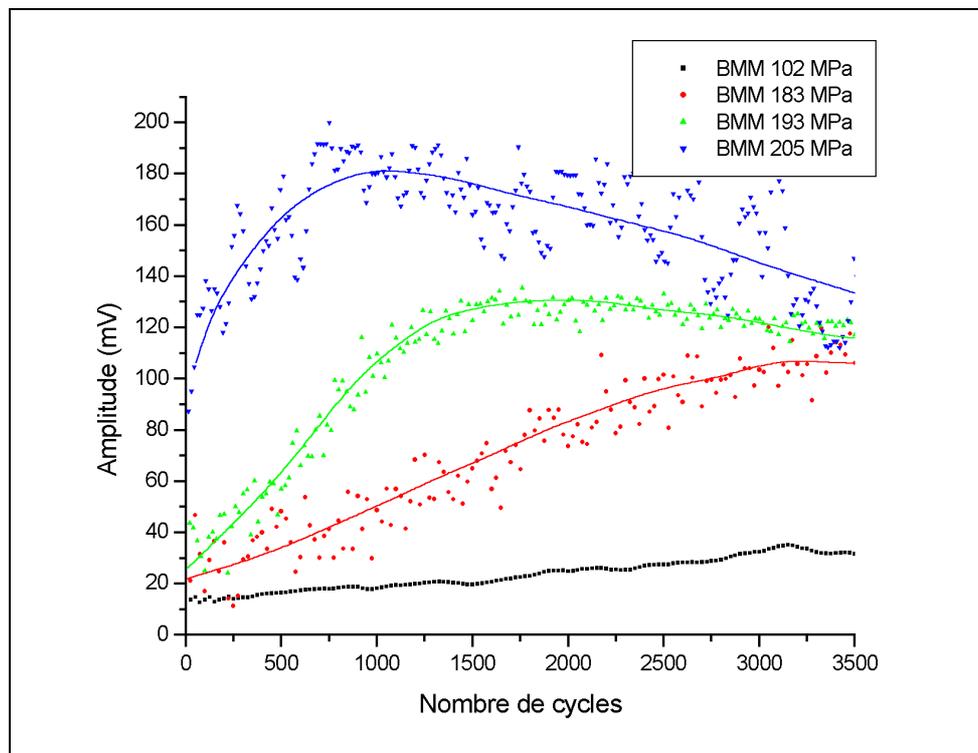
Essai (e) 205 MPa : domaine plastique, fatigue oligocyclique

Compte tenu de la forme de la courbe, nous distinguons quatre stades d'évolution en fonction du nombre de cycles.

- Premier stade : quelques centaines à quelques milliers cycles, variable selon la contrainte appliquée, est caractérisé par une augmentation importante du signal rapide suivant une loi plus ou moins linéaire pour atteindre un maximum (Cf. figure IV-10).
- Deuxième stade : le signal décroît sensiblement.
- Troisième stade : le signal se stabilise, la longueur de ce palier est variable en fonction de la contrainte appliquée à l'éprouvette, pour les fortes contraintes l'étendue de cette phase stationnaire diminue et elle tend à n'être qu'une simple inflexion pour la contrainte de 205 MPa.
- Quatrième stade : une chute progressive du signal jusqu'à la rupture.

Il est à remarquer que cette forme d'évolution concerne toutes les courbes qui sont au-dessus de la limite de fatigue à part la différence qui se situe au niveau de la longueur et de l'amplitude du plateau et au niveau de la position du pic. Pour les contraintes, légèrement au-dessous de la limite de fatigue, par exemple pour la contrainte de 163 MPa, l'allure de la courbe ne possède pas la dernière étape. Le palier continue au-delà  $10^7$  cycles, c'est -à dire, l'éprouvette n'a pas rompu à ce stade.

Pour une contrainte faible par rapport à la limite d'endurance, (102 MPa par exemple), nous n'observons pas le passage par un maximum. Le signal est caractérisé par une croissance progressive jusqu'à une valeur constante qui se conserve tout le long de la vie de l'éprouvette.



**Figure IV- 10 :** Début des essais : amplitude du bruit magnétomécanique pour les 3500 premiers cycles pour les différentes contraintes

### 4.1.2 Interprétation

Premier stade : Nous avons reporté sur la figure IV-10 les amplitudes du signal magnétomécanique des 5 essais en fonction du nombre de cycles pour les 3500 premiers cycles. On observe une croissance rapide et importante du signal et ce, d'autant plus que la contrainte appliquée est forte. Le signal est presque multiplié par 10 pour les fortes contraintes.

L'augmentation du signal reflète une augmentation de l'activité magnétomécanique c'est-à-dire des mouvements des parois à 90°. Il correspond soit à une plus grande mobilité des parois déjà mobiles, soit à une augmentation du volume de matière concerné par la réorganisation de la microstructure magnétique sous l'effet de la contrainte variable.

Comme nous l'avons noté au Chapitre I paragraphe 2.6, notre matériau est probablement sensible au traînage magnétique (0,03% de carbone). Compte tenu de la fréquence de sollicitation assez rapide (16,7 Hz), il est probable que les atomes de carbone n'aient pas le temps de regagner les sites favorables. L'alternance de la contrainte peut entraîner une agitation suffisante pour que les atomes de carbone quittent les sites qu'ils occupaient (puits de potentiel) pour prendre des positions aléatoires. Cette dispersion progressive des atomes de carbone annulerait alors la stabilisation magnétique des domaines. Les mesures magnétomécaniques concernent principalement les mouvements des parois à 90° qui sont les plus sujets à l'effet de traînage magnétique (cf. Figure I-9), de plus ce phénomène étant thermiquement activé, il est normal qu'il soit progressif et asymptotique.

Dans le chapitre II paragraphe 4.3, nous avons remarqué qu'à la traction correspondaient deux configurations possibles de domaines magnétiques et qu'à la compression, il en correspondait quatre. Mais ces quatre configurations ne sont pas équivalentes deux sont un peu plus favorables et progressivement les orientations magnétiques en compression de tous les grains vont tendre vers ces directions favorables. V. RENAULT [52] avait déjà observé un phénomène analogue d'alignement progressif des orientations de magnétisation lors d'essais de tractions interrompus.

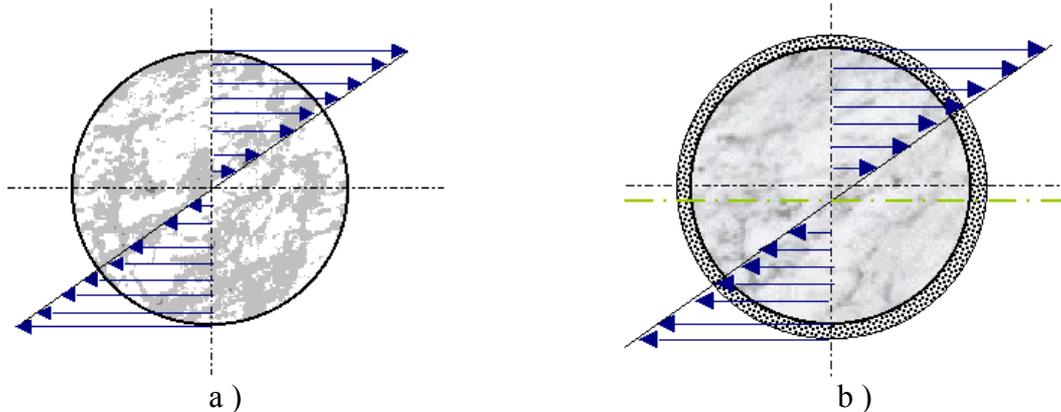
En conclusion : deux raisons peuvent être évoquées pour expliquer l'augmentation du signal : d'une part, une plus grande mobilité des parois à 90° due à la suppression du phénomène de traînage magnétique par l'agitation mécanique et d'autre part, une réorganisation des orientations des domaines magnétiques dans certains cristaux qui deviennent, de ce fait, de plus en plus nombreux à être concernés par la réorganisation magnétique sous l'effet de la contrainte variable (une sorte d'apprentissage des cristaux).

Deuxième stade : Il correspond à une décroissance du signal. Il faut remarquer que pour la plus faible contrainte (102 MPa), loin de la limite de fatigue, la courbe ne présente pas ce stade.

Il correspond à une diminution de la mobilité des parois à 90°. L'effet « fatigue » correspond à une modification de la microstructure de dislocations : multiplication de ces dernières et organisation en cellules ou en bandes. Cette microstructure de dislocations interagit avec les parois de Bloch et freine leurs déplacements (cf. résultats et interprétations de J. LAMONTANARA [16] et J. SARETE [15]).

Troisième stade : Il correspond à un palier plus ou moins étendu. Très marqué pour les faibles contraintes, il présente à peine une inflexion pour la contrainte la plus forte. Il correspond à une stabilisation d'une part de la microstructure de dislocations d'autre part du nombre d'événements magnétomécaniques (mobilité des parois de Bloch).

Quatrième stade : Une décroissance progressive du signal est observée pour les essais conduisant à la rupture. Il n'apparaît pas sur les deux premiers essais. Elle est interprétée comme correspondant à la phase d'endommagement proprement dit (microfissuration). Cette microfissuration entraîne deux effets : une relaxation des contraintes internes au voisinage des fissures et une modification du champ de contrainte appliquée.



**Figure IV-11** : Répartition de la contrainte dans une section droite de l'éprouvette : a) dans le cas d'un état non endommagé ; b) dans le cas d'un état présentant des fissures en surface.

La figure IV-11 représente schématiquement le champ de contrainte appliqué :

- En l'absence d'endommagement dessin de gauche (le champ est symétrique en traction et compression et la fibre neutre est confondue avec l'axe de l'éprouvette) ;
- En présence de microfissuration dans la couche externe dessin de droite ; les microfissures se refermant en compression, le champ n'est plus symétrique, l'extrême surface est déchargée en traction, les contraintes maximales sont légèrement plus fortes et la fibre neutre est décalée vers le bas.

Parmi ces différentes modifications, la diminution de la contrainte de traction en extrême surface doit entraîner une diminution du signal magnétomécanique. Le déplacement de la fibre neutre ne doit pas intervenir. L'augmentation de la contrainte maximum doit entraîner une augmentation du signal, mais comme ce phénomène est en sous-couche en traction, il est probablement moins ressenti. Il semble donc que la diminution de la contrainte de traction soit le phénomène prépondérant. Ce résultat est très intéressant car il peut être pris comme un indicateur d'endommagement.

En conclusion : Le stade I est scientifiquement intéressant, son interprétation en termes de relâchement du traînage magnétique demanderait à être confirmée d'une part par des essais complémentaires et par d'autres méthodes : frottement intérieur, PTE ...). La transition stade III stade IV est particulièrement intéressante pour la caractérisation de l'endommagement et l'utilisation du bruit magnétomécanique comme moyen de détermination du potentiel restant. La décroissance du signal constitue une alerte suffisamment précoce pour permettre une interruption de l'utilisation avant rupture.

Dans le tableau ci-dessous nous avons cherché à exprimer la proportion de la vie de la structure avant endommagement.

**Tableau IV- 6 :** *le pourcentage de vie avant endommagement de différents essais.*

s	Rupture	Stade III/Stade IV	% de vie avant endommagement
102	non rompue	pas d'inflexion	100%
163	non rompue	pas d'inflexion	100%
limite de fatigue			
183	$6,3 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	68%
193	$3,2 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	30%
205	$1,1 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^5$	22%

## 5 CONCLUSION

Dans un premier temps, nous avons déterminé des paramètres mécaniques de la fatigue de manière à se placer en fatigue endurance avec une rupture vers  $10^7$  cycles. La courbe de Wöhler a été tracée et la limite d'endurance a été calculée par une méthode relativement précise. Des observations microstructurales par microscopie optique et microscope à balayage ont été faites. Celles-ci ont porté sur l'amorçage des fissures et sur le faciès de rupture. À la suite de ces observations, il est possible de conclure que pour notre matériau, du fer presque pur (microstructure uniquement ferritique), pour une température de l'ordre de  $35^\circ\text{C}$  et pour la vitesse de sollicitation, le mode d'endommagement est plutôt haute température.

De plus, nous avons étudié l'influence des différents paramètres de l'essai sur le bruit magnétomécanique : température, vitesse de rotation, contrainte ; cela nous a permis de quantifier et expliquer pour chaque paramètre l'évolution du bruit magnétomécanique.

Ensuite, nous avons effectué le suivi en continu, en fatigue endurance sur le fer Armco. Les essais ont été effectués à différents niveaux de sollicitation : légèrement inférieur puis supérieur à la limite d'endurance.

Les signaux obtenus caractérisés par quatre stades. L'exploitation de ces différents stades est apparue très intéressante. D'une part, il en ressort une influence non négligeable de l'effet du traînage magnétique dans le premier stade caractérisé par une augmentation importante du signal et d'autre part le stade quatre met bien en évidence l'endommagement du matériau, caractérisé par une chute du signal due à la microfissuration. Le bruit magnétomécanique peut de ce fait être un moyen de détermination du potentiel restant.



# **CONCLUSIONS & PERSPECTIVES**



## 1 CONCLUSIONS

Notre travail constitue une approche afin d'évaluer les potentialités de mesure du bruit magnétomécanique. Cette technique ayant été peu utilisée et peu étudiée, nous avons dû faire un bilan des connaissances sur ce sujet, puis nous avons cherché à nous approprier la technique expérimentale et les principaux résultats obtenus dans notre laboratoire. L'interprétation nous a conduit à approfondir les observations de microstructures magnétiques effectuées au microscope à effet Kerr et à proposer un modèle à 3 dimensions d'un cristal composé de domaines.

Nous avons ensuite étudié et construit une chaîne de mesure spécifique ainsi qu'une machine d'essai en flexion rotative. Rappelons que les essais ont été réalisés à la Faculté des Sciences Exactes et Appliquées de l'Université de N'Djaména (Tchad). Les résultats des mesures magnétomécaniques, effectuées en continu, in situ, lors d'essais en flexion rotative, sont intéressants et prometteurs. Ils ont été interprétés en termes d'interactions microstructure cristalline, microstructure magnétique faisant intervenir principalement la mobilité des parois à 90°.

Une diminution significative du signal magnétomécanique en début d'endommagement est observée pouvant conduire à une alerte. Ce qui laisse envisager l'utilisation de cette technique comme procédé de surveillance de structures tournantes fortement chargées. D'autre part une augmentation très importante du signal en début de la sollicitation cyclique nous semble scientifiquement très intéressante et a été discutée en faisant intervenir le traînage magnétique, ce qui ouvre des perspectives d'études en relation avec des techniques telles que le frottement intérieur, le PTE et évidemment les mesures magnétiques plus conventionnelles.

Dans le premier chapitre, nous rappelons les connaissances générales sur le ferromagnétisme en particulier à l'échelle de la microstructure magnétique. Son évolution est étudiée sous excitation magnétique ce qui conduit aux mesures Barkhausen proprement dites et sous excitation mécanique ce qui conduit aux mesures magnétomécaniques. Il ressort de cette étude que le signal magnétomécanique doit être faible car il ne concerne que les mouvements des parois à 90° qui sont relativement peu nombreuses dans une structure en équilibre. Dans le cas d'aciers à bas carbone il y a lieu de prendre en compte le phénomène de traînage magnétique très sensible à ce type de mouvements.

Dans le deuxième chapitre, dans le cadre de l'appropriation de la technique, nous avons repris et complété des essais effectués dans notre laboratoire en particulier des caractérisations comparatives par mesures magnétomécanique, Barkhausen et Pouvoir ThermoÉlectrique, appliquées à différentes microstructures d'un même acier à bas carbone (recuit, hypertrempé, revenu à différentes températures). Afin de mieux comprendre les résultats, nous avons également interprété au moyen du modèle de cristal magnétique à trois dimensions des observations de domaines magnétiques effectuées au microscope à effet Kerr et faisant intervenir des contraintes, appliquées ou internes.

Il apparaît de grandes différences entre les résultats Barkhausen et magnétomécaniques. D'une manière générale, le signal magnétomécanique n'est pas si ténu (cas du fer recuit), il semble donc qu'une partie importante du volume soit concernée par la réorganisation de la microstructure magnétique sous l'effet d'une contrainte sans remettre en cause le fait que cette réorganisation soit due à des mouvements de parois à 90°. Les différences entre les mesures magnétomécaniques et Barkhausen ont été interprétées en faisant intervenir la

différence de mobilité entre les parois à  $90^\circ$  et  $180^\circ$ . Il semble que le traînage magnétique et les précipités soient des obstacles très efficaces aux déplacements des parois à  $90^\circ$ . En d'autres termes, la contrainte est un faible moteur pour la modification de la microstructure magnétique. Mais si la contrainte est suffisante pour activer la mobilité des parois à  $90^\circ$ , il semble alors que la modification de microstructure magnétique touche un volume important de matière. Nous proposons un modèle qualitatif permettant d'expliquer à ce phénomène.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le dispositif expérimental que nous avons intégralement étudié et réalisé. La chaîne de mesure est beaucoup plus sensible que celle Barkhausen (gain 11 000 au lieu de 2 500) nous avons également élargi la bande passante jusqu'à 2MHz. Le rapport signal sur bruit est très satisfaisant, surtout aux hautes fréquences. Nous avons utilisé la plage (100 KHz à 2 MHz) pour toutes les mesures présentées.

La Machine de flexion rotative que nous avons réalisée, est à vitesse de rotation variable. L'application de la charge est mécanique afin d'être moins sensible aux parasites. Elle est constituée d'un poids déplaçable sur un fléau de type balance romaine. Nous rappelons également dans ce chapitre : la nature des matériaux utilisés (fer Armco et XC55) recuits et la forme des éprouvettes (cylindrique avec une gorge toroïdale à grand rayon).

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux et les interprétations. Nous avons dans un premier temps cherché à mettre en évidence l'influence des différents paramètres en les faisant varier un à un.

- La température : dans la plage 25-70 °C le signal semble pratiquement indépendant de la température pour la vitesse utilisée et en régime stabilisé (zone du plateau ; stade 3). Rappelons que les essais ont été réalisés au Tchad, à température ambiante 35°C.

- La vitesse de rotation : le signal croît avec la vitesse, mais cette croissance n'est pas linéaire comme on aurait pu s'y attendre.

- La contrainte appliquée : le signal croît avec la contrainte, mais le phénomène tend à saturer.

Une exploitation plus fine des résultats montre que si l'on reporte l'amplitude du signal en fonction de la vitesse d'application de la contrainte tous les résultats se retrouvent sur une courbe maîtresse.

Afin d'appliquer une contrainte judicieuse, nous avons cherché à déterminer la limite de fatigue par deux méthodes : courbe de Wöhler et méthode statistique en escalier. Les résultats sont cohérents et la limite de fatigue est estimée à 178 MPa. Rappelons que la limite élastique est de 197 MPa.

Cinq niveaux de sollicitations ont été choisis : faible contrainte dans le domaine élastique (102 MPa), juste en dessous de la limite de fatigue 173 MPa, juste au-dessus 183 MPa, à la limite élastique (193 MPa) et le plus haut possible dans le domaine plastique 205 MPa.

Les courbes représentant le signal magnétomécanique en fonction du nombre de cycles présentent 4 parties :

1) Une croissance rapide (quelques milliers de cycles) et importante du signal en début de cyclage est interprétée comme une augmentation du volume de matière sujet aux modifications de structure magnétique.

2) Le passage par un maximum suivi d'une décroissance, sauf pour la plus faible contrainte, est interprété comme l'interaction de la microstructure cristalline dislocations cellules d'écroutissage avec les parois de Bloch.

3) Un plus ou moins long plateau (infini pour les pièces non rompues), une simple inflexion pour la plus forte contrainte, est interprété comme une stabilisation de la microstructure cristalline et de son interaction avec les parois de Bloch.

4) Une décroissance progressive, bien avant la fin de vie et se terminant par la rupture de l'éprouvette. Cette phase est interprétée comme correspondant à l'endommagement proprement dit (microfissuration) entraînant une modification du champ de contrainte en surface.

Le premier stade a retenu particulièrement notre attention car le phénomène est très marqué le signal est multiplié par 10 pour les plus fortes contraintes. Une étude plus poussée des mécanismes mis en jeu semble très intéressante pour la compréhension de l'interaction : contrainte, mouvement des parois et structure cristalline. En particulier le traînage magnétique semble jouer un rôle important. Des mesures par des techniques voisines telles que microscopie à effet Kerr, frottement intérieur et PTE devraient permettre de confirmer ces hypothèses.

La transition entre les stades 3 et 4 semble intéressante du point de vu pratique car elle peut constituer un indicateur précoce d'endommagement. Dans la démarche « évaluation du potentiel restant », il serait envisageable de suivre en continu le signal magnétomécanique d'une pièce de révolution fortement chargée et tournante et de fixer un critère de diminution du signal afin d'effectuer un remplacement avant rupture.

Dans le chapitre V, nous avons tenté de modéliser les mouvements d'une paroi de Bloch à  $90^\circ$  soumise à l'action d'une contrainte. Partant d'un modèle développé dans notre laboratoire qui rend compte des mouvements de parois à  $180^\circ$  soumises à un champ magnétique croissant et qui se déplacent dans un milieu parsemé d'obstacles plus ou moins ancrants. Le but de ce modèle étant d'arriver à reproduire le bruit Barkhausen et de pouvoir ainsi étudier l'influence de différents paramètres.

Nous avons cherché à modéliser de la même façon le bruit magnétomécanique. De nombreuses hypothèses ont été nécessaires. Voici les principales.

- Notre modèle est unidimensionnel.
- Nous avons modélisé le mouvement d'une seule paroi à  $90^\circ$  (séparant deux domaines de direction de magnétisation perpendiculaire).
- La force de rappel, qui ramène la paroi vers sa position d'équilibre, a été obtenue en prenant en compte l'énergie magnétostatique. Nous avons traité le cas d'une paroi séparant un domaine de fermeture d'un domaine principal dans le cas du modèle à quatre domaines.
- La force motrice est évidemment constituée par la contrainte.
- Le milieu comporte des obstacles fixes, répartis de manière aléatoire, chacun introduisant un champ d'ancrage d'amplitude également aléatoire mais fixe.
- Le problème est traité en équilibre de forces (motrice, rappel et ancrage). La résolution, qui conduit à déterminer la position d'ancrage de la paroi pour chaque contrainte.

Nous avons ainsi représenté les mouvements de la paroi sous l'action d'une contrainte et reproduit les différents sauts d'un obstacle à l'autre (piégeage, dépiégeage). Chaque saut induit une variation locale de magnétisation (un pulse) que nous pouvons considérer comme représentatif du bruit mesuré. Il est ainsi possible de représenter l'ensemble des pulses en fonction de la contrainte appliquée. C'est l'image du bruit magnétomécanique.

Afin d'illustrer ces résultats et de les comparer avec des résultats expérimentaux, nous présentons l'influence de la vitesse d'application de la contrainte de sollicitation, de l'efficacité et du nombre d'ancrages.

## 2 PERSPECTIVES :

Notre travail a porté sur trois aspects qui mériteraient d'être poursuivis.

- 1) *La caractérisation de l'état métallurgique par méthode magnétomécanique.* Nous avons montré entre autres la grande sensibilité du phénomène magnétomécanique au traînage magnétique et aux contraintes internes d'ordre 2. Le phénomène de traînage magnétique se rencontre principalement dans les aciers à bas carbone qui sont de plus en plus utilisés (boîtes, tôlerie etc...). Notre laboratoire est très impliqué dans ce domaine. La technique magnétomécanique pourrait s'avérer comme un moyen de caractérisation ou de contrôle, complémentaire des techniques habituelles (frottement intérieur, PTE, émission magnétoacoustique...).
- 2) *La caractérisation de l'endommagement en fatigue.* Ce point très prometteur en particulier pour les structures tournantes. Il pourrait être approfondi : corrélé davantage l'évolution du signal à l'évolution métallurgique, appliquer cette méthode à d'autres aciers plus utilisés dans des structures fortement chargées. Notre laboratoire est très impliqué dans l'approche « potentiel restant ». La mesure in situ de l'évolution du bruit magnétomécanique s'intègre parfaitement dans cette démarche.
- 3) *La modélisation.* Le modèle présenté est certes très simpliste, mais il présente l'avantage de partir du phénomène physique et à terme de remonter jusqu'à la mesure. Il pourrait être complété dans deux directions : premièrement mieux prendre en compte le matériau (polycristal, multiparois, l'atténuation par le matériau...); deuxièmement envisager le couplage phénomène physique capteur. Ce point est commun avec la mesure Barkhausen d'origine magnétique. Par exemple, on ne sait pas répondre à la question : est-on plus sensible à un grand nombre de petits événements ou à petit nombre de grands événements? Le fait de disposer d'un modèle permettant de simuler des pulses magnétiques permettrait d'envisager la modélisation du couplage : matière, capteur, chaîne de mesure.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1].KITTEL, C. *Physique de l'état solide*, 5<sup>ième</sup> édition, Paris : Bordas, 1983, 593 p.
- [2].HERPIN, A. *Théorie du magnétisme*, Paris : INSTN-PUF, 1968, 683 p.
- [3].GATELIER-ROTHERA, C. *Etude de l'influence de la microstructure du fer pur et d'alliages binaires fer pur-carbone sur le bruit ferromagnétique*, Thèse : INSA Lyon, 1993, 245 p.
- [4].CATTY, J. *Etude des relations entre la microstructure, l'état de contrainte d'une part, les propriétés magnétiques & magnétostrictives d'autre part, dans du fer pur et des alliages à bas carbone*, Thèse : INSA Lyon, 1995, 245 p.
- [5].WEISS, P. L'Hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. *J. de Physique*, 1907, Vol.6, p.661\_690.
- [6].BOZORTH, R.H. *Ferromagnetism*, New York : D. Van Nostrand, 1953. 271 p.
- [7].HONDA, M. ; KAYA, S. Magnetisation single crystals of iron. *Sciences Reports*. Tôhoku Imp. Univ., 1926, Vol. 15, p.721-753.
- [8].CHIKAZUMI, S. *Physics of magnetism*. New York, London : John Wiley, inc, 1999. 555 p.
- [9].LEE, E.W., Magnetostriction and magnetomechanical effects. *Reports on progress in physics*, 1955, Vol. 18, p. 184-229.
- [10].NEEL, L. Bases d'une nouvelle théorie générale du champ coercitif, *Ann. Univ. Grenoble*, Sect. Sciences mathématiques et physiques, 1949, Vol. 22 pp. 299-343.
- [11].NEEL, L. Les lois de l'aimantation et la subdivision en domaines élémentaires d'un monocristal de fer. *Journal de physique et le radium*, 1944, Vol. 5, p.265-276.
- [12].LILLEY, B.A., Energies and widths of domain boundaries in ferromagnetics. *Phil. Mag.*, 1950, Vol. 41, p.792-813.
- [13].DU TREMOLET DE LACHEISSERIE, E., *Magnétisme- I Fondements*, Grenoble, PUG, 1999, 496 p.
- [14].SARETE, J. *Visualisation des domaines magnétiques*, Rapport de DEA : INSA Lyon, GEMPPM, 1992, 76 p.
- [15].SARETE, J. *Etude de la fatigue d'un acier bas carbone. Caractérisation de la microstructure et de l'endommagement, corrélation avec le bruit Barkhausen, les paramètres magnétiques et mécaniques. Influence des contraintes internes*. Thèse : INSA Lyon, 1997, 204 p.

- [16].**LAMONTANARA, J.** *Etude de l'influence de la microstructure du fer pur et d'alliages binaires fer pur-carbone sur le bruit ferromagnétique*, Thèse : INSA Lyon, 1994, 165 p.
- [17].**SAQUET, O.** *Caractérisation des aciers par bruit Barkhausen (interaction microstructure cristalline/microstructure magnétique). Optimisation de la mise en œuvre pour un développement industriel. Application au contrôle des traitements superficiels.* Thèse : INSA Lyon, 1997, 214 p.
- [18]. **KITTEL, C.** Physical theory of ferromagnetic domains. *Reviews of modern Physics*, 1949, Vol.21, p.541-583.
- [19].**BARKHAUSEN, H.G.** Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen, *Phys. Z.*, 1919, Vol. 20, p.401-412.
- [20].**UTRATA, D., NAMKUNG, M.**, Uniaxial Stress effects on the low field magnetoacoustic interaction in low and medium carbon steels, *Review of progress in Quantitative Non Destructive Evaluation*, 1987, Vol.2, p.1585-1592.
- [21].**ALPETER, J.**, Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer meßgrößen, Fakultät der Universität des Saarlandes, IZFP, Saarbrücken, 1989, 268 p.
- [22].**LAMONTANARA, J., CHICOIS, J., FLEISHMANN, P. et al.** Monitoring fatigue Damage in industrial steel by Barkhausen noise, 5th International Symposium on Non-destructive Characterisation of Materials, Karuizawa, Japan, 27-30 mai 1991, p.603-614.
- [23].**DEGAUQUE, J.** *Contribution à l'étude du frottement intérieur d'origine magnétique du fer haute pureté.* Thèse : Université P. Sabatier de Toulouse, 1977, 196 p.
- [24].**DEGAUQUE, J.** Introduction to the damping effects due to magnetic, electronic properties and to phonons interactions, *Journal de Physique C5 supplément n°10, 1981, Vol. 42*, p.607-613.
- [25].**YAMADA, O ; NGUYEN VAN DANG.**, Effet de contrainte en présence de champ magnétique dans les matériaux ferromagnétiques (effet champ-contrainte), *J.de phys. C1*, 1971, Vol. 32, p. 392-393.
- [26].**AUGUSTYNIAK, B.** , *Comportement magnétomécanique de matériaux modèles ferromagnétiques*, Programme Tempra, Rapport de stage, INSA de Lyon, GEMPPM, 1994, 20 p.
- [27].**DEGAUQUE, J., ASTIE, B., PORSTESEIL, J.L. et al.** Influence of the grain Size on the Magnetic and Magnetomechanical properties of high purity Iron, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982, Vol. 26, N°1 à 3 p. 261-263.
- [28].**SHIN, D.W.**, *Contribution à l'étude d'effets magnétomécaniques de matériaux magnétostrictifs : Fe, Ni, Fe-Si et Permendur*, Thèse : INSA Toulouse, 1999, 235 p.

- [29].SAQUET, O, CHICOIS, J., VINCENT, A. , Barkhausen noise from plain carbon steels : analysis of the influence of microstructure, *Materials Sciences and engineering –A-Structural materials-properties-microstructure and processing*, 1999, vol. 269 (1-2), p 39-43.
- [30].SARETE, J., SAQUET, O., CHICOIS, J. Monitoring applied or internal stresses by magnetic or micromagnetic methods, Fourth European Conference on Residual Stresses, Cluny (France), 4-6 june 1996, p.83-89.
- [31].TITTO, S. Magnetoelastic testing of uniaxial and biaxial stresses, International conference on residual stresses of Nancy, France, 23-25 novembre 1988, p.6-9
- [32].JILES, D.C., The effect of stress on magnetic Barkhausen activity in ferromagnetic steels, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, Vol. 25, No. 5 p. 3455-3457.
- [33]. SARETE, J., CHICOIS, J. Barkhausen noise from plain carbon steels : analysis of the influence of microstructure, *Materials Sciences and Engineering*, 1999, vol.A269, p.72-82.
- [34].AUGUSTYNIAK, B. Magnetomechanical damping evaluation from mechanical Barkhausen effect, *Materials Science Forum*, 1993, Vol.119-121, p.559-564.
- [35].AUGUSTYNIAK, B. Direct detection of magnetomechanical hysteresis by mechanical Barkhausen effect, Proc. of the International Conference on Condensed Matter Phys. & Appl., 13-16 april 1992, Barhain, p.237-242.
- [36].BIRCHAK, J.R., SMITH, G.W., Magnetomechanical damping and magnetic properties of iron alloys, *J. Appl. Phys.*, 1972, Vol. 43, p. 1238-1246.
- [37].CHMIELEWSKI, M. , *Comportement magnéto-mécanique de matériaux modèles ferromagnétiques*, Programme Tempra, Rapport de stage, INSA de Lyon GEMPPM, 1995, 32p.
- [38].DEGAUQUE, J., ASTIE, B., PORTESEIL, J.L. et al. Influence of the Grain Size on the Magnetic and Magnetomechanical properties of High purity Iron, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982, Vol.26, N°1 à 3, p.261-263.
- [39].AUGUSTYNIAK, B. ; CHNMIELEWSKI, M. ; SABLİK, M. J., Multiparameter magnetomechanical NDE, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, Vol. 36, No. 5 p. 3624-3626.
- [40].SHIN, D.W. ; DEGAUQUE, J. ; ASTIE, B. et al., Influence of the rolling direction on magnetomechanical damping and mechanical Barkhausen noise of non-oriented Fe-3% Si alloy, *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2000, Vol. 215, N°16, p. 168-170.

- [41].**FILINOV, V.V. ; SOKOLIK, A.I. ; SHATERNIKOV, V.E.**, Effect of surface plastic deformation of steels components on the parameters of the Barkhausen effect, *Sov. J. Non Dest. Test.*, 1986, Vol.22, No.6, p.391-394.
- [42].**SIPAHI, L.B., JILES, D.C.**, An investigation of various procedures for analysis of micromagnetic Barkhausen signals for non destructive evaluation of steels, *Non destructive testing evaluation*, 1993, Vol. 10, p.183-199.
- [43].**RUUSKANEN, P., KETTUNEN, P.**, Two ferromagnetic methods for the evaluation of the fatigue limit in polycrystalline iron, *NDT International*, 1980, June, p.105-108.
- [44].**RUUSKANEN, P., KETTUNEN, P.**, Non-destructive magnetic method for detection of the fatigue and the dynamic straining processes of ferromagnetic metals, *Review of progress in quantitative non destructive evaluation*, 1985, Vol. 4b, p. 947-955.
- [45].**KARJALAIN, L.P., MOILANEN, M.**, Fatigue softening and hardening in mild steel detected from Barkhausen noise, *IEEE trans. Magn.*, 1980, Vol.16, p. 514-517.
- [46].**BATTACHARYA, S., SCHROEDER, K.**, A new method of detecting fatigue crack propagation in ferromagnetic specimens, *Journal of Testing and Evaluation*, 1975, Vol. 3, No. 4, p. 298-291.
- [47].**DOBMAN, G., HÖLLER, P.** Non destructive determination of material properties and stresses, *10th international conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries*, Glasgow, Scotland, 11-14 juin 1990, p.641-648.
- [48].**CHICOIS J.**, *Etude des mécanismes microscopiques de la déformation cyclique. Développement d'une nouvelle approche- Cas de l'aluminium*, Thèse d'état : INSA de Lyon et Université LYON I, 1987, 163 p.
- [49].**MAGIN, T., DRIVER, J., LEPINOUX, J., KUBIN, L.P.**, Aspects microstructuraux de la déformation cyclique dans les métaux et alliages cc et cfc., *Revue de physique appliquée*, 1984, Vol.19, No.7, p. 467-501.
- [50].**MAGNIN, T., DRIVER, J.**, The influence of strain rate on the low cycle fatigue properties of single crystals and polycrystals of two ferritic alloys, *J. Mat. Sci. Eng.*, 1979, Vol. 39, p. 175-185.
- [51].**LUKAS, P.**, Mechanisms of crack nucleation in fatigued materials, *Werkstoffprüfung* 31 Mai bis 2 Juni 1989, Leoben : Gefüge und Bruch, Materialkundl.-Techn. Reihe, Berlin, 1990, p.125-139.
- [52].**RENAUD, V.**, *Observation de la microstructure magnétique par effet Kerr au cours d'une déformation de traction*, Rapport DEA, INSA de Lyon, GEMPPM, 1993, 58 p.
- [53]. **PELCAT, C., CARRIER, P.**, *Etude et Réalisation d'une machine de traction-compression sous microscope à effet Kerr*, Rapport de projet de fin d'études, INSA Lyon, GEMPPM, 1994, 60 p.

- [54].**GOLETTO, D., MAGNETTE, F.**, *Contrôle des brûlures de rectification par La méthode du bruit ferromagnétique*, Rapport de Projet de fin d'études, INSA Lyon, GEMPPM, 1991, 70p.
- [55].**TAPULEASA, D.**, *Contributii (cercetari), in domeniul controlului nedistructiv de oteluri tratate termic, prin metode magnetice (Barkhausen)*, Teza de doctorat, Universitatea Tehnica "« Gheorge Asachi, 1997, 180 p.
- [56].**TIITTO, K.** Use of Barkhausen Noise in Testing for Residual Stress and Comparaison to Conventional Techniques, International Conference on Residual Stress, Société Française de Métallurgie, Nancy, France, 23-25 novembre 1988, p.27-36.
- [57].**CAZAUD, R.**, *La fatigue des métaux*, 5<sup>ème</sup> édition, Paris, Dunod, 1966, 622 p.
- [58].**JILES, D.C.**, Theory of the magnetomechanical effect, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1995, Vol. 28 No.15 p. 1537-1546.
- [59].**BATHIAS, C., BAILON, J.P.**, *la Fatigue des matériaux et des structures*, 2<sup>ème</sup> édition, Paris : Hermes, 1997, 684p.
- [60]. **NEEL, L.** Le traînage magnétique, *Œuvres Scientifiques de Louis Néel*, CNRS, 1978, p.401-415.
- [61].**BRISSONNEAU, P.**, *La cinétique de diffusion des atomes interstitiels dans le fer et l'application du traînage magnétique au dosage des impuretés.* **In**: **CHAUDRON, G.**, Colloque international sur les Nouvelles propriétés physiques, mécaniques et chimiques du fer du très haute pureté, Paris : CNRS, sep. 1968, pp 135-140.
- [62].**CRAIK D.J., TEBBLE, R.S.**, *Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains*, Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1965, 337p.
- [63].**KLEBER, X. BRECHET, Y., VINCENT, A.** , Simulation numérique des événements Barkhausen : application à l'étude de l'influence des obstacles microstructuraux, *Matériaux et techniques*, 2000, vol. 88 n° 9-10, p 39-43.
- [64].**DEGAUQUE, J.** Les pertes d'énergies dans les ferromagnétiques métalliques doux : origines physique, *Mémoires et études scientifiques Revue de Métallurgie*, vol.1, 1985, p.5-24.

## **Approche du bruit magnéto-mécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative**

### Résumé

---

Le bruit magnéto-mécanique correspond à la réorganisation de la microstructure magnétique d'un matériau ferromagnétique sous l'effet d'une contrainte. Ce phénomène est dû à la mobilité des parois de Bloch à 90°.

Différents états métallurgiques d'un fer à 0,1% C (recuit, trempé, revenu) ont été caractérisés, les résultats ont été comparés à ceux des méthodes Barkhausen et PTE.

Un dispositif d'essai en fatigue en flexion rotative avec mesure in situ du bruit magnéto-mécanique a été réalisé. Le fer Armco a été étudié sous différentes charges, les résultats interprétés en termes d'interaction microstructure cristalline, microstructure magnétique et phénomène de traînage magnétique. L'identification du début de l'endommagement s'inscrit dans l'évaluation «du potentiel restant».

Une modélisation à une dimension traduisant l'équilibre énergétique d'une paroi de Bloch à 90° soumise à une contrainte est proposée.

Cette étude préliminaire se situe à l'interface entre le micromagnétisme, le contrôle non destructif et le frottement intérieur.

**Mots-clés** : ferromagnétisme, bruit magnéto-mécanique, fer Armco, acier, flexion rotative, fatigue, parois de Bloch, endommagement

## **Magnetomechanical noise approach, application to rotating bending fatigue damage evaluation**

### Abstract

---

The magnetomechanical noise corresponds to the reorganisation of the magnetic microstructure of ferromagnetic materials under stress. This phenomenon is due to the mobility of 90° Bloch walls.

Different metallurgical states of 0.1% C steel (annealed, quenched, tempered), were characterised. Results were compared with those obtained by Barkhausen and PTE methods.

Equipment for rotating bending fatigue tests, with in situ measurement of the magnetomechanical noise, was developed. Armco iron was studied under various loads. Results were interpreted in terms of crystalline microstructure and magnetic microstructure interactions, involving magnetic dragging phenomenon. The early beginning of damage can be detected, rejoining the «remaining time of life» evaluation thought process.

Unidimensional modelling of 90° Bloch wall motions under stress was proposed.

This approach is at the interface between : micromagnetism, non-destructive testing and internal friction.

**Key words** : ferromagnetism, magnetomechanical noise, Armco iron, steel, rotating bending, fatigue, Bloch walls, metallurgical damage

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : SOULTAN	Date de soutenance :
Prénoms : Malloum	06 décembre 2002
TITRE :	<b>Approche du bruit magnétomécanique, application au suivi de la fatigue en flexion rotative.</b>
NATURE : Doctorat	Numéro d'ordre : 02 ISAL 0079
Formation doctorale :	Microstructure et comportement mécanique et macroscopique des matériaux - Génie des matériaux
Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et bis	CLASSE :
<b>RESUME :</b> Le bruit magnétomécanique correspond à la réorganisation de la microstructure magnétique d'un matériau ferromagnétique sous l'effet d'une contrainte. Ce phénomène est dû à la mobilité des parois de Bloch à 90°.  Différents états métallurgiques d'un fer à 0,1% C ont été caractérisés (Recuit, trempe, revenus), les résultats ont été comparés à ceux des Méthodes Barkhausen et PTE.  Un dispositif d'essai en fatigue en flexion rotative avec mesure in situ du bruit magnétomécanique a été réalisé. Le fer ARMCO a été étudié sous différentes charges, les résultats interprétés en termes d'interaction microstructure cristalline, microstructure magnétique et phénomène de traînage magnétique. L'identification du début de l'endommagement s'inscrit dans l'évaluation «du potentiel restant».  Une modélisation à une dimension traduisant l'équilibre énergétique d'une paroi de Bloch à 90° soumise à une contrainte est proposée.  Cette étude préliminaire se situe à l'interface entre le magnétisme microscopique, le contrôle non destructif et le frottement intérieur.	
<b>MOTS CLES :</b> ferromagnétisme, bruit magnétomécanique, fer Armco, acier, flexion rotative, fatigue, parois de Bloch, endommagement	
Laboratoire(s) de recherche :	Groupe d'Etudes de Métallurgie Physique et Physique des Matériaux (GEMPPM)
Directeur de thèse :	J. CHICOIS
Président du jury :	A. VINCENT
Composition du jury :	M. BARKA, J. CHICOIS, J. DEGAUQUE, P. FLEISCHMANN, X. KLEBER, A. VINCENT