

## Résumé en français

La propagation de parois dans des fils magnétiques de petites dimensions est redevenue un domaine d'intérêt du fait de la spintronique. La spintronique – ou électronique de spin – est une technologie émergente qui tire parti du moment magnétique de l'électron pour transporter et stocker de l'information. Un des concepts d'application récemment développés en spintronique est basé sur les propriétés magnétiques de petits fils magnétiques bistables. Le niveau logique est codé par la direction de l'aimantation des domaines, et le changement de valeur logique est obtenu par propagation d'une paroi. Différents types de dispositifs spintroniques utilisant la propagation de parois magnétiques ont été proposés : des portes logiques magnétiques à parois qui réalisent les fonctions « ou exclusif », « et » et « non », des diodes spintroniques, ou encore des registres à décalage spintroniques qui utilisent la propagation de plusieurs parois pour lire et écrire des données. Pour tous ces dispositifs, la vitesse de déplacement des parois est un des facteurs les plus importants pour déterminer la vitesse de travail. En conséquence, il est d'un grand intérêt de mieux comprendre les mécanismes permettant d'obtenir un déplacement rapide des parois dans des fils magnétiques de petites dimensions. Les vitesses maximales des parois dans les dispositifs récemment proposés de porte logique n'excèdent pas 2 km/s. En regard de cela, la vitesse maximum des parois dans les microfils magnétiques amorphes gainés de verre (MAGV) peut atteindre 20 km/s.

Une autre motivation pour l'étude de la dynamique de parois dans les MAGV provient de leur application comme capteurs. Les MAGV ont été récemment utilisés dans un grand nombre de dispositifs de capteurs de (i) champ magnétique (ii) contrainte mécanique et (iii) déformation mécanique. La plupart de ces capteurs utilisent la dynamique de parois (vitesse de paroi et champ critique) pour détecter des forces externes. En conséquence, la connaissance de la dynamique de parois dans les microfils est aussi requise pour les applications comme capteurs.

Le but principal de ce travail a été d'étudier les mécanismes qui peuvent être mis à profit pour contrôler la dynamique de parois dans les microfils. Le but secondaire a été de mieux comprendre l'origine de la propagation si rapide des parois qui est observée dans les MAGV.

Les MAGV sont des matériaux composites consistant en une âme métallique gainée de verre. Il faut mentionner que la plupart des propriétés magnétiques des MAGV proviennent de leur

processus de fabrication par la méthode de Taylor-Ulitkovski. Dans ce procédé, les MAGV sont produits par trempe rapide et étirement rapide. Du fait de la différence des coefficients de dilatation thermique du verre et du métal, des fortes contraintes mécaniques dans les directions radiales et axiales sont induites dans le fil durant la trempe. De plus, les microfils sont préparés par étirement depuis l'alliage de base, ce qui introduit des contraintes axiales supplémentaires. La géométrie des contraintes totales dans les MAGV est très complexe. Selon le modèle magnéto-élastique, les contraintes mécaniques dans les MAGV sont en première approximation une contrainte axiale au centre du fil, alors que des contraintes radiales et circulaires dominent juste en dessous de la surface de l'âme métallique. Dans ce modèle, des contraintes très élevées sont calculées. Les contraintes les plus fortes, obtenues près de la surface du métal, sont proches de la limite de rupture du matériau constituant l'âme. Ceci permet de comprendre l'importance du couplage magnéto-élastique pour les MAGV. L'expérience confirme cette intuition, en montrant que la structure en domaines magnétiques dans les MAGV est déterminée par le signe du coefficient magnéto-élastique du matériau métallique de l'âme. Donc, l'effet magnétostatique (anisotropie de forme) n'est pas aussi important que pour les fils magnétiques doux en permalloy.

Pour des MAGV réalisés avec des alliages à magnétostriction positive, l'énergie magnéto-élastique minimum est atteinte pour une aimantation parallèle à la direction des contraintes mécaniques. De ce fait, la structure en domaines dans les MAGV à magnétostriction positive consiste en un grand domaine axial entouré par une fine couche de domaines de surface (selon les modèles récents décrivant les contraintes résiduelles). De plus, deux domaines apparaissent aux extrémités du fil afin de réduire l'énergie magnétostatique. Le processus d'aimantation principal dans les MAGV à magnétostriction positive consiste en un grand saut de Barkhausen généré par la propagation d'une paroi d'un bout à l'autre du fil.

La propagation de parois magnétiques dans les MAGV a été étudiée par le modèle mécanique introduit par Kittel dans les années 50 du siècle précédent. La dynamique de la paroi en mouvement est comparée à celle d'un point matériel dans un milieu visqueux. Le mouvement de la paroi est alors décrit par une équation semblable à celle d'un oscillateur harmonique linéaire. On en déduit des équations de mouvement de la paroi dont il résulte que la vitesse est proportionnelle au champ appliqué. Deux paramètres déterminent cette relation. La mobilité de paroi (pente de la vitesse en fonction du champ) exprime les forces de freinage qui s'opposent au mouvement de la paroi (amortissement du mouvement de la paroi). Le second paramètre est appelé champ critique, et est relié aux mécanismes de piégeage de la paroi.

Au moins trois contributions à l'amortissement du mouvement de la paroi ont été récemment mises en évidence. La première provient des courants de Foucault induits au voisinage de la paroi en mouvement. Dans le cas d'une paroi entre deux domaines axiaux entourés d'une fine couche de domaines en surface, la contribution à l'amortissement a été trouvée inversement proportionnelle au diamètre du domaine axial. La seconde contribution à l'amortissement du mouvement de paroi provient du fait que la paroi ne peut pas aller plus vite que les moments qui la composent ne peuvent tourner. L'amortissement du mouvement de paroi du fait du taux de relaxation des moments magnétiques a été trouvé inversement proportionnel à la largeur de la paroi. Physiquement, cette dépendance provient du fait que pour une vitesse donnée de paroi les spins dans une paroi fine doivent tourner plus vite que dans une paroi large. La troisième contribution à l'amortissement du mouvement de paroi apparaît du fait de la relaxation de défauts mobiles dans les matériaux amorphes. Il a été vu que cette contribution devenait particulièrement importante à basse température car le temps de relaxation des défauts  $\tau$  augmente fortement. L'influence sur l'amortissement du mouvement de paroi de la relaxation structurale est donnée par l'ordre relatif de trois constantes de temps : (i) le temps de relaxation des défauts mobiles, (ii) le temps d'interaction de la paroi en mouvement avec un défaut, fixé par la largeur et la vitesse de la paroi, et (iii) le temps entre deux relaxations. De ce fait, l'amortissement du mouvement de paroi donné par la relaxation structurale a été observé dans au moins cinq régimes. De plus, cet amortissement a été trouvé auparavant directement proportionnel à la concentration en défauts mobiles et inversement proportionnel à la température.

Comme l'anisotropie magnéto-élastique a été reconnue comme très importante pour les MAGV, la dynamique de parois a été contrôlée par une tension mécanique lors de nos premières expériences. Les microfils de composition FeNiSiB dans lesquels la dynamique de paroi est caractérisée par cinq régimes ont été utilisés pour ces mesures. Le premier régime est caractérisé par un champ critique négatif et la plus faible mobilité de parois. La valeur négative du champ critique persiste dans le second régime, mais la dépendance de la vitesse en fonction du champ n'était pas linéaire, avec une tendance observée à la saturation de la vitesse. Le troisième régime se définit par une forte augmentation de la mobilité et un champ critique positif. Le quatrième régime avec champ critique positif et mobilité encore plus forte a été observé aux vitesses les plus élevées. Ces quatre régimes de propagation ont été observés à chaque valeur de la tension, ce qui a permis leur étude séparée.

La dépendance avec la contrainte en tension de la mobilité de parois a été précédemment étudiée dans des fils amorphes étirés à froid. La dépendance concave à faible tension a été

expliquée par deux contributions à l'amortissement du mouvement de la paroi (relaxation des moments magnétiques et courants de Foucault). Mais à forte tension une variation convexe a été observée. Dans les MAGV de FeNiSiB nous avons aussi trouvé une forme convexe. Une telle forme ne peut être expliquée avec ces deux premières contributions à l'amortissement. Mais la relaxation structurale intervient aussi comme mécanisme d'amortissement. Selon le modèle à deux niveaux de Kronmüller, l'énergie d'interaction d'un défaut mobile avec la matrice amorphe est prise comme la somme des énergies d'interaction dipôle-dipôle, échange et magnéto-élastique. Si on prend en compte la dépendance en contrainte de la contribution magnéto-élastique à l'énergie d'interaction des défauts mobiles avec la matrice amorphe, la formule donnant l'amortissement de paroi selon la relaxation structurale est quadratique en fonction de la tension, ce qui correspond qualitativement aux mesures. L'ajustement des données a confirmé que le mouvement de paroi est amorti par la relaxation structurale dans le premier régime de propagation. Un tel régime a été observé précédemment et appelé régime amorti par diffusion. Les moments magnétiques des défauts mobiles tentent de suivre le changement de l'aimantation qui se produit lorsque la paroi se propage. Comme le temps de relaxation des défauts mobiles était comparable au temps d'interaction de la paroi avec ceux-ci, un fort amortissement de la dynamique de paroi en résulte.

L'amortissement de la dynamique de paroi dans le second régime est très proche de celui observé dans le premier régime. Toutefois on observe une tendance à la saturation de la vitesse dans la courbe  $v$ - $H$ . Les études théoriques antérieures ont montré que la paroi se comprime au-delà d'une certaine vitesse. La dépendance en champ de la vitesse dans le second régime a été ajustée par les équations de mouvement de la paroi avec variation de la largeur de paroi en fonction de la contrainte de tension.

Dans ces deux premiers régimes, le déplacement de la paroi était amorti par la relaxation structurale car le temps de relaxation des défauts mobiles était comparable à celui d'interaction avec la paroi. Toutefois, lorsque la vitesse de paroi augmente, le temps de relaxation des défauts devient très supérieur au temps d'interaction avec la paroi en mouvement et donc la paroi se libère de la relaxation structurale. C'est probablement ce qui a été observé dans le troisième régime, dans lequel la mobilité de paroi augmente fortement et le champ critique devient positif. Cette hypothèse a été confirmée par l'ajustement de la dépendance en tension de la mobilité de paroi, dans lequel l'amortissement par relaxation structurale a dû être négligé afin d'obtenir un bon accord.

Le quatrième régime de propagation de paroi est caractérisé par les plus fortes vitesses de paroi. Malheureusement, il n'a pas été possible d'ajuster la variation en tension de

l'amortissement de paroi par le modèle mécanique de dynamique de paroi, du fait des très faibles valeurs des paramètres.

De manière générale, la vitesse décroît avec la contrainte de tension. Afin de comprendre l'influence de la force de l'anisotropie magnétique sur la vitesse de paroi dans les microfils, l'anisotropie magnétique des microfils a été réduite par plusieurs moyens qui ont été comparés.

Premièrement, les MAGV ont été traités thermiquement dans un four. Des MAGV de FeSiB ont été utilisés pour ces expériences. Cette composition se caractérise par une vitesse modeste des parois qui ne dépasse pas 1 km/s. Les études précédentes ont montré que la plus importante contribution à l'amortissement du mouvement de parois provient de la relaxation des moments magnétiques à l'ambiante. D'autre part, la relaxation magnétique des moments magnétiques pourrait être réduite en réduisant l'anisotropie magnétique. Comme la plus forte anisotropie dans les MAGV est celle d'origine magnéto-élastique, l'anisotropie magnétique pourrait être réduite en réduisant les contraintes résiduelles par un recuit. Il faut pour cela bien choisir la température de recuit afin d'obtenir suffisamment de relaxation de contraintes.

Un recuit à 200°C n'a pas suffi à changer nettement la dynamique de parois. Mais un recuit à 300°C a eu deux effets remarquables : (i) augmentation de la mobilité de parois et (ii) apparition d'un régime de propagation rapide de paroi, non observé dans l'état brut de préparation. L'augmentation de la mobilité de paroi peut s'interpréter par une baisse de la relaxation des moments magnétiques (du fait de la baisse de l'anisotropie), et par réduction de la contribution due à la relaxation structurale (via une baisse de la concentration volumique de défauts mobiles).

Une autre voie pour réduire les contraintes internes a été trouvée : le recuit sous contrainte de tension. La relaxation de contraintes internes se produit davantage dans la partie métallique au centre, plutôt que dans la gaine de verre du fait de la plus haute température de fusion du verre. Lorsqu'on enlève la contrainte de tension après le recuit, une contrainte compressive apparaît qui compense la contrainte résiduelle en tension de l'état brut de dépôt. De ce fait, les MAGV recuits sous contrainte de tension perdent leur bistabilité magnétique. Pour la restaurer, une tension de 35 MPa environ a été appliquée. La vitesse de paroi mesurée a montré une très forte valeur (7 km/s), trois fois plus forte que la valeur mesurée sur l'échantillon brut. Pour des tensions supérieures, toute la dynamique de paroi a été restaurée (mobilité et champ critique).

Au vu de ces résultats, on pourrait conclure qu'une faible valeur de l'anisotropie semble nécessaire pour obtenir de fortes vitesses de parois dans les microfils.

Toutefois, les plus fortes vitesses de paroi ont été observées dans des matériaux à forte anisotropie : des monocristaux allongés (poils de chat) de fer avec des vitesses maximales de paroi de 25 km/s ont été observées par DeBlois à la fin des années 1950, ou bien des orthoferrites avec des vitesses maximum de 60 km/s ont été étudiées par S. Demokritov à la fin des années 1980. Il faut noter cependant que l'anisotropie de ces matériaux n'était pas uniaxiale. La même situation semble se rencontrer dans les MAGV, où les contraintes axiales sont partiellement compensées par les contraintes radiales et circulaires.

Afin de mieux comprendre l'influence de la géométrie des anisotropies sur la dynamique de parois, des microfils ont été recuits sous champ perpendiculaire. Ce recuit a induit une anisotropie perpendiculaire qui a donné une augmentation de vitesse de paroi et a décalé le point de transition entre les deux régimes de propagation de paroi. Un effet similaire a été observé précédemment, lors de la mesure de la vitesse de paroi sous champ perpendiculaire à l'axe du fil.

Une méthode encore plus efficace pour varier la vitesse de paroi a été trouvée en recuisant par un courant circulant dans le fil. Un tel recuit durant 10 minutes a été trouvé aussi efficace (du point de vue de la vitesse de paroi) qu'un recuit dans un four durant 1 heure. La vitesse de paroi dans les échantillons de FeSiB a augmenté de plus d'un facteur 4 (de 1 à plus de 4 km/s) comparé à l'état brut.

Finalement, la vitesse de paroi a été mesurée dans des microfils de petit diamètre, jusqu'à 1 micromètre. La dynamique des parois dans ces échantillons montre les mêmes régimes que les fils plus gros. Ceci confirme que les fortes vitesses observées dans les microfils ne sont pas le résultat de leur seul grand diamètre, mais probablement aussi que la géométrie des contraintes internes (du fait de la présence de la gaine de verre) joue un rôle important. Le recuit de ces microfils de petit diamètre a conduit à une augmentation de vitesses. L'effet a été le plus fort pour un traitement sous champ perpendiculaire. Le recuit de fils de 1 micron a augmenté la mobilité de paroi et la vitesse maximum de plus de cinq fois en comparaison à l'état brut. De tels résultats sont attractifs en vue d'applications, spécialement si une dynamique bien définie des parois est requise.

En plus de la géométrie et de la force de l'anisotropie magnétique, la présence de la couche de domaines en surface peut jouer un rôle important dans la propagation rapide des parois dans

les MAGV. Des travaux précédents ont montré que cette couche peut éviter le piégeage des parois par des défauts et ainsi favoriser des grandes vitesses de paroi. Afin de mieux comprendre le rôle de cette structure en domaines en surface sur la propagation rapide des parois, les structures de domaines en surface pour des échantillons à différentes vitesses de parois ont été comparées.

Les structures en domaines en surface dans des MAGV à magnétostriction négative ont été étudiées précédemment, et des structures typiques en bambou avec des domaines à aimantation circulaire en surface ont été trouvées. Toutes les observations précédentes par magnéto-optique sur ces échantillons ont pris comme point de départ que les fils cylindriques sont assimilés à leur plan tangent. Mais cette hypothèse ne réussit pas à expliquer complètement les structures observées sur les MAGV à magnétostriction positive que nous avons effectuées dans ce travail. Pour cette raison, la méthode d'observation magnéto-optique d'échantillons cylindriques a été étudiée tout d'abord. Les principales propriétés optiques des MAGV sont déterminées par deux facteurs : (i) la couche de verre réduit la quantité de lumière réfléchi par le métal (ce qui réduit le signal par effet Kerr car ce dernier provient de la réflexion à la surface du métal) et (ii) la forme cylindrique de la surface de l'échantillon.

Afin de déterminer les conditions optimales pour l'observation par magnéto-optique de ces matériaux composites, le calcul de la réflectivité optique de la structure bicouche consistant en un métal couvert par une fine couche de verre a été effectué. La réflexion de la lumière polarisée « s » a été trouvée supérieure à celle de la lumière polarisée « p » dans toute la gamme des angles d'incidence. Donc, afin de maximiser l'intensité réfléchi totale, il faudrait adopter cette polarisation. Toutefois, c'est avec la polarisation « p » que la lumière réfléchi par le métal est la plus importante. Enfin, la part réfléchi par le métal est maximale à l'angle de Brewster. Ceci résulte de la transmission totale de la lumière à l'interface air-verre à cet angle.

Un autre facteur important dans cette observation par magnéto-optique des microfils provient de la forme cylindrique des échantillons. Ceci a été confirmé par microscopie entre polariseurs croisés, où la lumière réfléchi forme deux lignes brillantes. Il est bien connu en optique qu'une lumière incidente polarisée « s » ou « p » est réfléchi par une surface plane en restant polarisée linéairement. Donc, avec l'approximation du plan tangent supérieur, cette observation ne s'explique pas. Afin de s'assurer que les images magnéto-optiques étaient bien interprétées, un calcul détaillé du profil de la lumière réfléchi par la surface cylindrique a été mené. Ce calcul a été fait selon deux hypothèses : un faisceau incident constitué par des rayons parallèles, avec une orientation le long de l'axe principal du microfil. Dans ces

conditions, le profil de lumière réfléchi a été trouvé en fonction de deux paramètres seulement : (i) l'angle d'incidence et (ii) l'angle theta qui donne la position sur la surface du cylindre. Le calcul détaillé a révélé que le plan d'incidence est une fonction de ces deux paramètres, pour chaque rayon du faisceau qui arrive à la surface. Le plan d'incidence n'a donc pas une orientation constante sur toute la surface du cylindre, et sa variation n'est pas intuitive. Ceci veut dire que, même si une lumière polarisée linéairement (« s » ou « p ») est utilisée pour les observations, l'orientation mutuelle du champ électrique et du plan d'incidence varie pour chaque rayon. Si la lumière incidente polarisée « s » (resp. « p ») est utilisée pour l'observation, le vecteur champ électrique ne sera normal (resp. parallèle) au plan d'incidence que en haut du fil. En dehors du haut du fil, la polarisation linéaire ne sera ni parallèle ni perpendiculaire au plan d'incidence. Pour cette raison, il faut distinguer les deux composantes de cette polarisation par rapport au plan d'incidence local : (i) la composante linéaire orientée perpendiculairement au plan d'incidence local (polarisation « s locale ») et (ii) la composante linéaire orientée parallèlement au plan d'incidence local (polarisation « p locale »). Le signal magnéto-optique pour le microfil sera composé de deux effets (i) celui pour la polarisation s locale et (ii) celui pour la polarisation p locale. Le profil de l'intensité réfléchi par le microfil a été calculé dans deux cas (i) observation entre polariseur et analyseur croisés et (ii) observation en lumière polarisée seule (sans analyseur). Alors que dans le second cas on trouve un seul maximum (au niveau du sommet du fil), un profil à deux maxima est obtenu dans le premier cas, de manière remarquable. Ces profils calculés semblent bien décrire les profils mesurés dans le microscope.

Pour calculer le profil d'intensité pour un cylindre aimanté axialement, un paramètre de Voigt différent de zéro a été introduit dans la matrice de réflexion. L'effet magnéto-optique en réflexion lié à l'aimantation en surface du cylindre donne lieu à un très petit changement du profil d'intensité par rapport à un cylindre non magnétique. On a montré que le contraste magnétique consistant en deux bandes, noire et blanche, était caractéristique d'une composante axiale de l'aimantation à la surface de l'échantillon cylindrique.

Ce contraste caractéristique noir et blanc résultant du renversement de l'aimantation axiale peut être simplement expliqué par l'effet Kerr transverse. Le vecteur aimantation axiale a en effet une composante normale au plan d'incidence local qui est non-nulle. Du fait de l'inclinaison symétrique de ce plan d'incidence de part et d'autre du plan médian du fil, la composante normale locale change de signe entre ces deux côtés.



La comparaison de cycles d'hystérésis mesurés pour la même orientation du champ (perpendiculaire à l'axe du fil), soit pour le volume (mesure par MPMS) ou pour la surface (effet Kerr), a révélé que le champ de saturation en surface était très proche de celui mesuré en volume. Ceci confirme que l'anisotropie reste aussi forte en surface. De plus, la valeur du champ de saturation a été trouvée supérieure à  $M_s/2$ , ce qui indique la présence d'une autre anisotropie (magnéto-élastique) dans tous les échantillons étudiés. Le processus d'aimantation en surface a montré deux phénomènes (i) rotation anhystérétique de l'aimantation à forts champs et (ii) saut de la direction de l'aimantation de surface à faible champ. Or il a été montré précédemment que ce saut était dû à la propagation de la paroi à l'intérieur du fil. On en déduit que la propagation de la paroi à l'intérieur du fil interagit fortement avec la structure de domaines en surface et change l'orientation de l'aimantation en surface. Pour cette raison, les deux phénomènes d'aimantation en surface ont été étudiés séparément.

Le changement de l'aimantation en surface causé par la propagation de la paroi interne a été détecté par différence d'images. Cette opération se déroule en trois étapes : (1) le microfil est basculé dans une direction axiale, le champ magnétique est ramené à zéro, et l'image de référence est acquise ; (2) le microfil est renversé par un champ axial orienté dans la direction opposée, le champ est réduit à zéro et une seconde image est acquise ; (3) l'image de référence est soustraite à l'image acquise en (2) et le résultat est moyenné en répétant acquisition et soustraction. Il est utile de mentionner que le contraste mesuré de cette manière correspond au changement d'aimantation qui se produit lors d'un grand saut de Barkhausen.

Le contraste magnétique relié à la propagation de la paroi interne a été étudié dans une série d'échantillons FeNiSiB caractérisés par différentes épaisseurs de structure de domaines en surface, selon les mesures précédentes.

Un contraste différent a été observé (i) au centre du fil et (ii) proche de ses extrémités. Le contraste magnétique avec bandes noire et blanche a été trouvé pour tous les fils observés. Il confirme que le déplacement de la paroi conduit à un changement de la composante axiale pour l'aimantation en surface. De plus, la force de ce contraste a été trouvée différente entre des échantillons à couche de domaines de surface fine ou plus épaisse.

Les échantillons de MAGV en FeSiB bruts de fabrication caractérisés par une fine couche de domaines de surface ( $< 100$  nm) ont montré un fort changement de signal lié à la composante axiale lors du déplacement de la paroi, alors qu'ils montrent des vitesses de paroi relativement basses ( $< 1.5$  km/s). D'un autre côté, l'interaction du déplacement de paroi avec le couche de domaines en surface n'a pas été observée pour les microfils de FeNiSiB possédant une couche

de domaines de surface plus épaisse. Dans le même temps, la vitesse des parois atteint des valeurs bien plus élevées (jusqu'à 10 km/s) dans ces microfils. Ces résultats confirment que la présence de domaines de surface peut jouer un rôle important dans la propagation à grande vitesse des parois dans les microfils.

Des images différentes ont été obtenues près des extrémités du fil, là où des domaines de fermeture sont attendus d'après les modèles récents. Le contraste noir et blanc disparaît continûment à mesure que l'on s'approche de l'extrémité. L'application d'un champ parallèle à l'aimantation axiale a conduit à la compression de la structure en domaines de fermeture. Il est à noter que, même pour des champs aussi forts que 0.2 T, la structure en domaines de fermeture n'a pas disparu complètement. En appliquant un champ orienté parallèlement à l'aimantation dans les domaines de fermeture, le grand saut de Barkhausen est observé. La longueur de la structure en domaines de fermeture n'a pas dépassé 100 microns pour tous les échantillons de FeSiB, alors que des longueurs de plus de 5 mm ont été observées pour des échantillons avec plus de nickel (microfils de FeNiSiB). Cette taille apparente de la structure en domaines de fermeture peut être attribuée à l'anisotropie de forme des fils mais aussi aux contraintes mécaniques induites aux extrémités du fil lors de la coupe de l'échantillon.

L'observation magnéto-optique du processus d'aimantation en surface induit par le déplacement de la paroi interne a révélé que la composante axiale de l'aimantation change. Toutefois, la structure en domaines en surface n'a pas été ainsi clarifiée.

Afin de comprendre mieux la direction de l'aimantation en surface et sa possible intervention dans la propagation rapide des parois, le cycle d'hystérésis en surface des microfils a été mesuré à forts champ appliqués dans le microscope. L'application de tels champs entraîne de nombreux effets magnéto-optiques indésirables (en parallèle à l'effet Kerr) et qu'il faut prendre en compte : (i) rotation du plan de polarisation en traversant la gaine de verre (effet Faraday dans la gaine de verre) ; (ii) rotation de la polarisation dans la lentille de l'objectif utilisé (effet Faraday dans la lentille). Le cycle d'hystérésis axial en surface a révélé que l'aimantation subit 2 processus : (i) une rotation d'aimantation apparente et (ii) un saut d'aimantation lors du passage de la paroi. Toutefois, le cycle d'hystérésis mesuré dans une ombre portée à côté du fil (probablement formée par la lumière réfléchiée par la gaine de verre) montre une rotation d'aimantation apparente avec la même pente que celle vue sur le fil, avec absence du saut lors de la propagation de la paroi. Une explication de ceci serait que la rotation apparente d'aimantation mesurée dans le cycle d'hystérésis de surface correspond à l'effet Faraday dans la gaine de verre, qu'il faut prendre en compte pour des champs aussi

forts (0.2 T). Ceci voudrait dire que la direction d'aimantation en surface ne change pas par l'application d'un champ axial, donc que la structure en surface possède une aimantation axiale. Une autre interprétation de ces observations serait que la couche de domaines de surface est absente, et donc que l'aimantation interne axiale est directement observée.

L'observation magnéto-optique de la paroi a été réalisée de deux manières qui ont été comparées, dans lesquelles la paroi est maintenue dans un puits de potentiel. Dans la première méthode, le fil étudié a été plié en forme de U. L'application d'un champ magnétique dans la direction de l'aimantation dans les domaines de fermeture a entraîné la propagation de la paroi jusqu'au centre du fil. La frontière entre les domaines est alors observée comme étant non abrupte, avec présence d'une paroi inclinée. Dans le but d'éviter les contraintes induites par la courbure du microfil, la surface du fil a été observée sur un fil rectiligne. Le microfil a été placé entre deux bobines alimentées indépendamment par deux alimentations. La capture de la paroi dans la zone d'observation a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, le courant a été mis à une certaine valeur dans la bobine première bobine. En ajustant ensuite le courant dans la seconde, la zone de champ nul a été balayée entre les deux bobines le long du microfil (ainsi que la paroi). La paroi est alors maintenue par le gradient du champ magnétique (dont la force est donnée par le courant dans les bobines), alors que la paroi se situe toujours à l'endroit du champ nul.

Cette expérience a permis (i) de supprimer l'influence de la courbure du fil sur la structure de domaines en surface, du fait des contraintes additionnelles (provenant de cette courbure) et (ii) d'observer la paroi à champ nul (afin d'exclure un effet du champ appliqué, du moins partiellement).

L'inclinaison apparente de la structure de paroi a été observée dans ce cas aussi. De plus, la mesure de la longueur de la paroi a été effectuée à différentes positions de la paroi pour un fil long de 2 cm. L'angle d'inclinaison de la paroi n'a pas été constant le long du fil, et on a pu observer que la longueur de la paroi variait entre 40 et 210 microns dans le cas des fils de  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ . La longueur de paroi a été mesurée dans le second groupe de microfils de composition  $\text{Fe}_{49.6}\text{Ni}_{27.9}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ , où il est possible de détecter du contraste lors de la propagation de la paroi interne. Pour cette composition, la longueur de paroi fluctuait autour d'une valeur de 120 microns. La direction d'inclinaison de la paroi était identique à celle vue sur les autres fils. Nous avons tenté de changer cette direction d'inclinaison en appliquant un champ perpendiculairement à l'axe du fil. Mais cette direction d'inclinaison n'a pas été trouvée varier avec la position le long du fil ni avec le champ perpendiculaire. Ceci montre

que l'origine de l'inclinaison de la paroi doit être associée à l'anisotropie magnéto-élastique, bien plus forte que l'interaction Zeeman.

La forme inclinée de la paroi pourrait être expliquée par la réduction de l'énergie démagnétisante associée à la densité de charges magnétiques, qui diminue lors de cette inclinaison. Dans le même temps, cette structure inclinée de la paroi peut être rendue responsable des fortes vitesses apparentes de paroi mesurées plus haut par méthode Sixtus-Tonks.