

FeRAM : la nouvelle mémoire universelle ?

Sommaire

1.1	Technologie FeRAM : état de l'art.....	3
1.1.1	Vers une mémoire universelle ?	3
1.1.2	Mémoire ferroélectrique : principe de fonctionnement, avantages et limitations.....	4
1.1.3	Conclusion : développement de la FeRAM dans l'industrie microélectronique	14
1.2	Fiabilité du matériau ferroélectrique.....	15
1.2.1	La ferroélectricité à l'ère des mémoires	15
1.2.2	Mécanismes de défaillance.....	29
1.3	Une approche "bottom-up".....	36

1.1 Technologie FeRAM : état de l'art

1.1.1 Vers une mémoire universelle ?

Le marché des mémoires non volatiles est très lucratif pour l'industrie de la microélectronique. Cependant, les mémoires Flash ou EEPROM, aujourd'hui vendues en masse, commencent à montrer leurs limites physiques en terme de réduction de taille. Ainsi, depuis quelques années, les grands groupes industriels se sont lancés à la recherche d'une mémoire dite "universelle" qui associerait non volatilité de l'information stockée, faible consommation d'énergie, faibles temps d'accès en écriture/lecture, miniaturisation croissante des technologies silicium (loi de Moore) et bien sûr faible coût de production.

Deux grandes orientations ont été prises pour développer des mémoires innovantes : la première vise, sur la base de la technologie silicium standard, à développer de nouveaux concepts de mémoires non volatiles (mémoires à nanocristaux, SONOS...). La seconde approche, radicalement opposée, vise à intégrer dans des composants microélectroniques, des matériaux fonctionnels. Cette approche est risquée de part les complications qu'elle engendre dans une ligne de production industrielle (contamination par des matériaux "exotiques", nouvelles étapes de gravure, température de recuit élevée...) mais n'en reste pas moins prometteuse dans les possibilités qu'elle offre. Dans ce cadre, trois grands types de mémoires ont vu le jour : la FeRAM ou mémoire ferroélectrique basée sur la propriété d'un matériau

ferroélectrique à stocker des informations sous la forme de deux états de polarisation distincts ; la MRAM ou mémoire magnétorésistive basée sur l’aptitude d’un matériau magnétique à conserver des données sous la forme de deux aimantations parallèles ou antiparallèles ; enfin, la PCRAM (ou PCM) ou mémoire à changement de phase basée sur la propriété de certains alliages ternaires (chalcogénures) à stocker l’information sous la forme de deux états “microstructuraux ” différents (amorphe ou cristallisé). Parmi ces trois grands concepts, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1-1, la mémoire FeRAM est la plus avancée sur le plan technologique mais, à l’instar de ses concurrentes, ne peut être considérée aujourd’hui comme la future mémoire “universelle”.

	<i>EEPROM</i>	<i>Flash</i>	<i>FeRAM</i>	<i>MRAM</i>	<i>PCRAM</i>
<i>Non volatile</i>	oui	oui	oui	oui	oui
<i>Technologie MOS</i>	0,35 μm	0,15 μm	0,18 μm	0,35 μm	0,10 μm
<i>Surface de cellule</i>		0,19 μm^2	0,68 μm^2	4,9 μm^2	0,06 μm^2
<i>Miniaturisation</i>	Pauvre	Moyenne	Pauvre	Pauvre	Bonne
<i>Endurance</i>	10^6	10^5	10^{12}	$>10^{14}$	10^{12}
<i>Temps écriture/lecture</i>	ms	30 ns (lecture) 1 ms (écriture)	<100 ns	<100 ns	<100 ns
<i>Consommation d'énergie</i>	10 V x 100 μA (1000 mW)	5 V x 1 mA (5000 mW)	3 V x 100 μA (300 mW)	1,8 V x 10 mA (1800 mW)	3 V x 1 mA (3000 mW)
<i>Maturité</i>	production de masse	production de masse	production limitée	Véhicules de test	Véhicules de test
<i>Acteurs sur le marché</i>	ST Microelectronics, Atmel...	AMD, Intel, ST, Atmel...	Fujitsu, Ramtron, Texas Instrument, Infineon, ST...	IBM, Motorola, Infineon...	BAE, Ovonyx, Intel, ST

Tableau 1-1: comparaison des performances des différentes mémoires non volatiles.

1.1.2 Mémoire ferroélectrique : principe de fonctionnement, avantages et limitations

1.1.2.1 Architecture

La Figure 1-1 présente une coupe d’une cellule mémoire FeRAM dans sa configuration la plus simple, comprenant un condensateur ferroélectrique commandé par un transistor MOS (structure 1T/1C). Il existe cependant d’autres types d’architecture de mémoire pour lesquelles le nombre de condensateur et de transistor peut varier (Figure 1-2). Pour l’instant, la majorité des FeRAM déjà produites possèdent une architecture 2T/2C (2 transistors pour 2

condensateurs) très fiable mais très encombrante. La tendance actuelle est donc de passer à une architecture 1T/1C (Sheikholeslami, 2002) permettant de réduire de 60% la dimension de la cellule. Dans tout les cas de figure, le contrôle de la tension aux bornes du condensateur est assuré par trois lignes conductrices appelées "Word Line", "Bit line" et "Plate line".

Il est important de noter que la donnée binaire (0 ou 1) est stockée dans le condensateur ferroélectrique (FeCAP). Sa capacité à retenir l'information est donc l'un des principaux paramètres à optimiser pour assurer la fiabilité de la mémoire.

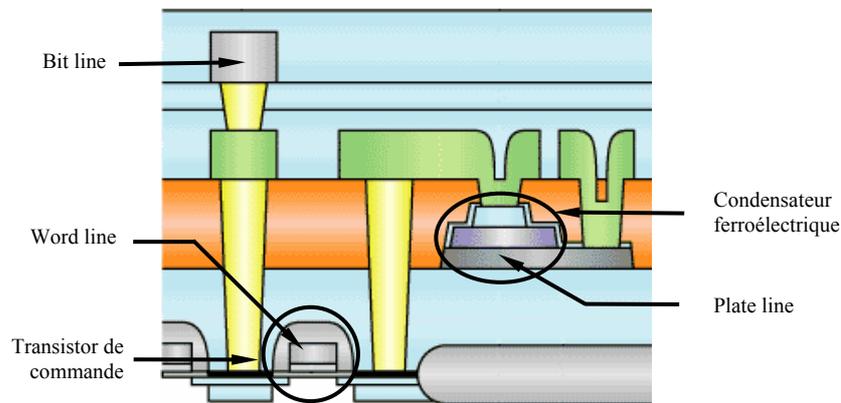


Figure 1-1 : Architecture simplifiée d'une cellule mémoire FeRAM (d'après Fujitsu). Cette structure est du type 1T/1C, c'est-à-dire 1 transistor (T) pour 1 condensateur (C).

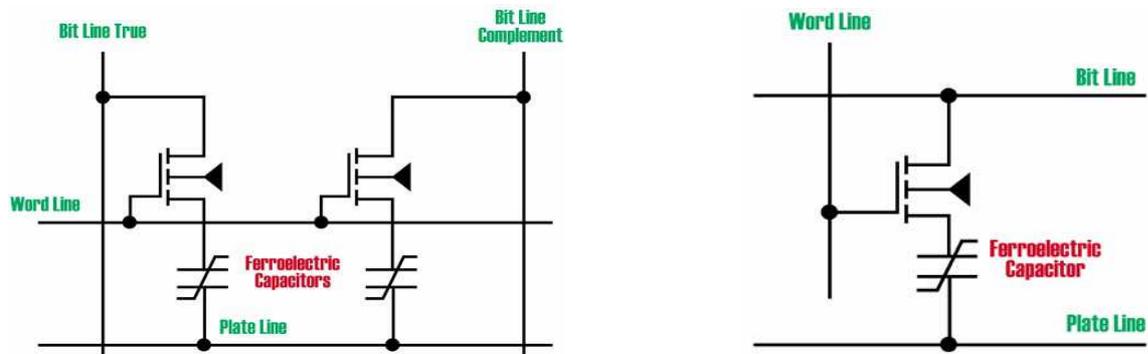


Figure 1-2: a) architecture type 2T/2C (2 transistors (T) pour 2 condensateurs (C)) ; b) architecture type 1T/1C, (1 transistor (T) pour 1 condensateur (C)).

1.1.2.2 Stockage de l'information

Un condensateur ferroélectrique est constitué d'un matériau ferroélectrique inséré entre deux électrodes conductrices (le plus souvent en platine). Tout matériau ferroélectrique peut voir son état de polarisation renversé sous l'effet d'un champ électrique externe. Pour ce faire, il est subdivisé en régions de polarisations indépendantes (les "*domaines ferroélectriques*") dont l'arrangement évolue avec la tension. Cette dernière, appliquée aux bornes du matériau

par l'intermédiaire des électrodes conductrices, entraîne une croissance et une réorientation des domaines dans la direction du champ électrique appliqué et permet de parcourir un *cycle d'hystérésis* (P,E) (ou (Q,V)).

Sur la Figure 1-3, les points A et D du cycle d'hystérésis correspondent aux deux états de polarisation à champ électrique nul. Ces deux états de "*polarisation rémanente*" confèrent à la mémoire son caractère non volatile. Ainsi, les états logiques "0" et "1" du codage binaire correspondent respectivement aux deux états de polarisation rémanente P_{r+} et P_{r-} . D'autre part, les points B et E correspondent aux deux états de polarisation nulle (champs coercitifs E_{c+} et E_{c-}). Enfin les points C et F sont associés aux deux états de polarisation à saturation P_{max} .

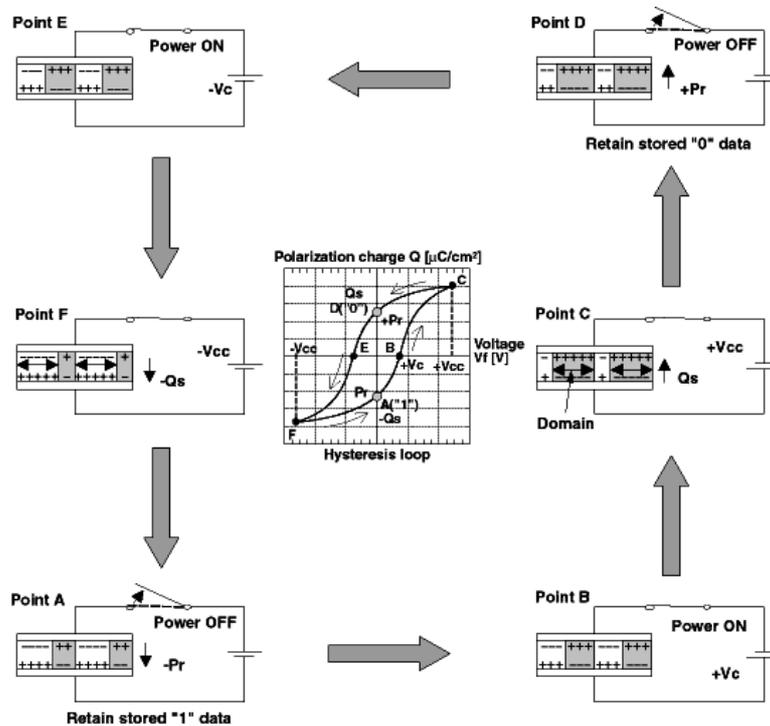


Figure 1-3: Principe de fonctionnement d'une mémoire FeRAM (d'après Fujitsu).

1.1.2.3 Principe d'écriture et de lecture

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, le cycle d'hystérésis représente la réponse électrique du matériau à l'application d'un champ électrique externe. Le sens de parcours de ce dernier permet l'écriture et la lecture des données binaires "1" ou "0" sous la forme de deux états de polarisation rémanents. La Figure 1-3 résume le principe d'écriture lecture de la mémoire.

Pour écrire l'état logique "0", quel que soit l'état initial du matériau ferroélectrique, il suffit d'appliquer un champ électrique positif supérieur au champ coercitif E_{c+} (point B de la Figure 1-3). Après annulation du champ électrique appliqué, le matériau retourne spontanément dans l'état de polarisation P_{r+} correspondant au "0" binaire. Selon le même principe, l'application aux bornes du condensateur d'un champ électrique négatif inférieur au champ coercitif E_{c-} (point E de la Figure 1-3) permet de fixer la polarisation dans l'état rémanent négatif et ainsi d'inscrire un "1".

Une fois ces informations inscrites, il est nécessaire de pouvoir les lire de manière fiable et rapide. Cette étape s'effectue grâce à l'application d'un champ électrique supérieur au champ coercitif E_{c+} et ce quel que soit l'état logique initial :

- (i) Si l'information stockée est un "0", l'application d'une tension positive permet à la polarisation de suivre la courbe "0" → C de la Figure 1-4. Il est important de souligner que le signe de la polarisation n'est pas modifié au cours de l'étape de lecture : c'est la polarisation de "non-switching" : " P_{nsw} ". Le courant électrique généré par le flux de charges associé à la polarisation de non switching est appelé " j_0 ".
- (ii) Dans le cas où l'information stockée est un "1" (état P_{r-}), l'application d'une tension supérieure à la tension coercitive renverse l'état de polarisation (selon la courbe "1" → C de la Figure 1-4). Ce renversement ou "*switching*" de polarisation (P_{sw}) est caractérisé par l'apparition d'un courant " j_1 " tel que $j_1 > j_0$.

L'analyse, par un comparateur, des courants j_0 et j_1 permet alors de distinguer les deux états de polarisation initialement inscrits dans la mémoire et ainsi de lire l'information.

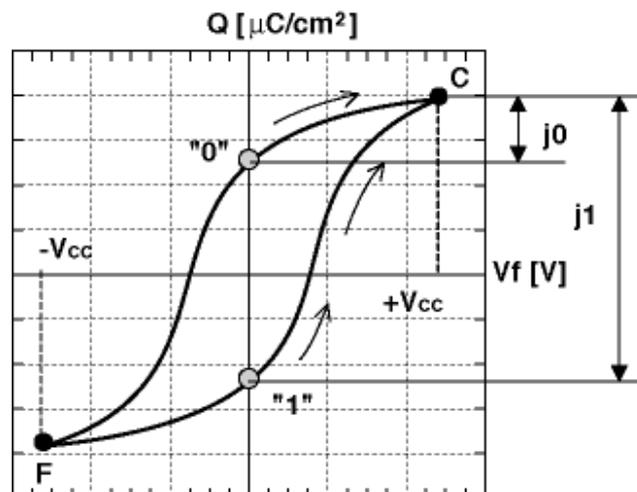


Figure 1-4 : Principe d'écriture/lecture d'une cellule mémoire FeRAM (d'après Fujitsu).

L'étape de lecture pose un problème majeur pour le développement des mémoires FeRAM dans l'industrie microélectronique. En effet, après lecture, le condensateur retourne spontanément dans l'état de polarisation P_{r+} en suivant la courbe $C \rightarrow "0"$ (Figure 1-4) et ce quelle que soit l'information initialement inscrite. Cette dernière est donc perdue et doit être réécrite. La lecture destructive de la donnée (DRO : "destructive read out") constitue une limitation importante de la technologie FeRAM en terme de fiabilité, celle-ci conduisant à une augmentation du nombre de cycles d'écriture/lecture.

1.1.2.4 Choix du matériau ferroélectrique

L'intégration d'un condensateur ferroélectrique dans une architecture silicium submicronique (technologie CMOS inférieure à $0,35 \mu\text{m}$) impose le respect d'un certain nombre de spécifications (Jones *et al.*, 1995; Ramesh *et al.*, 2001; Mikolajick *et al.*, 2001) :

- (i) Les mémoires doivent être programmables sous des tensions inférieures à 3 V. Ceci exige l'utilisation d'un matériau ferroélectrique capable de switcher à de faibles tensions (faible champ coercitif) ;
- (ii) Il est préférable que la couche ferroélectrique soit orientée de telle manière que la polarisation soit perpendiculaire au plan du substrat (Suzuki & Ami, 1996) ;
- (iii) La réduction de l'épaisseur de la couche ferroélectrique, imposée par la diminution de la tension de programmation, ne doit pas dégrader ses propriétés diélectriques ;
- (iv) Les condensateurs ferroélectriques doivent être capables de supporter un grand nombre de cycles de programmation, *i.e.* avoir une grande endurance.

Actuellement, plusieurs matériaux ferroélectriques sont à l'étude pour leur intégration dans les FeRAM. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1-2. Pour l'instant, les PZT (solution solide $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) font encore figure de référence, en particulier chez NEC (Inoue *et al.*, 2002), Ramtron ou Fujitsu (Maruyama *et al.*, 2003 ; Nawata, 2004). En effet, leurs fortes polarisations rémanentes ainsi que leurs faibles températures d'élaboration en font le candidat idéal pour les technologies actuelles.

	PZT	SBT	BLT
Pr ($\mu C/cm^2$)	30-40	5-10	10-20
Ec (kV/cm)	80	80	70
Température ($^{\circ}C$)	500-600	700-800	650-700
Texture associée	(111)	aucune	aucune
Technologie associée (μm)	$\geq 0,35$	0,18	0,13

Tableau 1-2 : principaux matériaux ferroélectriques intégrables dans les mémoires FeRAM.

Comme le montre la Figure 1-5 selon leur composition, les matériaux PZT peuvent cristalliser dans différentes symétries (cubique, rhomboédrique, quadratique...). Les matériaux PZT les plus utilisés pour les applications FeRAM ont une composition riche en titane et possèdent une structure dite “perovskite” de symétrie quadratique.

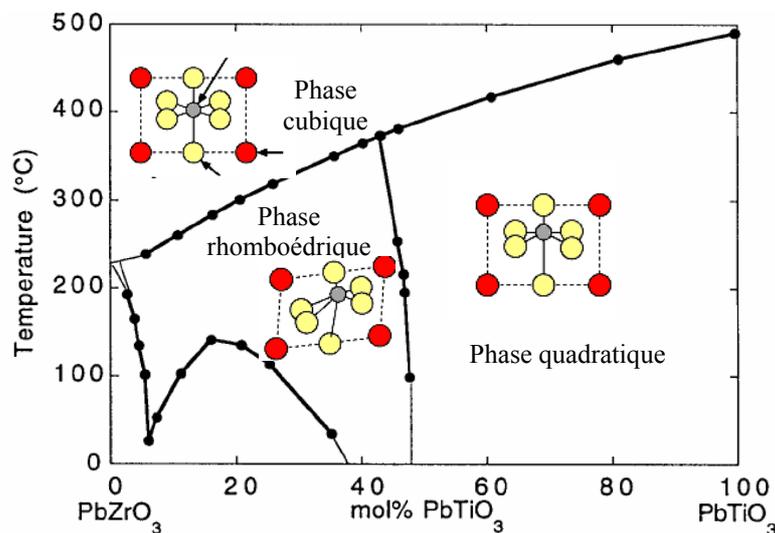


Figure 1-5 : Diagramme de phase des PZT établi par Jaffe *et al.* (Jaffe *et al.*, 1971).

L'un des concurrents les plus sérieux des PZT est l'oxyde SBT (SrBi₂Ta₂O₉) qui présente un champ coercitif plus faible lui permettant des opérations à plus faible tension (Paz de Araujo *et al.*, 1995). Des sociétés telles que Hynix, Symetrix, Infineon ou STMicroelectronics travaillent déjà sur l'intégration du matériau SBT dans une technologie 0,18 μm . La structure cristallographique du composé SrBi₂Ta₂O₉ dérive de celle des phases d'Aurivillius qui se présentent sous la forme d'une alternance, selon l'axe \bar{c} , de feuillets (Bi₂O₂)²⁺ et de couches de type perovskite (A_{m-1}B_mO_{3m+1})²⁻ (Subbarao, 1962). “m” représente le nombre de couches de type perovskite intercalées entre les feuillets Bi₂O₂. Comme le montre la Figure 1-6, l'oxyde SrBi₂Ta₂O₉ fait partie des phases d'Aurivillius m = 2 avec une double couche de type perovskite SrTa₂O₇. A température ambiante, ce composé cristallise dans une phase

ferroélectrique de symétrie orthorhombique (groupe d'espace $A2_1am$) l'axe polaire étant parallèle à la direction [100].

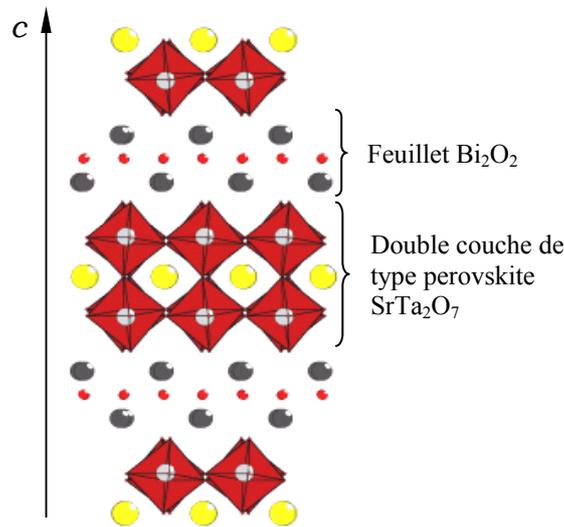


Figure 1-6 : Projection de la structure du composé $SrBi_2Ta_2O_9$ suivant la direction $[110]$.

Enfin, pour des technologies inférieures à $0,18 \mu m$, certains matériaux tels que le BLT ($(Bi,La)_4Ti_3O_{12}$) sont déjà envisagés (Park *et al.*, 1999a ; Lee *et al.*, 2002). Le dépôt et l'optimisation des propriétés électriques de cette phase d'Aurivillius $m = 3$ est aujourd'hui difficile à réaliser dans une ligne de fabrication de semiconducteurs.

Par ailleurs, la réduction des dimensions des cellules mémoires induit aussi une diminution de l'épaisseur de la couche mince ferroélectrique qui ne doit pas perdre, pour autant, ses caractéristiques diélectriques. Là encore, le composé SBT présente un avantage certain sur le PZT, sa polarisation rémanente étant très peu sensible à la réduction d'épaisseur. Il faut toutefois noter que, comparativement au PZT, le composé SBT présente une polarisation rémanente globalement plus faible qui rend la lecture de la cellule mémoire plus délicate.

1.1.2.5 Limitations

La technologie FeRAM, bien que très avantageuse en terme de consommation d'énergie et de vitesse d'écriture/lecture, possède toutefois plusieurs limitations fondamentales. La capacité à passer outre ces désavantages va, en majeure partie, conditionner le développement de la mémoire à grande échelle. Deux grands types de limitations peuvent être distingués : les limitations "extrinsèques" dues à l'introduction de matériaux oxydes dans les lignes de fabrication (contamination par les oxydes, étapes de gravure...). Ce problème est commun

aux technologies MRAM, PCRAM et FeRAM comme indiqué dans la partie 1.1.1. Il existe également des limitations “intrinsèques” à la technologie FeRAM liées au caractère ferroélectrique lui-même :

- L'un des grands enjeux pour assurer le développement et la pérennité de la technologie FeRAM est la possibilité de suivre la “*miniaturisation*” constante de l'architecture silicium submicronique. Les matériaux ainsi choisis doivent continuer à présenter un caractère ferroélectrique à très faible épaisseur. Ceci constitue un obstacle au développement des mémoires ferroélectriques car la frontière de persistance de ces propriétés à très petite échelle est encore très mal définie. Aujourd'hui, de nombreux groupes de recherche travaillent sur la conservation des propriétés électriques à l'échelle nanométrique (Tybell *et al.*, 1999 ; Tiedke *et al.*, 2001 ; Junquera & Ghosez, 2003 ; Chu *et al.*, 2004).
- La “*lecture destructive*” (cf. partie 1.1.2.3) imposant une réécriture de l'information après lecture constitue la seconde limitation intrinsèque de la technologie. Le nombre de cycle d'écriture/lecture est ainsi considérablement augmenté. Pour répondre à ce problème, deux solutions sont possibles :
 - (i) la première consiste à concevoir une architecture novatrice du point mémoire présentant une lecture non destructive. C'est le cas, par exemple des transistors ferroélectriques à effet de champ (FeFET) (Ishiwara, 2000).
 - (ii) La seconde concerne le choix et l'optimisation d'un matériau ferroélectrique dont les caractéristiques électriques soient peu affectées par le cyclage (cas de SBT et BLT).
- La remarque précédente met en avant le troisième problème de la technologie à savoir la *fiabilité* du matériau ferroélectrique en couche mince. En effet, les propriétés de celui-ci ne doivent pas (ou peu) être altérées par l'application à ses bornes de stresses électriques (alternatif, continu...). Aujourd'hui, certains matériaux tels que SBT sont très étudiés car ils présentent une bonne résistance au cyclage et à l'application d'une tension continue. Bien que très étudiés, les mécanismes physiques à l'origine des modes de défaillances sont encore mal compris (Colla *et al.* 1998 ; Scott, 2000 ; Dawber & Scott, 2000 ; Grossman *et al.*, 2000 ; Tagantsev *et al.*, 2001 ; Shur *et al.*, 2001 ; Grossman *et al.* 2002). Ceux-ci seront explicités plus en détail dans la partie 1.2.2.

1.1.2.6 Nouveau développement technologique : vers un condensateur 3D

Comme cela a été mentionné dans les sections précédentes, la réduction des dimensions entraîne un certain nombre de contraintes quant au choix du matériau ferroélectrique en couche mince. Cependant, un autre point de très grande importance est à prendre en compte pour assurer la pérennité de la technologie FeRAM à l'échelle nanométrique. En effet, pour lire correctement une information stockée, il est nécessaire de distinguer clairement les courants de switching (j_1) et de non switching (j_0) (section 1.1.2.3). Ceci ne pose pas de problème pour des matériaux tels que les PZT actuellement utilisés car leur polarisation rémanente est très importante. Il en va autrement pour le composé SBT destiné à être déposé sous forme de couches très minces et dont la polarisation rémanente relativement faible ne garantira pas une lecture fiable de l'information. La principale solution envisagée pour résoudre ce problème est de passer d'une structure "planaire" standard (ou structure 2D) à une structure à "*trois dimensions*" (3D) dont un exemple est présenté dans la Figure 1-7-b. Par ce biais, la surface "réelle" du condensateur est augmentée par l'apport des "bords" sans toutefois modifier la surface occupée par un point mémoire sur le wafer de silicium. Ainsi, la polarisation effective d'une cellule mémoire est augmentée.

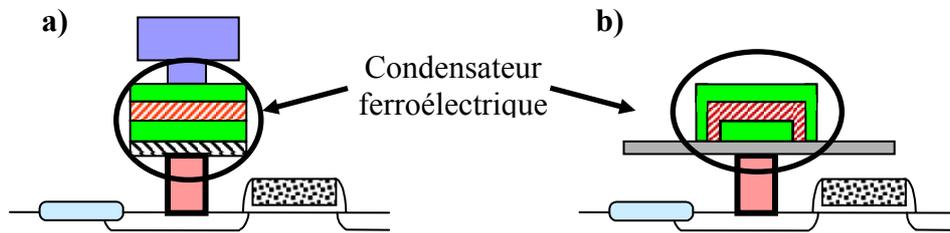


Figure 1-7 : évolution de l'architecture du point mémoire : a) condensateur planaire ou 2 dimensions (en vert : électrodes inférieures et supérieures ; en rayé rouge et blanc : matériau ferroélectrique). b) condensateur à 3 dimensions : augmentation de la polarisation par unité de surface grâce à l'apport des bords du condensateur ("side walls").

Aujourd'hui, différents groupes de recherche académiques et industriels sont engagés dans des programmes visant à intégrer des condensateurs 3 dimensions dans une architecture silicium submicronique (Johnson *et al.*, 2003 ; Goux *et al.*, 2004 ; Nagel *et al.*, 2004 ; Joshi, 2004). Les communications récentes montrent que trois grands types d'architectures 3D sont à l'étude :

- (i) STMicroelectronics et l'IMEC développent une technologie "pseudo 3D empilée" (Johnson *et al.*, 2003 ; Goux *et al.*, 2004). Dans ce concept, l'empilement des couches constituant l'électrode inférieure est d'abord

déposé sur toute la surface du wafer de silicium puis gravé de manière à former un réseau d'électrodes inférieures. Le film mince (de SBT dans le cas du programme entre IMEC et STMicroelectronics) ainsi que l'électrode supérieure sont ensuite déposés sur ce réseau. Dans ce cas (Figure 1-8-a), comme cela a été précisé précédemment, les bords du condensateur lui confèrent son caractère 3D.

- (ii) La technologie “en trous” (trench) est principalement développée par Symétrie (Figure 1-8-b) (Joshi, 2004). Dans ce cas de figure, le silicium est d'abord gravé afin d'effectuer des “encoches” dans le substrat. Les couches constituant l'empilement électrode inférieure/film ferroélectrique/électrode supérieure sont ensuite déposées sur ce substrat à trous permettant ainsi de définir des condensateurs 3D “enfouis”.
- (iii) Récemment, Infineon a proposé une nouvelle architecture 3D (Figure 1-8-c) dans laquelle le condensateur est positionné verticalement (Nagel *et al.*, 2004). Dans ce concept, un film épais (de PZT) est d'abord déposé par MOCVD puis gravé afin de définir un réseau de condensateurs 3D verticaux. Ceci confère à la technologie un avantage important en terme de miniaturisation, celle-ci n'étant pas gouvernée par le dépôt du film mince mais par la gravure. De plus, ce concept peut être adapté à la technologie de FeRAM “en chaîne” précédemment développée par Infineon (Sheikholeslami, 2000) et permettant d'augmenter la densité de la mémoire.

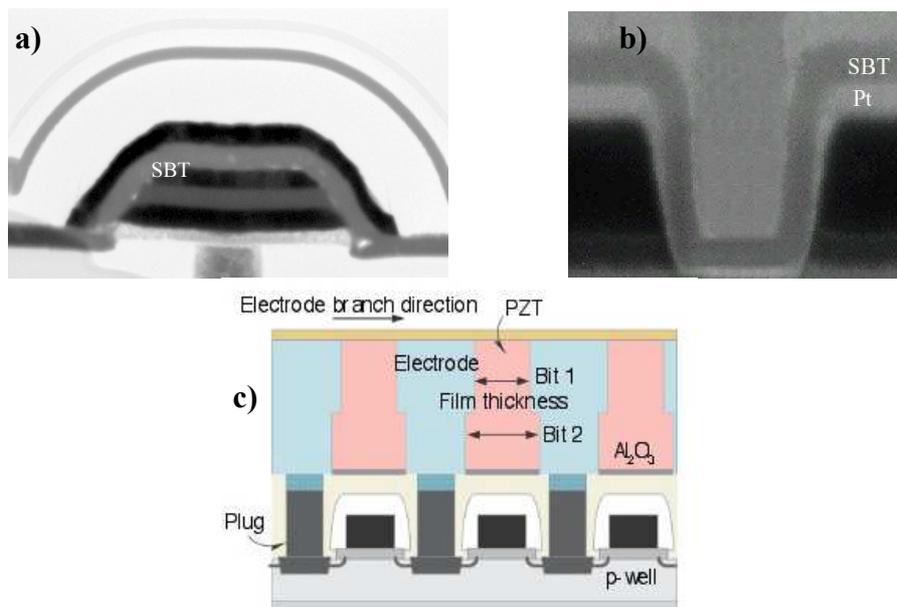


Figure 1-8 : architectures 3D développées par l'IMEC et ST Microélectronique (a), Symetrix (b) et Infineon (c).

Toutefois, il faut noter que, malgré des avancées récentes et significatives, de gros efforts restent à fournir non seulement pour élaborer mais aussi estimer la fiabilité de ce type de structures.

1.1.3 Conclusion : développement de la FeRAM dans l'industrie microélectronique

Pour conclure cette présentation succincte de la technologie FeRAM, le Tableau 1-3 résume l'état de l'art (en juin 2004) de la technologie FeRAM chez les grands acteurs industriels. Plusieurs remarques peuvent être effectuées sur la base de ce tableau :

- (i) Toutes les technologies exposées dans ce tableau présentent des architectures à 2 dimensions. Cette géométrie de condensateurs atteignant ses limites, peu de développements technologiques majeurs ont été initiés en 2004. En effet, la plupart des groupes industriels se sont tournés vers une architecture à 3 dimensions (cf. section précédente) pour laquelle peu de données concrètes en terme d'application sont disponibles.
- (ii) De nombreux acteurs tels que Fujitsu, Texas Instrument, Infineon ou Samsung continuent à travailler sur des technologies à base de PZT. Néanmoins, les roadmaps de certains groupes industriels prévoient un passage de PZT à SBT ou BLT à plus ou moins courte échéance.
- (iii) Il faut aussi noter qu'en terme de production, Fujitsu est nettement en avance sur ces concurrents avec plus de 150 Millions de composants FeRAM vendus. Ceci en fait le leader actuel sur ce marché.

<u>Juin 2004</u>	<i>Texas instrument Agilent Ramtron</i>	<i>Fujitsu</i>	<i>Matsushita</i>	<i>Toshiba Infineon</i>	<i>Samsung</i>	<i>Oki Sony</i>	<i>Hynix</i>
<i>Technologie MOS (μm)</i>	0,13	0,18	0,18	0,20	0,25	0,25	0,25
<i>Densité du démonstrateur (bit)</i>	64 Mb	4 Mb	1 Mb	32 Mb	32 Mb	4 Mb	16 Mb
<i>Tension d'opération (V)</i>	1,3	1,8	1,1	2,5 - 3	2,7 -3,3	2,5	3
<i>Temps d'accès (ns)</i>	30	30	15	50	55	55	70
<i>Matériau</i>	PZT	PZT	SBTN	PZT	PZT	SBT	BLT
<i>Taille de cellule (μm^2)</i>	0,54	1,3	1,1	1,875	0,9384	2,6	1,5
<i>Source</i>	VLSI'03 IEDM'02	IEDM'02 ISIF'03	VLSI'03 ISIF'03	ISSCC'03 MRS'02	VLSI'02 VLSI'03	IEDM'02	ISIF'03 IEDM'03

Tableau 1-3 : état de l'art (juin 2004) de la technologie FeRAM chez les différents acteurs industriels mondiaux (d'après Wouters, 2004).

1.2 Fiabilité du matériau ferroélectrique

La section 1.1.2.5 a positionné l'étude de la fiabilité du condensateur ferroélectrique comme une étape indispensable au développement de la technologie FeRAM. Le but des prochains paragraphes est, non seulement, de faire l'état des lieux des différents modes de défaillance associés au "vieillissement" du matériau ferroélectrique en couche mince, mais aussi de présenter les modèles utilisés aujourd'hui pour en appréhender l'origine physique.

1.2.1 La ferroélectricité à l'ère des mémoires

1.2.1.1 Domaines ferroélectriques et polarisation spontanée

Nous avons pu voir, dans la partie précédente, comment la ferroélectricité pouvait être mise à profit dans les mémoires non volatiles. Le fonctionnement de celles-ci est basé sur l'aptitude d'un matériau ferroélectrique à réagir à une sollicitation électrique externe en modifiant sa polarisation interne. Il existe donc une relation directe entre la microstructure interne du matériau et sa réponse électrique. Ainsi, un certain nombre de questions se posent quant à l'origine physique du phénomène de ferroélectricité et à l'aptitude du matériau à répondre à une sollicitation électrique externe.

La Figure 1-9 présente le cycle d'hystérésis d'un matériau ferroélectrique soumis à un champ électrique externe. Cette réponse électrique est associée à l'existence, au sein du ferroélectrique, de régions présentant chacune une polarisation indépendante. L'amplitude et le sens du champ électrique appliqué permettent de modifier cet arrangement en "*domaines ferroélectriques*". En effet, certains domaines, présentant une orientation de polarisation proche de celle du champ électrique externe vont croître au détriment d'autres domaines d'orientation différente. Ainsi, la polarisation "macroscopique" résultante dépend de l'aptitude des frontières entre deux domaines adjacents, encore appelées "*parois de domaine*", à se déplacer sous l'effet du champ électrique externe. Ces parois, très fines (typiquement de 1 à 10 mailles cristallines), peuvent être considérées comme des zones de changements abrupts de la direction de polarisation.

Il est important de noter que, sur la Figure 1-9, la courbe OAC représente la courbe de "*première polarisation*" caractéristique d'un matériau "vierge", *i.e.* soumis pour la première fois à un champ électrique. Cette étape modifie considérablement l'arrangement en domaines en le faisant passer, de manière irréversible, d'un état "aléatoire" ne présentant aucune polarisation macroscopique à un état "organisé". Le matériau ainsi polarisé présente, en

l'absence de champ appliqué, deux états de polarisations stables (états de polarisation rémanents P_{r+} et P_{r-}) correspondant à deux configurations distinctes en domaines.

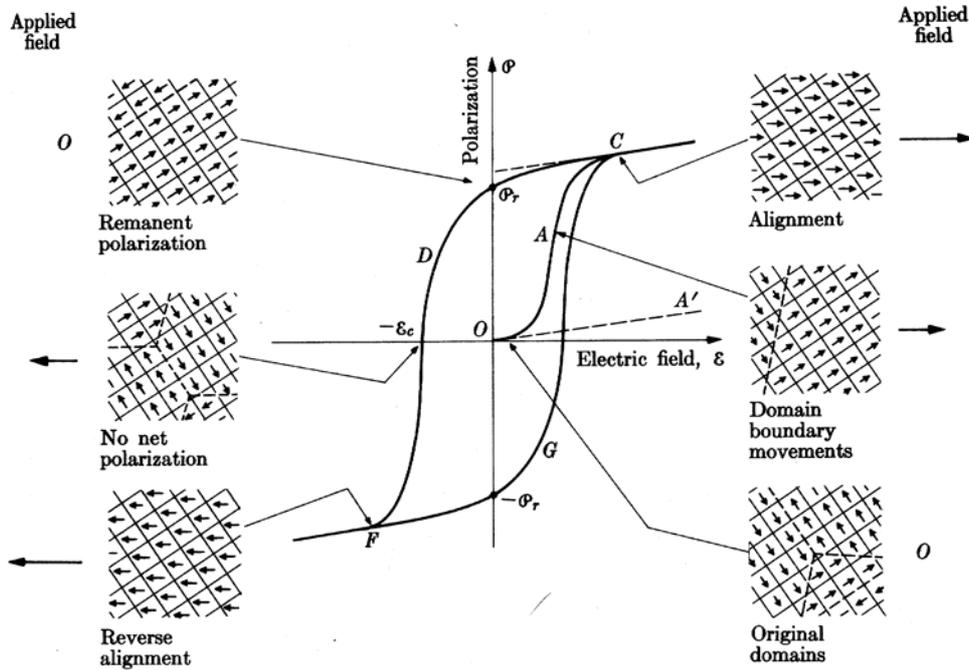


Figure 1-9 : évolution, sous champ électrique, de l'arrangement en domaines ferroélectriques expliquant l'existence d'un cycle d'hystérésis.

Un domaine ferroélectrique correspond donc à une région dans laquelle la polarisation est uniforme (tous les dipôles électriques sont orientés dans la même direction). En d'autres termes, toutes les mailles cristallographiques composant ce domaine possèdent la même **polarisation spontanée** (P_s). Il existe de ce fait, à l'échelle de la maille cristallographique, une polarisation microscopique qui tire son origine du déplacement des charges positives et négatives dans des directions opposées (Figure 1-10). Selon le sens de la distorsion de la maille, deux états de polarisation spontanée opposés peuvent être distingués. La polarisation spontanée constitue ainsi l'unité de base de la polarisation électrique macroscopique du matériau ferroélectrique. L'application d'un champ électrique aux bornes du matériau ferroélectrique permet, localement, de favoriser l'une ou l'autre de ces polarisations ce qui a pour conséquence de faire croître la fraction de domaines auxquels elle est associée. Il est important de noter que la direction de polarisation spontanée dépend de la symétrie cristalline. Ainsi, dans un PZT quadratique celle-ci est alignée sur l'axe cristallographique \vec{c} . En revanche, elle est selon la direction $[111]$ pour un PZT de symétrie rhomboédrique. Dans le cas de SBT, elle est parallèle à l'axe cristallographique \vec{a} .

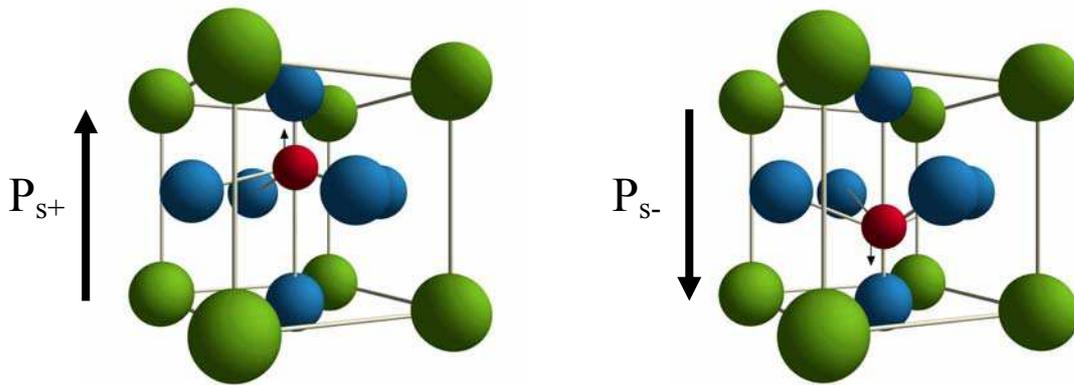


Figure 1-10 : Déplacements des charges positives et négatives au sein d'une maille cristalline associées aux états de polarisation spontanée positive et négative (cas d'une structure perovskite).

Une couche mince ferroélectrique est constituée de différents grains eux-mêmes subdivisés en domaines ferroélectriques. Cette structure en domaines ferroélectriques résulte de la minimisation de l'*énergie élastique* associée à la transition de phase paraélectrique (phase haute température) - ferroélectrique (phase basse température) (Lines & Glass, 1977). Elle dépend donc de plusieurs critères tels que la symétrie cristalline ou la relation cristallographique avec le substrat sur lequel le film mince est déposé (texture).

- influence de la *symétrie cristalline* :

Deux domaines ferroélectriques adjacents présentent des moments dipolaires orientés dans des directions différentes qui dépendent de la symétrie cristalline. Ainsi pour une structure de type perovskite cristallisant dans une symétrie quadratique (cas des PZT riches en titane) les angles séparant deux domaines sont égaux à 90° ou 180° (Merz, 1954 ; Mendiola & Pardo, 1984 ; Yamada *et al.*, 1996 ; Romanov *et al.*, 1999). On parlera alors de domaines à 90° ou à 180° . En revanche, un PZT de symétrie rhomboédrique présente des domaines à 71° , 109° ou 180° (Kruger, 1976 ; Shaw *et al.*, 1993). On peut donc voir que pour un même type de matériau, la composition joue un rôle non négligeable sur la structure en domaines. Dans le cas de SBT, cristallisant dans une symétrie orthorhombique, il existe des domaines à 90° , des domaines à 180° ainsi que des parois d'antiphases (Liu *et al.*, 1999 ; Chen *et al.*, 2000), ces dernières étant relatives au tilt des octaèdres TaO_6 le long de l'axe \bar{c} .

- influence de la *texture* :

Le travail effectué par le groupe de D.J. Wouters (Wouters *et al.*, 1997 ; Fé, 2001) sur les PZT met en évidence le rôle joué par la texture du matériau ferroélectrique en couche mince sur la configuration en domaines sous champ électrique. En effet, il a été démontré que pour des

raisons de contraintes internes au matériau, un PZT préférentiellement orienté selon la direction [111] présente un arrangement en domaine favorable à une bonne réponse électrique. En effet, un tel matériau une fois polarisé, présente une structure quasi-monodomaine (Figure 1-11). Dans le cas du dépôt d'une couche de SBT, il est très difficile d'orienter le matériau suivant l'axe polaire [100]. Ainsi, le composé SBT est le plus souvent polycristallin (arrangement aléatoire de cristallites) ce qui, *a priori*, n'est pas en faveur d'une grande polarisation.

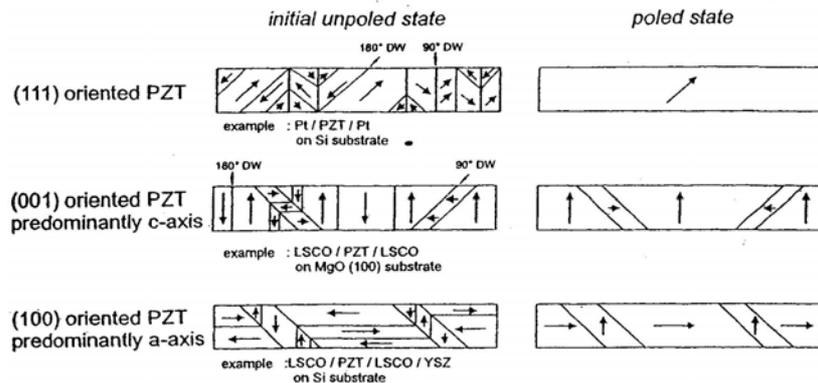


Figure 1-11 : Relation entre la texture de la couche de PZT et la structure en domaines, à l'état initial et après polarisation sous champ (Fè, 2001).

1.2.1.2 Nature de la réponse électrique sous différentes sollicitations

La réponse électrique d'un condensateur ferroélectrique est caractérisée par l'aptitude du matériau ferroélectrique à "*switcher*", *i.e.* renverser sa polarisation sous l'action d'un champ électrique extérieur. Il est clair que la cinétique de renversement de polarisation est très largement gouvernée par l'évolution de la structure en domaines au sein du matériau ferroélectrique. Le but de cette section est de discuter plus en détail la relation entre la sollicitation électrique et la mobilité des parois de domaines. Pour ce faire, nous détaillerons les méthodes classiques de mesure du caractère ferroélectrique d'un matériau. De plus, une attention particulière sera portée sur les paramètres altérant la mobilité des parois de domaines et, par voie de conséquence, les propriétés électriques.

1.2.1.2.1 Cinétique de switching : réponse à une tension de grande amplitude

Le mécanisme de renversement de polarisation a été étudié en détail dans le cas des matériaux massifs et en couches minces (Fattuzo & Merz, 1967 ; Shur, 2005). Il ressort de ces travaux que le phénomène est particulièrement complexe et qu'il ne semble pas être régi par un mécanisme universel pour tous les ferroélectriques. Deux grands scénarii sont envisagés pour interpréter le phénomène : la croissance de domaines antiparallèles préexistants (déplacement

des parois de domaines) et le processus de nucléation/croissance de nouveaux domaines antiparallèles aux interfaces entre le matériau ferroélectrique et les électrodes (Figure 1-12). Il est important de noter que, malgré le caractère *irréversible* de ce phénomène, une petite partie de la structure en domaine retourne spontanément dans son état initial : c'est le phénomène de "*relaxation*" ou de "*backswitching*" (Benedetto *et al.*, 1994 ; Mihara *et al.*, 1995 ; Lohse *et al.*, 2001). Ceci donne naissance à une polarisation rémanente dite "relaxée" (P_{rel}).

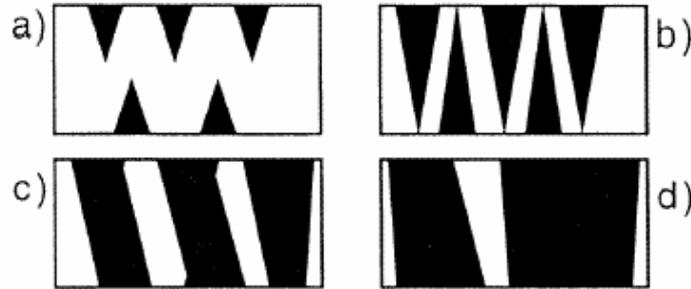


Figure 1-12 : séquence de renversement de polarisation dans les ferroélectriques. a) nucléation de domaines dont la polarisation est opposée à la polarisation initiale. b) croissance de ces domaines dans l'épaisseur du matériau c) croissance latérale des domaines d) coalescence des domaines. Les zones blanches et noires correspondent à des orientations de polarisation antiparallèles.

Expérimentalement, la mesure des propriétés de switching du matériau est faite de deux manières différentes (Tableau 1-4):

- La mesure *dynamique* du cycle d'hystérésis ("DHM") :

Dans ce cas, une succession de quatre tensions triangulaires de quelques volts d'amplitude est appliquée aux bornes du condensateur ferroélectrique en suivant le chronogramme présenté dans le Tableau 1-4. La mesure des courants de switching est effectuée pendant les pulses 2 (en bleu dans le tableau) et 4 (en rouge dans le tableau), les deux autres servant simplement à renverser la polarisation. Dans ce cas, seule la réponse électrique due au renversement (switching) des domaines ferroélectriques est accessible. La mesure donne néanmoins accès à de nombreuses informations telles que les champs coercitifs positif et négatif et les polarisations rémanentes, rémanentes relaxées, et maximales positives et négatives. Ainsi, l'évolution de la polarisation de non-switching n'est pas mesurée mais peut être déduite de la différence entre P_{max} et P_{rel} .

- Le cycle d'hystérésis **PUND** (Positive Up Negative Down) :

Généralement, les caractéristiques de switching sont mesurées en utilisant des pulses électriques. Dans le cas du PUND, ces pulses présentent le plus souvent une forme trapézoïdale. Ceci présente deux avantages majeurs : premièrement, le champ appliqué est constant durant le switching ; ensuite, cette séquence de pulses est plus proche de celle utilisée pour la lecture/écriture des mémoires FeRAM. En effet, dans ce cas, une succession de cinq pulses de quelques volts d'amplitude est appliquée (Evans & Cardoza, 1995). Le premier, dont le signe, l'amplitude et la durée sont indépendants des quatre autres est un pulse d'écriture de l'information. Ensuite, la succession de deux pulses positifs suivis de deux pulses négatifs permet de lire l'information en suivant l'évolution des polarisations de switching positive et négative (notées 1 et 3 dans le Tableau 1-4) ainsi que celle des polarisations de non-switching positive et négative (notées 2 et 4 dans le Tableau 1-4).

Expérimentalement, dans les deux cas précédents, la polarisation est déterminée par intégration de courants de switching. Dès lors, la réponse électrique d'un matériau peut aussi être caractérisées par les courants de switching (cf. Tableau 1-4). Ils sont caractéristiques de la distribution de domaine renversant leur polarisation pour une gamme de tension donnée. L'analyse de ces courants peut ainsi permettre d'isoler des populations de domaines ayant des cinétiques de switching distinctes. De plus, certains auteurs parviennent à modéliser les résultats en traitant le phénomène de réorientation des domaines comme une transition de phase décrite par la théorie de Kolmogorov et d'Avrami (Ishibashi & Tagaki, 1971, Shur *et al.*, 2003). Dans cette approche, les domaines d'orientations de polarisation spontanée différentes sont considérés comme des phases différentes, les parois de domaines étant assimilées à des frontières entre phases (cf. partie 1.2.1.3.3).

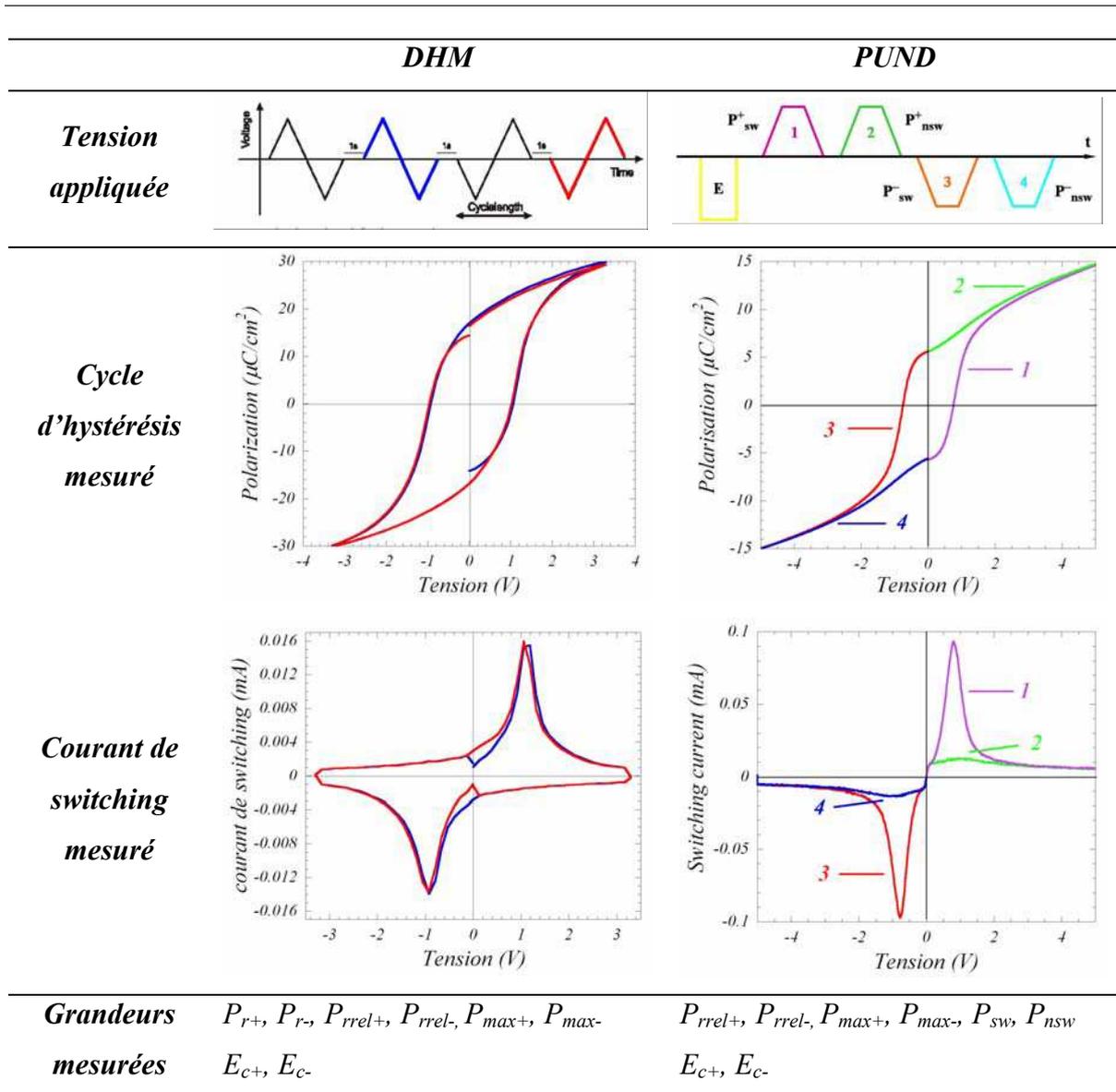


Tableau 1-4 : Réponse d'un condensateur à différents types de tensions (tension appliquée, boucle d'hystérésis mesurées et courant de switching associés). Les mesures présentées ont été effectuées sur des échantillons différents.

1.2.1.2.2 Contribution réversible et irréversible de la polarisation

Il est communément admis que la réponse électrique d'un matériau ferroélectrique varie en fonction de la tension appliquée à ses bornes (Bartic, 2001 ; Waser, 2003). En effet, si celle-ci est supérieure à la tension coercitive, le matériau "switch". En revanche, s'il est soumis à une tension relativement faible (typiquement < 1 V pour des films minces d'une centaine de nanomètres d'épaisseur), le matériau suit une caractéristique électrique linéaire. En d'autres termes, le comportement électrique d'un matériau ferroélectrique, passe, par augmentation de la tension appliquée, d'une caractéristique diélectrique linéaire à une caractéristique non linéaire et hystérétique. La réponse diélectrique (linéaire) à des tensions de faible amplitude

met en évidence l'existence d'une contribution *réversible* de la polarisation (Bhattacharyya *et al.*, 2002 ; Waser, 2003 ; Bolten *et al.*, 2003). Par analogie avec le ferromagnétisme (Chikazumi & Charap, 1964), on peut donc définir la polarisation comme la somme d'une polarisation réversible et d'une polarisation irréversible (Figure 1-13). Dans les mémoires, seule la contribution irréversible de la polarisation permet de stocker l'information.

Comme le montre la Figure 1-13-a, la mobilité d'une paroi de domaine, sous l'effet d'un champ électrique externe, peut être représentée par une énergie potentielle liée à l'interaction de la paroi avec le réseau cristallin, les défauts, les dislocations ainsi qu'avec les parois de domaines adjacents. Les mouvements réversibles sont caractérisés par les petits déplacements autour d'un minimum local de ce potentiel. En revanche, dès que le champ électrique appliqué dépasse une certaine valeur, un saut irréversible vers un puits de potentiel voisin apparaît. Selon ce principe, le cycle d'hystérésis peut être redéfini comme une succession de segments alternativement réversibles et irréversibles (Figure 1-13-b).

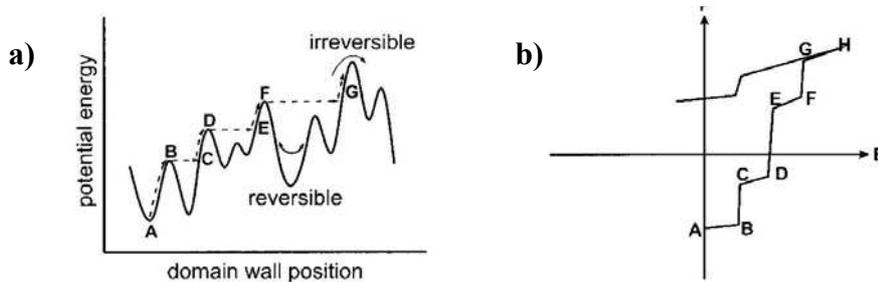


Figure 1-13 : a) mobilité d'une paroi de domaine dans un potentiel statistique et b) cycle d'hystérésis associé (d'après Waser, 2003).

Dès lors, il devient primordial, pour caractériser le matériau, de pouvoir séparer ces deux contributions. Pour ce faire, deux méthodes peuvent être employées (Bolten *et al.*, 2003) :

- Mesure "C-V" de la capacité en fonction de la tension appliquée :

Dans cette méthode, une tension alternative de faible amplitude (10 – 50 mV ; 10 - 100 kHz) est superposée à une tension continue en marches d'escalier permettant de retracer le cycle d'hystérésis (Figure 1-14-a). D'après le raisonnement du paragraphe précédent, l'évolution par paliers de tensions continues permet de passer d'un puits de potentiel donné vers un puits voisin. A chaque palier, le petit signal alternatif fait vibrer de manière réversible les parois de domaine à l'intérieur d'un minimum local du potentiel d'interaction défini précédemment. Ainsi, il est possible de reconstruire, point par point, l'évolution de la polarisation réversible.

La courbe typique obtenue par cette méthode (Figure 1-14-b) présente une forme de type “ailes de papillons” dont les deux maxima correspondent aux tensions coercitives pour lesquelles le nombre de parois de domaine est maximal. Sachant que par définition $C = dQ/dV$, la polarisation réversible peut être obtenue par intégration de la courbe C-V (Bhattacharyya *et al.*, 2002 ; Bolten *et al.*, 2003) :

$$P_{rev} = \frac{1}{A} \int C(V) dV$$

Dans cette relation, A représente la surface du condensateur. Par cette méthode, il est possible de corriger le cycle d’hystérésis dynamique mesuré de la contribution réversible de la polarisation (Figure 1-14c).

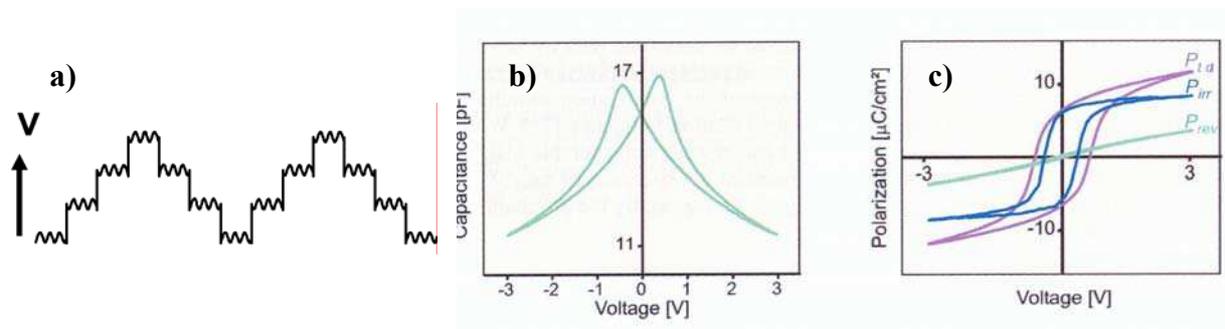


Figure 1-14 : mesure C-V : a) principe de la mesure : une tension alternative de faible amplitude est superposée à une tension continue retraçant, par palier, le cycle d’hystérésis ; b) résultat de la mesure C-V : courbe en forme d’ailes de papillon, les deux maxima correspondant aux deux tensions coercitives ; c) contribution réversible et irréversible de la polarisation (d’après Waser, 2003).

- Mesure dite de “*recoil curve*” (Figure 1-15):

Dans ce cas, afin de mesurer la polarisation irréversible, l’échantillon est prépolarisé négativement (P_r) puis placé dans un état (E, P) donné sur le cycle d’hystérésis de manière à définir $P_{tot} = |P_r| + P$. Le champ électrique est alors annulé et la polarisation irréversible est définie comme la somme de la polarisation mesurée à champ nul et de $|P_r|$. La polarisation réversible est, quant à elle, déterminée par la différence entre la polarisation totale et la polarisation irréversible. Ceci n’est évidemment valable que si aucun changement irréversible n’a lieu au moment où le champ électrique est coupé. Pour s’en assurer, il est impératif que le cycle de prépolarisation de l’échantillon soit effectué à une tension supérieure à celle utilisée pour la mesure ($V_{max} > V$). D’autre part, il faut que la fréquence de la tension triangulaire initiale soit relativement faible (1 – 1000 Hz) et que, comme le montre la Figure 1-15-a, la pente de la tension appliquée pendant la mesure ne change pas.

Par cette méthode il est possible de retracer, en fonction de la tension appliquée (V) l’évolution des polarisations réversible, irréversible et totale (Figure 1-15-c).

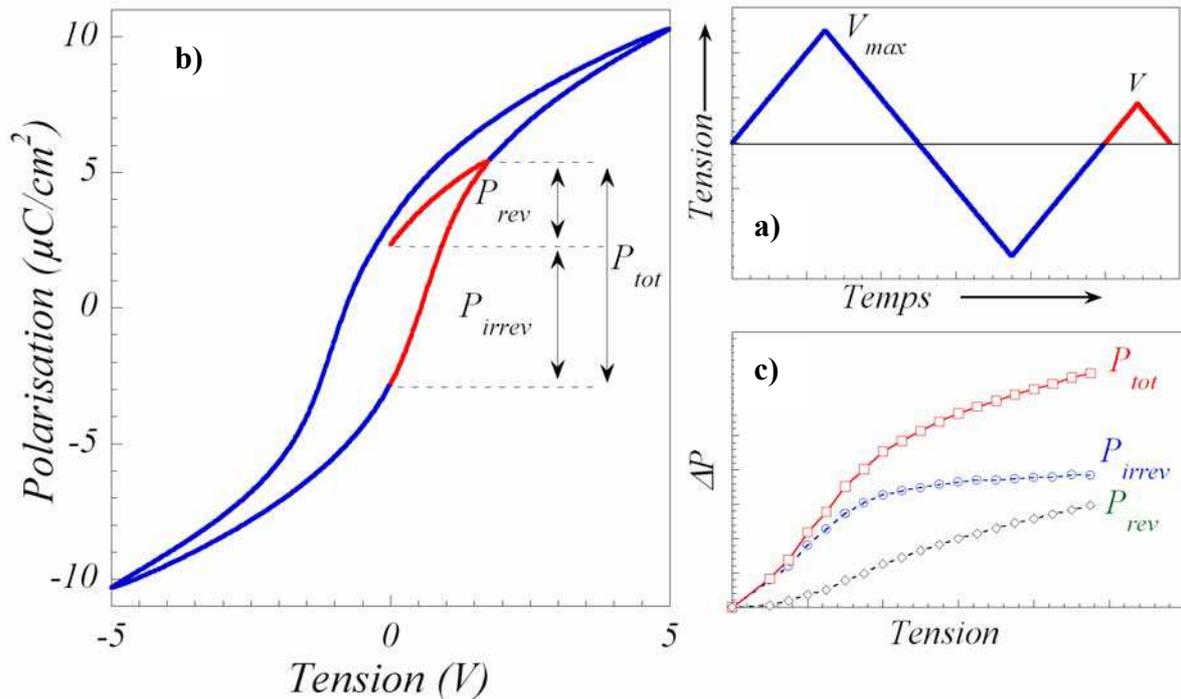


Figure 1-15 : principe de mesure d’une “recoil curve” : a) forme de la tension appliquée (il n’y a pas de changement de pente sur la montée/descente en tension) ; b) principe de détermination des polarisations irréversible et réversibles ; c) évolution des polarisations réversible, irréversible et totale en fonction de la tension appliquée.

1.2.1.3 Paramètres perturbant la mobilité des parois de domaines

Les matériaux ferroélectriques contiennent toujours des défauts qui peuvent interagir avec les parois de domaines et modifier la polarisation au sein même d’un domaine. Ceci se manifeste sur les mesures électriques précédemment décrites. Par exemple, les cycles d’hystérésis devraient idéalement être symétriques. Cependant, les mesures montrent que, le plus souvent, les différentes polarisations (rémanente, rémanente relaxée, maximale) ainsi que les champs coercitifs ne présentent pas des valeurs absolues identiques dans leurs “configurations” positive et négative. Ces défauts proviennent des trois éléments constitutifs d’un condensateur à savoir les électrodes, le matériau ferroélectrique et les interfaces électrodes/matériau ferroélectrique (rugosité d’interface...). Les étapes d’élaboration ont, dès lors, un rôle déterminant à jouer pour minimiser les défauts et ainsi optimiser les propriétés électriques du condensateur (Achard *et al.*, 1995 ; Lee *et al.*, 1996 ; Scott, 2000 ; Johnson *et al.*, 2003 ; Kim & Song, 2003). Cependant, pour un échantillon donné, il paraît primordial de comprendre le rôle joué par les défauts sur le renversement de polarisation. Cette partie vise ainsi à expliciter différents modèles proposés dans la littérature pour comprendre les mécanismes gouvernant le renversement de polarisation et pouvant altérer les propriétés électriques du condensateur.

1.2.1.3.1 Modification du processus de renversement de polarisation

Dans la section précédente, nous avons pu voir que deux grands scénarii sont envisagés pour interpréter le phénomène de “switching”, *i.e.* déplacement des parois de domaines et processus de nucléation/croissance de domaines. Les défauts présents dans le matériau ont une influence différente sur chacun de ces modes de renversement de polarisation. Dès lors, on distingue deux catégories de mécanismes de modification du caractère ferroélectrique d’un matériau : scénario de “bulk” (matériau massif) et scénario d’interface. La Figure 1-16 résume ces deux scénarii :

- Dans l’épaisseur du matériau, le renversement de polarisation s’opère, principalement, par mouvement des parois de domaines. Dans ce cas, les défauts structuraux interagissent avec les parois de domaines et les empêchent de retourner dans leur état initial après annulation du champ électrique appliquée : c’est le phénomène d’**ancrage** ou de “**pinning**”. Pour une faible concentration de défauts au niveau des parois de domaines, il est possible de renverser la polarisation grâce à l’application d’un champ électrique dans la direction opposée (phénomène de désancrage). Cependant, si la concentration de défauts au niveau des parois de domaines devient trop importante, certains domaines restent figés et ne sont plus sensibles au champ électrique appliqué. Ainsi, l’augmentation du nombre de défauts aux parois de domaines favorise le phénomène d’ancrage et modifie ainsi le caractère ferroélectrique du matériau. Différents défauts peuvent provoquer ce genre de modifications : lacunes d’oxygène, électrons, trous... (Scott *et al.*, 1991; Desu & Yoo, 1993, Al-Shareef *et al.*, 1997, Damjanovic, 1998).

- Dans un matériau ferroélectrique en couche mince, le renversement de polarisation peut aussi avoir lieu par nucléation croissance de domaines dont la polarisation spontanée est opposée à la polarisation initiale. L’énergie requise pour activer le phénomène de nucléation étant importante, seules certaines zones du matériau y sont propices (Tagantsev *et al.*, 2001). En particulier, à l’interface entre le matériau ferroélectrique et l’électrode, la forte concentration de défauts et la rugosité de l’interface créent des conditions favorables à la germination de domaines. Cependant, sous l’effet de différentes sollicitations (cyclage électrique par exemple), la migration et l’accumulation de défauts électroniques et/ou ioniques aux interfaces peut empêcher la croissance de ces germes, réduisant ainsi la capacité du matériau à switcher.

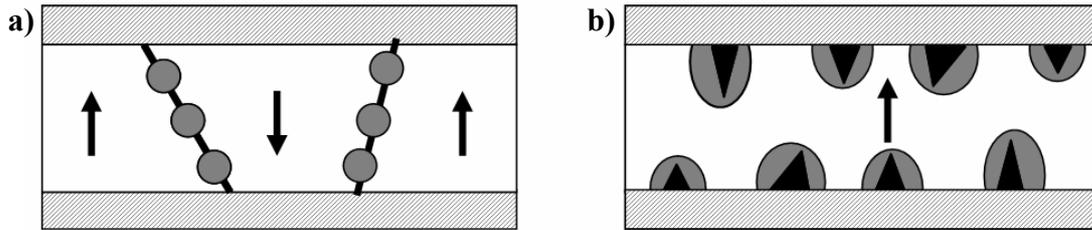


Figure 1-16 : discrimination entre a) scénario d'ancrage des parois de domaines dans l'épaisseur du matériau et b) scénario d'interface : inhibition du processus de nucléation/croissance de domaines antiparallèles.

1.2.1.3.2 Présence d'une "couche passive"

Un autre phénomène peut altérer les propriétés électriques d'un matériau ferroélectrique d'un matériau. En effet, généralement, près de la surface d'un ferroélectrique, la polarisation fluctue (Kretschmer & Binder, 1979). Ce constat supporte l'hypothèse de la présence d'une "couche d'interface" à la surface du matériau (Kanzig, 1955). Cette fine couche présentant un gradient de polarisation dans son épaisseur se comporte comme un diélectrique inséré entre une électrode et un ferroélectrique idéal (Benedetto *et al.*, 1994 ; Tagantsev *et al.*, 1995 ; Tagantsev & Stolichnov, 1999). D'après Tagantsev *et al.* (Tagantsev *et al.*, 2001), la présence de cette couche passive peut avoir deux origines :

- (i) Dans le premier cas, la nucléation, au niveau des interfaces, de domaines de polarisation antiparallèle entraîne l'apparition d'un champ électrique local. Ce dernier favorise l'injection de charges des électrodes vers le matériau qui vont altérer localement le caractère ferroélectrique de la couche (Tagantsev & Stolichnov, 1999).
- (ii) L'autre origine possible est la présence d'une phase cristallographique différente entre l'électrode et le ferroélectrique.

Dans tous les cas, la variation d'épaisseur de cette couche altère les propriétés électriques du matériau par l'apparition, au sein de cette couche, d'un champ électrique qui conduit à l'écrantage de la polarisation (Tagantsev & Stolichnov, 1999).

1.2.1.3.3 Champ local

Dans une approche plus globale, Shur *et al.* (Shur *et al.*, 2003) ont proposé un modèle de nucléation/croissance visant à interpréter les courants de switching (cf. section 1.2.1.2.1). Dans ce cas, la tension triangulaire appliquée pour faire switcher le matériau est vue comme une succession de paliers très rapides. D'autre part, le matériau ferroélectrique est divisé en

un quadrillage représentatif de l'arrangement en domaines. Comme le montre la Figure 1-17, le processus de nucléation/croissance est décomposé en trois grandes étapes. Il y a d'abord nucléation de **germes** dans le matériau, puis croissance par les domaines adjacents. Certains de ces domaines deviennent ensuite eux même des germes de croissance qui assurent le switching du matériau de proche en proche. Il est important de noter que la fraction de domaines non renversés permet d'interpréter l'évolution des propriétés électriques.

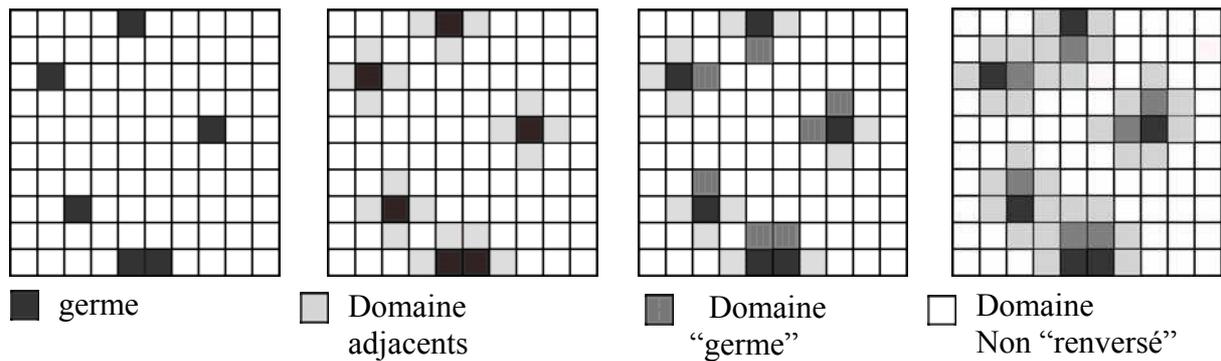


Figure 1-17 : Processus de nucléation/croissance proposé par Shur *et al.* (Shur *et al.*, 2003c).

La probabilité de nucléation dépend de la valeur locale du champ électrique. En effet, l'originalité de cette approche tient au fait que si on considère des régions de volumes proches de celui occupé par un germe, le champ électrique peut, pour différentes raisons (rugosité d'interface, défauts locaux...), fluctuer dans de grandes proportions d'une région à l'autre.

Afin de valider cette approche combinée de **champs électriques locaux** et de processus de nucléation/croissance, il convient de définir des champs électriques "seuil" pour la nucléation ($E_{th\ n}$) et pour la croissance ($E_{th\ gr}$) des domaines (tels que $E_{th\ n} > E_{th\ gr}$). Dans le cas où le champ électrique local est supérieur à ces seuils, il peut y avoir nucléation puis croissance de domaines et donc renversement de polarisation.

Le champ électrique local (E_{loc}) est déterminé par la somme de trois champs (Shur, 1998):

- (i) Le champ électrique appliqué (E_{ext}) sur lequel s'aligne le vecteur polarisation.
- (ii) Le champ de dépolarisation (E_{dep}) opposé au précédent. Il est dû à l'inhomogénéité locale de polarisation, à la surface de l'échantillon et au niveau des parois de domaines.
- (iii) Le champ d'écrantage ("screening"). Ce dernier est lui-même la somme de deux champs : l'un produit par l'accumulation de charges aux électrodes

($E_{ex.scr}$) ; l'autre causé par les charges (charges d'espace, dipôles) accumulées dans l'épaisseur de la couche ("**bulk screening**" : $E_{b.scr}$) (Figure 1-18).

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{dep} + \vec{E}_{ext.scr} + \vec{E}_{b.scr}$$

Il est important de mentionner que cette approche prend en compte la présence de couches passives, ne présentant pas de polarisation spontanée, aux interfaces (cf. paragraphe précédent). La présence de telles couches a pour conséquence de séparer les charges de dépolarisation et d'écrantage externe. Ceci implique que le champ de dépolarisation ne peut être entièrement compensé par les charges d'écrantage externes. Ainsi, sous l'application d'un champ électrique externe, un champ de dépolarisation résiduel (E_{dr}), antiparallèle à la polarisation, est présent dans le matériau tel que :

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{dr} + \vec{E}_{b.scr}$$

Le phénomène de "bulk screening" est, dès lors, le seul à pouvoir compenser le champ de dépolarisation résiduel (cf. section précédente). Cependant, ce phénomène répond à une cinétique beaucoup plus lente que celle du switching. De ce fait, il peut engendrer plusieurs effets comme le backswitching des domaines après annulation du champ électrique externe, ou l'apparition d'un champ constant ("bias") dans le cycle d'hystérésis ou encore l'apparition d'instabilités dans les caractéristiques de switching. On peut donc constater que dans ce modèle, c'est principalement la cinétique d'écrantage dans le matériau massif qui détermine le mouvement des parois de domaines et donc la réponse électrique du condensateur ferroélectrique.

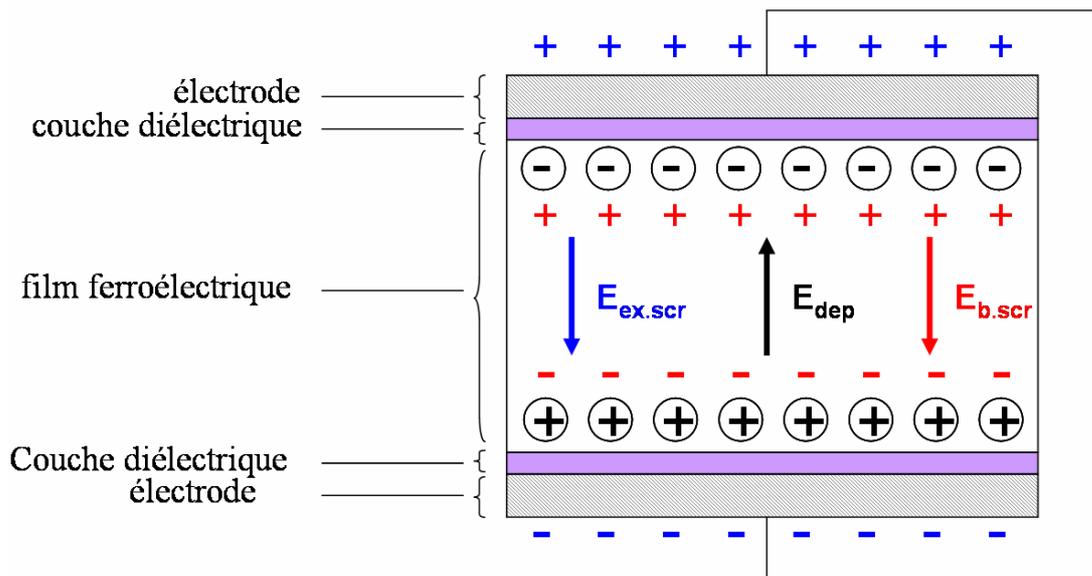


Figure 1-18 : modèle d'écrantage de la polarisation dans l'épaisseur de la couche mince ferroélectrique.

1.2.2 Mécanismes de défaillance

En réponse à différentes sollicitations externes telles que le cyclage, l'application d'une tension continue, ou même la simple influence du temps, les propriétés électriques d'un condensateur ferroélectrique évoluent en fonction du type de matériau le constituant. Trois grands modes de défaillance sont associés à la technologie FeRAM (Kington & Streiffer, 1999 ; Scott, 2000 ; Waser, 2003) : la *fatigue*, l'*imprint* et la *rétenion*. Les prochains paragraphes présentent succinctement ces différents modes de défaillance et décrivent les phénomènes physiques qui en sont à l'origine.

1.2.2.1 Fatigue

1.2.2.1.1 Quelle est la manifestation de la fatigue ?

La fatigue (correspondant à l'*endurance* dans les dispositifs) est définie comme la réduction de polarisation de switching en réponse au cyclage électrique (Figure 1-19). Ce mode de défaillance est très dommageable dans les mémoires car il pose un problème de lecture de l'information. En effet, si la diminution de polarisation devient trop importante, il est impossible de distinguer les courants de switching (j_1) et de non switching (j_0) décrits dans la partie 1.1.2.3. Ainsi, des erreurs de lecture apparaissent et altèrent la fiabilité de la mémoire. Typiquement, dans les mémoires FeRAM, le nombre de cycle d'écriture/lecture supporté par le condensateur ferroélectrique sans perte significative de polarisation devrait être de 10^{15} cycles. Cette caractéristique varie beaucoup d'un matériau à l'autre. Par exemple, les matériaux PZT présentent une moins bonne résistance intrinsèque à la fatigue que SBT (Paz de Araujo *et al.*, 1995 ; Park *et al.*, 1999b) ou BLT (Park *et al.*, 1999a). Cependant, des optimisations dans les étapes d'élaboration peuvent permettre de pallier en partie ce problème (Kim & Song, 2003).

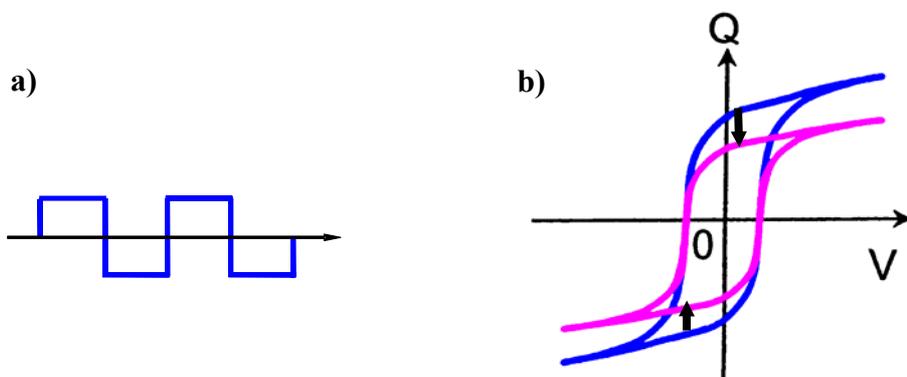


Figure 1-19 : Effet de a) la fatigue électrique (cyclage carré d'amplitude et de fréquence variables) sur b) la forme du cycle d'hystérésis (Q,V) (en bleu : état initial ; en rose : après cyclage).

1.2.2.1.2 Modèles physiques à l'origine de la fatigue

Généralement, la diminution de polarisation provoquée par le cyclage électrique est associée à d'autres phénomènes comme le basculement ou "tilt" du cycle d'hystérésis (changement de pente au champ coercitif) et une diminution des courants de switching. D'autre part, le plus souvent, il n'y a pas, à fort champ électrique, de variation significative de la pente du cycle (pas de variation de la polarisation réversible). Aujourd'hui, le phénomène est encore mal compris mais toutes ces observations ont permis de proposer des modèles physiques permettant de mieux appréhender le problème. Ceux-ci sont basés sur les théories de switching présentées dans le paragraphe 1.2.1.2 et sont explicités plus en détail dans l'article de Tagantsev *et al.* (Tagantsev *et al.*, 2001).

- Ancrage des parois de domaines

Comme cela a déjà été présenté dans la section précédente, le phénomène d'ancrage des parois de domaines peut modifier les caractéristiques de switching d'un matériau en réduisant le nombre de domaines susceptibles de switcher sous l'effet du champ électrique appliqué. Il est communément admis que ce phénomène peut apparaître lors du cyclage électrique. En effet, dans certaines conditions, le cyclage peut favoriser la ségrégation de défauts aux parois de domaine. Deux types de défauts majeurs sont mis en jeu dans ces phénomènes : les lacunes d'oxygène dont l'influence est le plus souvent discutée pour les PZT (Duiker *et al.*, 1990 ; Scott *et al.*, 1991) et les charges électroniques (Al-shareef *et al.*, 1996b ; Al-shareef *et al.*, 1997). Le premier scénario est supporté par le fait que les PZT, peu résistants à la fatigue quand ils sont déposés sur des électrodes métalliques, présentent une très bonne endurance quand ils sont déposés sur des électrodes oxydes conductrices, l'électrode jouant, dans ce cas, le rôle de "réservoir" d'oxygène. Dans le second cas, les parois de domaines, présentant une discontinuité de polarisation, attirent les charges électroniques libres afin de diminuer l'énergie des parois de domaines. Le phénomène de fatigue peut ainsi être interprété comme la compétition entre le "pinning" des parois de domaines du au piégeage des porteurs de charges et le "dépinning" assisté par le cyclage électrique (Al-shareef *et al.*, 1996b ; Dimos *et al.*, 1996 ; Zhang *et al.*, 2001).

- Inhibition du processus de nucléation/croissance aux interfaces

Le cyclage peut aussi entraîner une perte de polarisation en inhibant le processus de nucléation/croissance de domaines aux interfaces entre le matériau ferroélectrique et les électrodes (cf partie 1.2.1.3.1) (Colla *et al.*, 1997 ; Colla *et al.*, 1998 ; Colla *et al.*, 2003).

L'application d'un champ électrique assez fort peut toutefois renverser (annuler) ce phénomène. Colla *et al.* (Colla *et al.*, 1998) ont proposé une méthode simple pour distinguer le phénomène d'inhibition du processus de nucléation/croissance de domaines aux interfaces de celui d'ancrage des parois de domaine. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie 1.2.1.2.2, la mesure C-V permet de faire vibrer les parois de domaines ferroélectriques par l'application d'une tension alternative de faible amplitude. Ainsi, cette mesure permet d'estimer qualitativement la proportion de domaines présents à chaque palier de tension. Avant fatigue, un matériau ferroélectrique (PZT orienté (111) par exemple) est supposé être quasi-monodomaine à fort champ électrique appliqué. Dans le cas où le phénomène d'inhibition du processus de nucléation/croissance est mis en jeu pendant le cyclage, la capacité à fort champ reste constante quel que soit le nombre de cycles appliqués (*i.e.* même permittivité diélectrique). Ceci implique que les matériaux ainsi fatigués présentent des domaines larges (peu de parois de domaines) (Colla *et al.*, 1997 ; Colla *et al.*, 1998). En revanche, dans le cas où la fatigue est dominée par un processus d'ancrage des parois de domaines, la densité de parois reste élevée à fort champ électrique. Ces parois ancrées ne participent plus au processus de switching mais contribuent encore (par recourbement et vibration) à la réponse capacitive. Ainsi, dans le cas où ce phénomène est mis en jeu, la fatigue s'accompagne d'une augmentation de la capacité à fort champ électrique.

- Formation d'une couche passive

Le fait d'appliquer aux bornes du matériau ferroélectrique une tension alternative peut conduire à la formation et à la croissance d'une couche passive aux interfaces avec les électrodes. Comme nous l'avons vu dans la partie 1.2.1.3.2, la présence de cette couche modifie le caractère ferroélectrique du matériau en diminuant la polarisation. D'autre part, d'après les modèles de Tagantsev *et al.* (Tagantsev *et al.*, 1995) et Robels *et al.* (Robels *et al.*, 1995), ce mécanisme doit être accompagné d'un "tilt" du cycle d'hystérésis sans toutefois modifier le champ coercitif.

- Imprint local

Nous avons discuté, dans le paragraphe 1.2.1.3.3 le modèle de Shur *et al.* visant à interpréter les modifications du caractère ferroélectrique d'un matériau. Cette approche, basée sur le rôle de l'effet de "bulk screening", a été proposée pour expliquer les modifications des courants de switching en réponse au cyclage (Shur *et al.*, 2001). Le point clé de ce scénario réside dans le fait que des charges d'écrantage présentes dans l'épaisseur du matériau peuvent y être

bloquées. Ceci entraîne, localement, des variations du champ électrique rendant impossible, le renversement de la polarisation (cf. modèle de nucléation/croissance présenté dans la section 1.2.1.3.3). Il y a donc, localement, dans l'épaisseur du matériau, formation de domaines "gelés" par l'effet d'écrantage. Chacun de ces domaines présente une polarisation propre, ce qui induit, toujours à l'échelle locale, l'apparition d'états privilégiés en domaines. Globalement, le matériau est donc formé d'une somme de zones gelées présentant des champs électriques (ou bias) différents. Ce phénomène est encore appelé "imprint" local de la polarisation. La notion d'imprint sera traitée plus en détail dans la section 1.2.2.2.

Pour résumer, tous les mécanismes discutés précédemment mettent en évidence des variations de la densité de défauts. Pour les mécanismes d'inhibition du processus de nucléation/croissance et de couche passive, la fatigue est associée à une augmentation de la concentration de défauts aux interfaces. En revanche, dans le cas de l'ancrage des parois de domaines et de l'imprint local, il y a ségrégation des défauts dans l'épaisseur du matériau et aux parois de domaines. D'après Tagantsev *et al.* (Tagantsev *et al.*, 2001), il existe deux manières de provoquer ces variations de défauts : la redistribution de défauts pré-existant (lacunes d'oxygène par exemple) dans le matériau et la création de nouveaux défauts due à l'injection d'électrons à partir des électrodes (cf. section 1.2.1.3.2). Néanmoins, parmi les mécanismes de fatigue cités précédemment, aucun ne permet d'expliquer, simultanément, toutes les manifestations électriques associées à la fatigue. En effet, les phénomènes mis en jeu dans la fatigue sont très variés et différent d'un matériau et d'une composition à l'autre. Ainsi, la compréhension actuelle du phénomène de fatigue ne permet pas d'en identifier une cause unique mais plutôt de l'attribuer à une somme de contributions. Toutefois, il faut noter que la discussion précédente ne prend pas en compte d'éventuelles modifications structurales au sein du matériau en réponse au cyclage. Cette possible relation entre la modification de polarisation et les changements structuraux, sera développée en détail dans les chapitres suivants et constitue une part importante du travail présenté dans ce mémoire.

1.2.2.2 Imprint

1.2.2.2.1 Comment se manifeste le phénomène d'imprint ?

Le phénomène d'imprint caractérise la tendance d'un matériau ferroélectrique à favoriser, sous certaines conditions, un état de *polarisation préférentiel*. En effet, comme le montre la Figure 1-20, l'application d'une tension positive (continue ou pulsée) conduit à favoriser l'état de polarisation rémanent positif et induit un déplacement du cycle d'hystérésis vers les tensions négatives. Le phénomène est strictement opposé dans le cas où la tension appliquée est négative. Toutefois, il faut noter que les conditions d'élaboration d'un matériau peuvent être à l'origine du phénomène d'imprint sans application d'un champ électrique externe (cf. section suivante).

Dans les mémoires, l'apparition de ce phénomène entraîne deux types de défaillance (Grossman *et al.*, 2000a ; Waser, 2003) :

- (i) Le déplacement global du cycle d'hystérésis induit une dissymétrie dans la réponse électrique du matériau, la valeur absolue de l'un des champs coercitifs étant considérablement augmentée (E_c dans la Figure 1-20). Si la tension utilisée pour l'écriture de l'information n'est pas assez importante, *i.e.* ne dépasse pas la valeur de cette nouvelle tension coercitive, il est impossible d'écrire une donnée : c'est la *défaillance en écriture*.
- (ii) Le déplacement latéral du cycle d'hystérésis donne également lieu à une diminution drastique de l'une des deux polarisations rémanentes (P_r dans la Figure 1-20). Ceci entraîne une diminution de l'écart entre les polarisations de switching et de non-switching du matériau. Il devient donc rapidement impossible de discriminer les deux états de polarisations et donc de lire la donnée inscrite : c'est la *défaillance en lecture*.

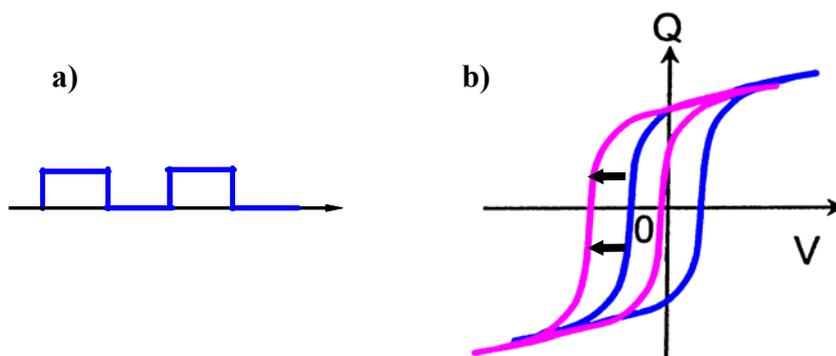


Figure 1-20 : effet de l'imprint sur le cycle d'hystérésis : a) tension appliquée (pulsée ou continue) ; b) évolution du cycle d'hystérésis $Q(V)$ (en bleu avant imprint ; en rouge : après imprint).

1.2.2.2.2 Modèles physiques à l'origine de l'imprint

Dans la littérature, trois types de modèles sont proposés pour expliquer le phénomène d'imprint. Une discussion globale de ces modèles est proposée dans l'article de Grossman et al. (Grossman *et al.*, 2002) et dans l'ouvrage de R. Waser (Waser, 2003).

- Alignement de dipôle ("defect dipoles")

Ce modèle a été proposé pour expliquer la formation spontanée (provoquée par les conditions d'élaboration) d'un champ électrique interne (imprint) dans des céramiques ferroélectriques dopées par des cations de valence inférieure à celle des cations constitutifs du matériau ferroélectrique (Arlt & Neuman, 1988 ; Lohkämper *et al.*, 1990). L'interprétation de ce phénomène est basée sur le respect de l'électroneutralité. En effet, le dopage par des cations de valence inférieure impose la formation de lacunes chargées positivement. Il est communément admis que ces défauts sont des lacunes d'oxygène qui constituent les seules espèces ioniques mobiles pour les températures de synthèse auxquelles le champ interne est observé. Les dipôles permanents (lacunes d'oxygènes/ions accepteurs) ainsi créés peuvent être alignés dans le sens de la polarisation spontanée du matériau ferroélectrique. Dans les matériaux polarisés, cet alignement des dipôles stabilise l'état de polarisation macroscopique en induisant un champ électrique interne (bias) qui se manifeste par un déplacement du cycle d'hystérésis. De plus, ce modèle permet d'interpréter le fait que l'imprint est accéléré par la température grâce à l'activation thermique de la mobilité des lacunes d'oxygène.

En revanche, il faut noter que le dopage par des cations de valence supérieure à celle des cations constitutifs du matériau ferroélectrique, conduit à l'apparition de lacunes cationiques qui forment des dipôles immobiles. Ceci a plutôt tendance à réduire la concentration des dipôles mobiles et donc à réduire le phénomène d'imprint (Grossman *et al.*, 2002).

- Ecrantage dans l'épaisseur du matériau

Certains résultats expérimentaux suggèrent que l'alignement de dipôles n'est pas le processus dominant pour expliquer l'imprint dans les films minces. En effet, certains auteurs ont montré que l'illumination d'un condensateur ferroélectrique par un rayonnement ultra-violet augmente considérablement le phénomène d'imprint (Warren *et al.*, 1995 ; Al-Shareef *et al.*, 1996a). Les lacunes d'oxygène n'étant pas ou peu influencées par l'irradiation, ceci fait des espèces électroniques (électrons, trous) les principaux acteurs du scénario d'imprint.

Ces résultats expérimentaux ont été interprétés dans le cadre du "bulk screening effect" (cf. section 1.2.1.3.3). Dans cette approche, le champ de dépolarisation résiduel, imposé par la

présence d'une couche non ferroélectrique entre l'électrode et le film ferroélectrique, est responsable de la séparation des charges d'écrantage externes et des charges de polarisation. L'illumination augmentant la densité de charges libres, le phénomène de piégeage près de l'interface électrode/film mince (le mécanisme de blocage est encore mal compris) est favorisé et provoque, par la même, l'écrantage de la polarisation interne. La cinétique de dépiégeage des charges étant beaucoup plus lente que celle du switching, ces charges restent bloquées après le renversement de la polarisation ce qui entraîne la formation d'un champ électrique interne (bias) et, par voie de conséquence, un déplacement du cycle d'hystérésis.

- Ecrantage aux interfaces

Une autre approche, voisine de la précédente, a récemment été proposée par Grossman *et al.* (Grossman *et al.*, 2002). Dans ce modèle, la différence de comportement électrique entre la couche d'interface et le cœur du matériau entraîne la formation d'un champ électrique, dans la couche de surface, pointant dans la direction de polarisation. C'est ce champ électrique d'interface et non pas le champ de dépolarisation résiduel, qui serait responsable de la séparation des charges dans la couche passive et donc de l'imprint. L'application d'un champ électrique externe dans le sens de la polarisation renforce l'imprint par augmentation de ce champ interne.

Il est à noter que, dans le cas où des espèces électroniques sont responsables de l'imprint, celui-ci peut être amoindri par l'application aux bornes du condensateur ferroélectrique d'un champ électrique alternatif d'amplitude suffisante. C'est le phénomène de "*rajeunissement*" ou de "*réjuvénation*".

1.2.2.3 Rétention

La rétention d'un matériau ferroélectrique est son aptitude à conserver un état de polarisation donné dans le temps. En effet, sous le seul effet du temps, les polarisations rémanentes ont tendance à se rapprocher l'une de l'autre (Figure 1-21). Comme pour la fatigue, ce mode de défaillance, peut aboutir, à terme, à une mauvaise lecture de l'information stockée dans la cellule mémoire FeRAM. En terme de spécifications technologiques, une mémoire FeRAM doit être capable de conserver une information inscrite pendant dix ans à 85°C.

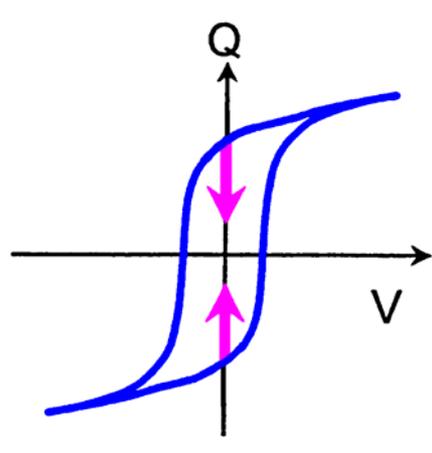


Figure 1-21 : effet de la rétention (vieillesse) sur le cycle d'hystérésis.

Les modèles physiques proposés pour expliquer ce phénomène ne diffèrent pas de ceux envisagés dans les deux autres modes de défaillance. En effet, le temps peut avoir un effet sur l'ancrage des parois de domaines et sur la migration de défauts aux interfaces entraînant une inhibition de la nucléation/croissance de domaines. D'autre part, la formation d'une couche passive et le principe d'écrantage dans l'épaisseur du matériau peuvent aussi être mis en jeu. Comme nous l'avons déjà mentionné dans la partie 1.2.1.3.3 ce dernier est l'une des causes responsable du "backswitching" des domaines. Ce phénomène de relaxation relativement rapide peut être vu comme la première manifestation de l'effet du temps sur la polarisation. Toutefois, les cinétiques dans les deux cas sont très différentes. Il faut aussi noter que ce phénomène de vieillissement est le plus souvent réversible à condition d'appliquer un cyclage d'amplitude suffisante.

1.3 Une approche "bottom-up"

Hypothèse de travail & problématique

Cette brève introduction a mis en évidence les potentialités et les limitations de la technologie FeRAM. Compte tenu de la maîtrise des technologies CMOS actuelles ($> 0,18 \mu\text{m}$), on peut considérer que la fiabilité d'une mémoire FeRAM est principalement limitée par la dégradation du condensateur ferroélectrique intégré. Dans ce contexte, le travail de thèse a été axé sur l'identification et la compréhension des mécanismes physiques à l'origine des modes de défaillance de la technologie FeRAM.

Motivations & objectifs

Les paragraphes précédents ont montré que, malgré la proposition de nombreux modèles théoriques, l'origine physique de la dégradation du comportement électrique des condensateurs (en fatigue et en imprint en particulier) est encore mal comprise. Le travail de thèse s'est appuyé sur l'association de caractérisations électriques et physiques afin d'apporter une contribution supplémentaire à la compréhension des mécanismes physiques responsables de la dégradation des propriétés électriques. Les objectifs peuvent être déclinés en quatre points majeurs :

- (i) Identifier et comprendre des modifications du comportement électrique du condensateur ferroélectrique sous sollicitations externes (stressés électriques et irradiation) ;
- (ii) Etablir des corrélations claires entre la dégradation des propriétés électriques (fatigue en particulier) et les modifications microstructurales au sein des condensateurs ;
- (iii) Evaluer et caractériser l'impact des étapes technologiques et de l'architecture (2D ou 3D) sur la fiabilité du condensateur intégré ;
- (iv) Qualifier une technologie déjà commercialisée.

Une approche transversale...

La caractérisation des modes de défaillance de la technologie FeRAM s'inscrit dans une approche "transversale" allant du condensateur élémentaire au composant en passant par les structures de tests.

- (i) Dans un premier temps, des études sur des condensateurs élémentaires (électrode/ferroélectrique/électrode) ont été menées afin de répondre aux deux premiers objectifs mentionnés précédemment.
- (ii) L'impact des étapes technologiques sur la fiabilité des condensateurs intégrés a ensuite été étudié sur des structures de tests comportant un ou plusieurs condensateurs et présentant des géométries 2D ou 3D.
- (iii) Enfin, sur la base de toutes ces études, les modes de défaillance associées à la mémoire ont été discutés en rapport avec le cahier des charges de la technologie FeRAM.

Echantillons et études effectuées

Le Tableau 1-5 résume l'ensemble des études présentées dans ce mémoire. Celles-ci sont divisées en trois grandes catégories :

- (i) Les analyses électriques (AE) regroupent les caractérisations “standards” de cycles d'hystérésis dynamiques, PUND, caractéristiques C-V et des tests de fatigue et d'imprint. Ces analyses ont été menées à l'aide des dispositifs Aixacct TFAAnalyser 2000 et HP4275A.
- (ii) Les analyses microstructurales (AM) ont, quant à elles, été menées par diffraction de rayons X sur source synchrotron et par microscopie électronique. Les expériences de diffraction ont été effectuées sur les lignes D2AM et ID18F à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facilities – Grenoble) et sur la ligne DW22 au LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique – Orsay).
- (iii) Il est apparu, lors des expériences de diffraction, un très fort impact du faisceau de rayons X sur les propriétés électriques des condensateurs. Ces analyses électriques sous irradiation X (AEI) ont été effectuées au LURE et à l'ESRF en utilisant un dispositif expérimental permettant de suivre à la fois l'évolution des propriétés électriques et microstructurales.

Ce mémoire est divisé en trois grandes parties allant du condensateur élémentaire vers le composant (Tableau 1-5):

- (i) En premier lieu, les études électriques, microstructurales et radiatives des condensateurs élémentaires ont été menées sur des condensateurs à base de SBT et de PZT :
 - 1) Les analyses sur les condensateurs élémentaires Pt/SBT/Pt ont été effectuées en partenariat étroit avec le groupe de D.J. Wouters à l'IMEC (Interuniversity Micro-Electronic Center – Louvain – Belgique).
 - 2) En collaboration avec le groupe de V. Ya. Shur de l'USU (Ural State University – Russie), des caractérisations ont été menées sur deux types de condensateurs Pt/PZT/Pt de compositions distinctes.

Il faut noter, toutefois, que contrairement aux condensateurs Pt/SBT/Pt, les condensateurs Pt/PZT/Pt n'ont pas vocation à être intégrés dans l'architecture d'une mémoire.

- (ii) La seconde partie de ce mémoire est consacrée à l'étude de réseaux de condensateurs Pt/SBT/Pt présentant des géométries 2D et 3D. Cette étude menée encore une fois en collaboration avec l'IMEC s'inscrit dans le cadre plus large du projet européen FLEUR (Ferroelectric for EUROpe). Les études menées ont eu pour objectif principal de comprendre le comportement électrique original associé à la géométrie 3D.
- (iii) Enfin, dans le cadre d'une collaboration plus récente (2003) avec Fujitsu, une démarche de qualification d'une technologie 0,35 μm a été développée dans la dernière partie de ce mémoire. Cette démarche va, encore une fois, du condensateur élémentaire au composant. Elle a été l'occasion d'estimer la fiabilité électrique de la technologie à partir de la comparaison de structures de tests (condensateurs élémentaires, condensateurs uniques intégrés et réseaux de condensateurs intégrés) mais aussi de caractériser la structure 2T/2C des points mémoires à l'aide de techniques non destructives de microdiffraction et microfluorescence X.

<i>Détails des études</i>			2002				2003				2004				
Provenance	Echantillons	Analyses	<i>Q1</i>	<i>Q2</i>	<i>Q3</i>	<i>Q4</i>	<i>Q1</i>	<i>Q2</i>	<i>Q3</i>	<i>Q4</i>	<i>Q1</i>	<i>Q2</i>	<i>Q3</i>	<i>Q4</i>	
USU (PZT)	Condensateurs élémentaires	AE													
		AM													
		AEI													
IMEC (SBT)	Condensateurs élémentaires	AE													
		AM													
		AEI													
	Réseaux de condensateurs intégrés 2D & 3D	AE													
		AM													
		AEI													
FUJITSU (PZT)	Condensateurs élémentaires	AE													
		AM													
		AEI													
	Condensateurs élémentaires intégrés	AE													
		AM													
		AEI													
	Réseaux de condensateurs intégrés 2D	AE													
		AM													
		AEI													
	Produit FeRAM	AE													
		AM													
		AEI													

AE : Analyses Electriques

AM : Analyses Microstructurales (diffraction X, fluorescence X, analyses MET...)

AEI : Analyses Electriques sous Irradiation X

Chapitre 2 

Chapitre 3 

Chapitre 4 

Tableau 1-5 : résumé des différentes analyses électriques et physiques présentées dans ce mémoires. Ces études ont été effectuées dans le cadre de diverses collaborations.