

Les évolutions de la magnétoscopie

Stéphane Graveleau, SREM Technologies

La magnétoscopie est une des plus anciennes méthodes de contrôle non destructif. Elle est couramment utilisée dans l'industrie pour inspecter de façon globale, fiable, rapide et pour un coût raisonnable, l'ensemble d'une pièce, pourvu que le matériau qui la constitue soit de nature ferromagnétique. Malgré cela, la magnétoscopie souffre aujourd'hui bien souvent d'une image désuète. Pourtant, la magnétoscopie a su évoluer et s'adapter aux contraintes industrielles actuelles. Technique largement éprouvée, elle mérite que l'on parle d'elle.

Largement éprouvée, la magnétoscopie est couramment utilisée dans les industries automobiles, aéronautiques ou ferroviaires pour contrôler des pièces en fer, en fonte, des aciers forgés, des soudures, des tôles, des tubes... Toutes sortes de pièces de géométrie simple ou complexe, pourvu que le matériau qui les constitue soit de nature ferromagnétique.

Comparativement aux autres techniques de contrôle non destructif tels que les ultrasons ou les courants de Foucault, la magnétoscopie présente l'avantage de faire partie des techniques dites « globales », permettant d'inspecter de façon fiable, rapide et pour un coût raisonnable l'ensemble d'une pièce en une seule opération (figure 1).

La magnétoscopie souffre bien souvent d'une image désuète. Pourtant, elle mérite que l'on parle d'elle. Basée sur un principe physique bien connu et simple qui repose sur le comportement des matériaux ferromagnétiques lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, elle a su innover et s'adapter à l'évolution des différents marchés. Incontournable dans les milieux industriels où la sécurité des pièces ferromagnétiques doit être parfaitement maîtrisée, les bancs de magnétoscopie offrent une solution simple pour un contrôle intégré au flux de fabrication ou par prélèvement. Un banc de magnétoscopie se compose généralement d'un générateur de champ longitudinal par tête magnétique ou

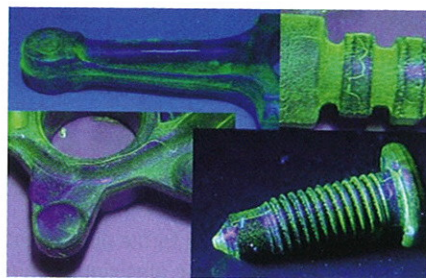
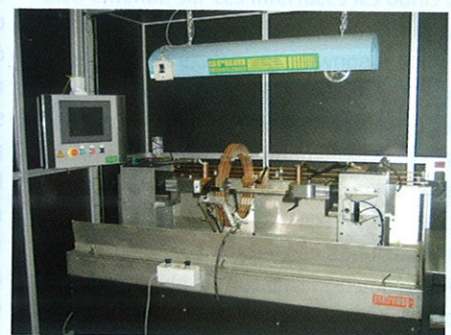
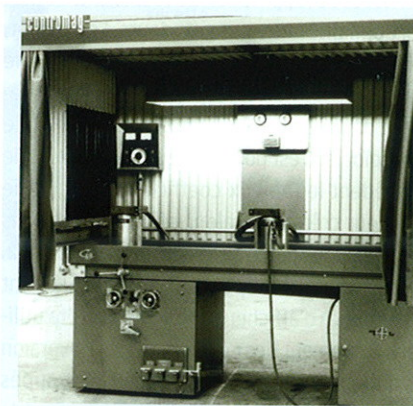


FIGURE 1 : Exemples de défauts révélés par magnétoscopie.

solénoïde, d'un générateur de champ transversal par passage de courant dans la pièce, d'un dispositif d'éclairage et d'un système d'arrosage (figures 2).



FIGURES 2 : Exemples de banc de magnétoscopie en 1960 à gauche et en 2006 à droite.

L'avènement de l'électronique et des thyristors

Autrefois basés sur l'utilisation de transformateurs à plusieurs positions pour permettre le réglage en puissance, les bancs sont aujourd'hui majoritairement pourvus d'une électronique de puissance qui va contrôler la quantité d'énergie transférée à la charge. Cette modification introduite par SREM Technologies en 1975 sous le nom de « Pulstronic » a suscité bien des polémiques car elle posait souvent des problèmes de mesure et d'interprétation. C'est probablement le travail réalisé en parallèle sur l'amélioration des instruments de mesure qui a permis de démocratiser la technique et par la suite de permettre bon nombre d'innovations sur les bancs de magnétoscopie. Le système électronique utilisé sur les bancs de magnétoscopie « Pulstronic » pour le contrôle de la puissance est un gradateur à thyristors (figure 3). Il a pour particularité de hacher l'onde sinusoïdale entrante plutôt que d'en modifier l'amplitude (cas de

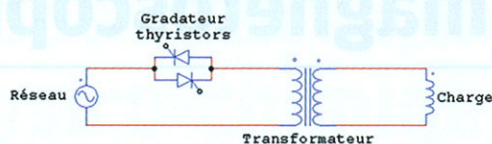


FIGURE 3 : Schéma de principe d'un banc avec gradateur thyristors

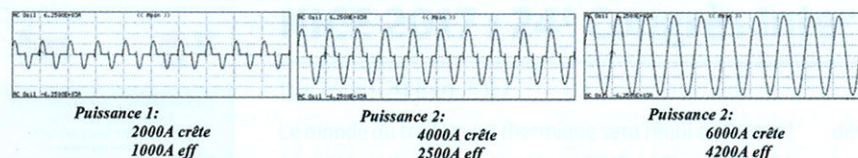


FIGURE 4 : Courant dans la charge.

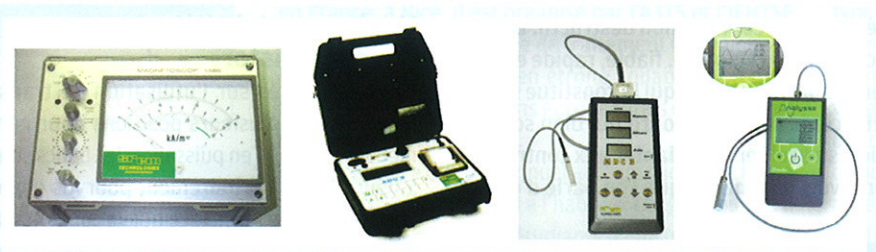


FIGURE 5 : Évolution des appareils de mesure de champ tangentiel.

- A - Magnétoscope 1580 (1970). Cadre mobile.
- B - ADC3 (1990). TRMS numérique.
- C - MDC3 (1995). TRMS analogique.
- D - Analyse (2003). TRMS numérique.

l'autotransformateur). La forme du courant dans la charge n'est donc plus sinusoïdale sauf à pleine puissance (figure 4).

Les premiers mesureurs de champ magnétique tangentiel mesuraient intrinsèquement une valeur moyenne (utilisation d'un redresseur interne dans le cas d'un signal alternatif) (figure 5). Les valeurs efficaces et crête, affichées ou calculées par l'opérateur, étaient en fait issues de l'application de coefficients de proportionnalité entre ces grandeurs. Cependant, ces coefficients ne sont pas applicables dans le cas d'un signal haché par thyristor mais uniquement dans le cas de signaux issus d'une onde sinusoïdale. C'est pour cela que dans l'exemple précédent le fameux coefficient $\sqrt{2}$ qui relie la valeur crête à la valeur efficace donne des résultats faux dans le cas des puissances 1 et 2. De même, à cette époque, certains bancs ont été équipés d'afficheurs de courant crête utilisant également des coefficients de conversion et donc non adaptés aux signaux découpés par thyristors. De très nombreuses erreurs de mesure et d'interprétation issues de ces problèmes, ont conduit à une grande confusion.

L'amélioration des techniques de mesure en particulier depuis la numérisation des signaux a permis de résoudre le problème avec l'apparition d'appareils dit « efficace vrai » (TRMS) capables de mesurer directement les valeurs efficace et crête de tous types de signaux.

Aujourd'hui la technique a gagné en maturité et est de mieux en mieux assimilée par l'utilisateur, aussi bien concernant le découpage par thyristor que la mesure de champ. Des appareils miniaturisés et très perfectionnés, tels que l'analyse, s'adaptent à toutes les situations et permettent de qualifier clairement le process par une mesure de champ efficace, crête ou moyenne, suivant la grandeur prescrite. Les bancs sont à présent équipés d'afficheurs de courant crête « réelle » et non plus basés sur les coefficients de conversion. Malgré cela et comme pour faire perdurer la confusion, la norme NF EN ISO 9934-1 de février 2002, comme l'ancienne norme NF A 09-590 de juillet 1989, parle principalement du contrôle de l'aimantation dans le cas de champs issus de signaux sinusoïdaux et avec des appareils nécessitant l'utilisation de coefficients de conversion entre les grandeurs. Sa révision qui devrait voir le jour courant 2016 est en cours de rédaction et cherche à combler cette lacune en favorisant l'utilisation d'équipements capables de mesurer des grandeurs « Efficaces Vraies » (TRMS - True Root Mean Square) et « Crêtes Réelles ».

L'avantage immédiat lié à l'utilisation de thyristors est que cette technique permet un réglage en continu de la puissance de sortie. Pour une magnétisation transversale par passage de courant par exemple, il devient possible de régler 700 A là où il fallait auparavant choisir entre 500 et 1 000 A. Il devient également possible de réaliser un cycle de démagnétisation automatique et rapide (≈ 10 s) par décroissance progressive du courant. Auparavant, la démagnétisation sur banc ne pouvait se faire que par inversion de polarité et diminution manuelle de la puissance. Cette opération était très lente (plusieurs minutes) et fastidieuse.

Pour la simplification et la fiabilisation du process

Il faudra attendre 1997 pour voir apparaître les premiers bancs proposant un système de régulation. C'est une grande avancée pour l'utilisateur et pour la fiabilisation du process

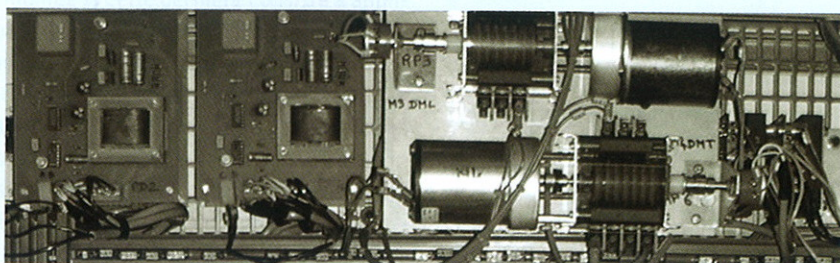


FIGURE 6 : Platine de commande du système « Pulstronic » motorisation de la commande pour assurer une démagnétisation automatique.

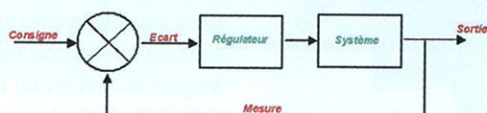


FIGURE 7 : Schéma de principe d'un système régulé.

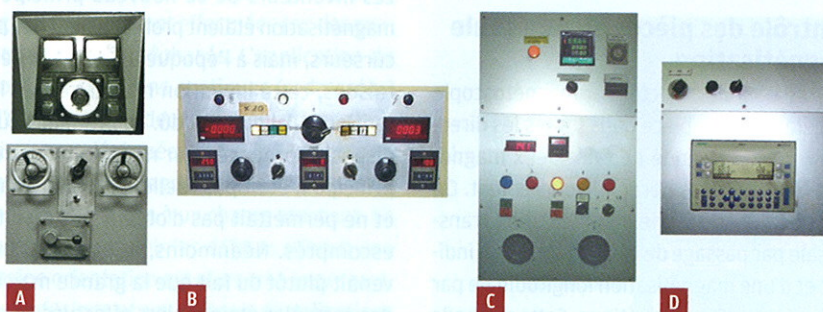


FIGURE 8 : Évolution de l'interface utilisateur des bancs de magnétoscopie.

A - 1960 (commande manuelle à plots, affichage à aiguille), B - 1985 (commande à réglage continu par thyristors, affichage et minuterie numériques), C - 1997 (commande à réglage continu par thyristors avec régulateur, affichage et minuterie numérique), D - 1999 (interface par pupitre opérateur avec création de "recettes", régulation par l'automate).

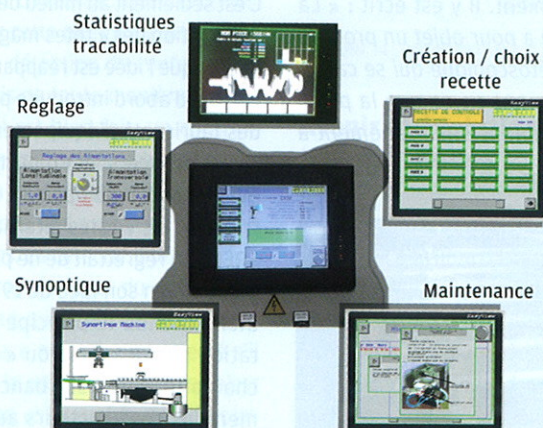


FIGURE 9 : Écran tactile LCD. 2004 (informatisation du poste de pilotage, écran tactile convivial et adaptable, création et mémorisation de « recettes », régulation adaptative).

de contrôle. En effet, il devient possible d'indiquer simplement la valeur du courant ou de la puissance magnétomotrice souhaitée (consigne) et la machine adapte automatiquement la commande via un circuit de mesure et un régulateur pour obtenir en sortie cette consigne. Le courant appliqué est donc indépendant de la charge et des paramètres influant sur cette charge, tels que la température, l'état de surface des électrodes... la régulation permet de s'assurer de la répétitivité de la magnétisation et de déclencher une alarme dans le cas où la sortie serait différente de la consigne.

Les premières régulations réalisées utilisaient des régulateurs autonomes mais rapidement, la réalisation de cette régulation par l'intermédiaire d'un automate permet d'en étendre les fonctionnalités. En effet, il devenait possible de profiter des possibilités de mémorisation des automates pour enregistrer une fois pour toutes les différentes consignes et séquences (magnétisation transversale 1, longitudinale 1, transversale 2...) associées à une référence de pièce. De ce fait, pour contrôler une pièce, l'opérateur n'avait plus qu'à charger la « recette » associée à cette pièce. Cette nouveauté marqua une évolution majeure dans la conduite machine et fut le début d'une demande de plus en plus importante de la part des utilisateurs concernant l'ajout de fonctionnalités permettant l'amélioration de l'ergonomie de pilotage.

L'arrivée des écrans tactiles LCD a permis de répondre à un grand nombre de demandes utilisateur. Ces écrans peuvent être programmés pour réaliser des Interfaces Homme Machine conviviales et adaptables, et sont capables de dialoguer avec de nombreux automates et autres systèmes informatiques. On retrouve bien entendu sur ces interfaces les outils de réglage de la machine, de création et choix de recettes, mais également un synoptique de la machine permettant de visualiser et d'accéder manuellement à chaque fonction ou mouvement. D'autres fonctionnalités sont également disponibles sous forme de modules optionnels. L'aide à la maintenance permet de gagner un temps précieux en apportant une réponse rapide sur les causes d'une panne. Des informations statistiques sur la présence de défauts, mais également sur la localisation des défauts, peuvent être collectées et compilées pour être disponibles en temps réel. Avec l'avènement du tout informatique et des

“ Pour être sûr de détecter par magnétoscopie les défauts d'une pièce dans toutes les directions, il est demandé de faire deux magnétisations orientées perpendiculairement. ”

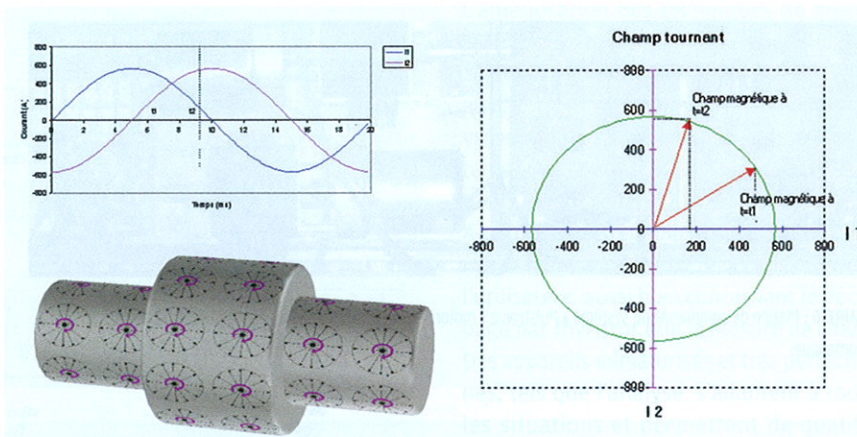


FIGURE 10 : Principe de l'aimantation par champ tournant sur banc.

communications, il devient même possible, par une mise en réseau, de contrôler, interroger, diagnostiquer un banc de magnétoscopie à distance.

Contrôle des pièces en une seule magnétisation

Pour être sûr de détecter par magnétoscopie les défauts d'une pièce dans toutes les directions, il est demandé de faire deux magnétisations orientées perpendiculairement. On parle en général d'une magnétisation transversale par passage de courant direct ou indirect et d'une magnétisation longitudinale par solénoïde ou tête magnétique. Cette méthode de contrôle nécessite donc deux opérations distinctes, ce qui représente une perte de temps importante.

En 1972, la société « Fluxo » filiale de SREM à l'époque, dépose un brevet (numéro de publication 2.094.390) permettant de remédier à cet inconvénient. Il y est écrit : « La présente invention a pour objet un procédé de contrôle magnétoscopique qui se caractérise essentiellement en ce que la pièce à contrôler est soumise simultanément à

l'action d'un champ magnétique longitudinal et à l'action d'un champ magnétique transversal, ces deux champs magnétiques étant périodiques et déphasés ».

Les inventeurs de ce nouveau principe de magnétisation étaient probablement des précurseurs, mais à l'époque, et pour plusieurs raisons, cette invention n'a pas retenu l'attention qu'elle aurait dû. En premier lieu, le dispositif proposé pour mettre en œuvre le principe n'était pas réellement bien adapté et ne permettait pas d'obtenir les résultats escomptés. Néanmoins, le principal frein venait plutôt du fait que la grande majorité des contrôles étaient alors effectués en passage de courant redressé et têtes continues, là où le nouveau principe proposé nécessitait obligatoirement des champs magnétiques alternatifs pour fonctionner. La détection des défauts non débouchants devenait donc impossible.

C'est seulement au milieu des années 90, avec l'apparition des « têtes magnétiques alternatives », que l'idée est réapparue en France. Elle fut tout d'abord introduite par l'intermédiaire des fabricants d'équipements de magnétoscopie étrangers, et en particulier allemands qui depuis longtemps déjà utilisaient et maîtrisaient les « têtes alternatives », puis par SREM qui regrettait de ne pas avoir suffisamment crû en son idée de 1972.

Bien entendu le principe appelé « aimantation simultanée » ou « aimantation par champ tournant sur banc » séduit rapidement les constructeurs automobiles, alors à la recherche d'équipements permettant d'augmenter les cadences. Elle fit cependant apparaître également des interrogations et une grande confusion avec « l'aimantation

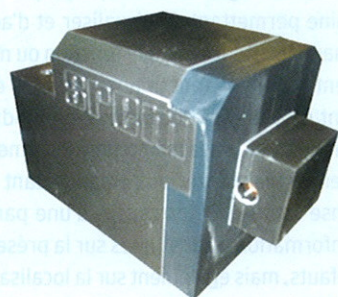


FIGURE 11 : Tête alternative SREM 12000A.tr.s / tête.



FIGURE 12 : Contrôle de crémaillères - aimantation par champ tournant sur banc.

combinée ». Cette dernière consiste à appliquer sur la pièce et simultanément à l'arrosage par le produit révélateur, une aimantation transversale immédiatement suivie par une aimantation longitudinale sans observation intermédiaire. Dans ce cas, le risque pour que l'arrosage lave les défauts mis en évidence par l'aimantation transversale pendant l'aimantation longitudinale est très important et influe très nettement sur la qualité du contrôle. En revanche, « l'aimantation par champ tournant sur banc » consiste à créer dans la pièce, simultanément et de manière déphasée, un champ longitudinal par têtes magnétiques et un champ transversal par passage de courant, permettant d'obtenir un vecteur de magnétisation résultant tournant. L'ensemble de la pièce est ainsi magnétisé en une seule opération. La qualité du contrôle reste excellente avec peu de bruit de fond.

Dans cette technique, il est crucial que les deux magnétisations soient effectuées par des courants alternatifs déphasés. L'application de deux magnétisations continues (redressées) ou l'application de deux magnétisations alternatives non déphasées conduit à la création d'un vecteur de magnétisation résultant de direction fixe et non à un champ tournant. Le risque de ne pas voir les défauts suivant une certaine orientation est alors très important. Ces confusions et un manque d'explications ont longtemps laissé penser que le contrôle d'une pièce en une seule opération conduisait nécessairement à une diminution de la qualité du contrôle, ce qui n'est absolument pas vrai avec la technique du « champ tournant sur banc » appelée encore « aimantation simultanée ». En réalité, la seule limitation apportée par cette technique est qu'elle ne permet pas la détection des défauts non débouchants, mais de toute manière, autant il est vrai que s'il est bien fait, un contrôle magnétoscopique va être capable de mettre en évidence tous les défauts débouchants, autant cela n'est pas vrai en ce qui concerne les défauts internes. La détectabilité est extrêmement liée à la profondeur du défaut et à sa taille, ce qui fait qu'un défaut même très proche de la surface ne sera pas détecté s'il est très petit. De la même manière, ce n'est pas parce que l'on est capable de détecter le défaut situé à 2 mm de profondeur sur un disque témoin de type « ketos ring » que l'on sera en mesure de détecter tous les défauts situés à la même profondeur.

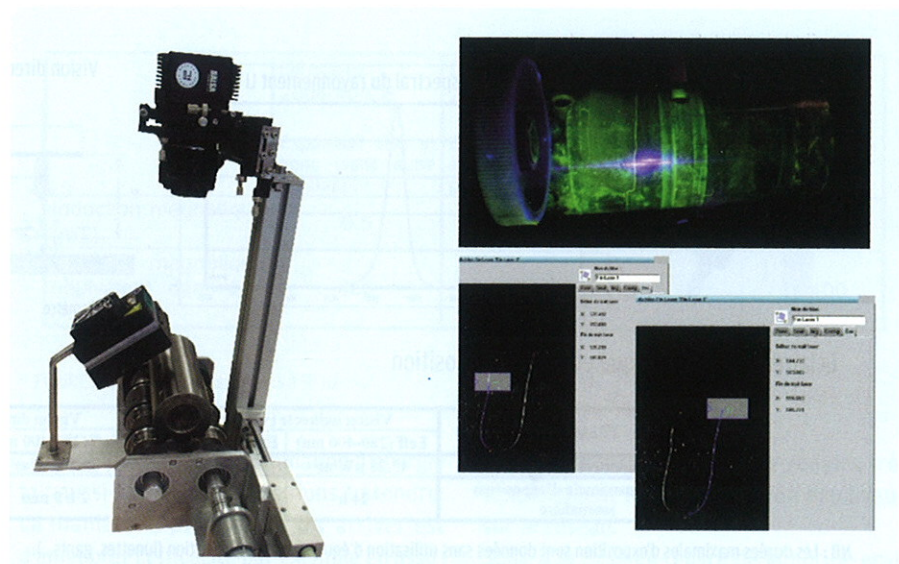


FIGURE 13 : Détection de défauts par système de vision.



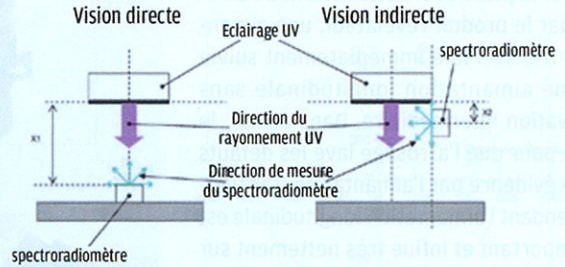
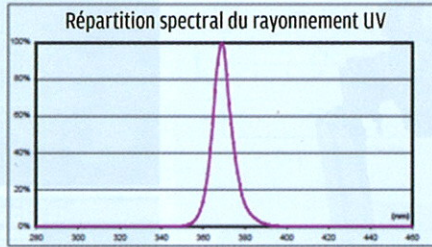
FIGURE 14 : Optimisation de la fréquence pour détecter certains types de défaut.

Avenir et évolutions technologiques ?

Avec les progrès réalisés sur les caméras et les systèmes informatiques, il est maintenant tout à fait possible d'identifier automatiquement un défaut par un système de vision. Cependant, les coûts et les contraintes techniques multiples induites par le contrôle en situation industrielle, de pièces de géométrie complexe, tels que l'orientation des caméras, le discernement d'indications dans les zones bruitées liées aux variations géométriques, vont bien souvent limiter l'application à des pièces de géométrie simple, là

où d'autres méthodes de contrôle non destructif moins globales telles que les courants de Foucault ou les ultrasons vont être concurrentielles

Il est possible d'optimiser la fréquence à des valeurs inférieures ou supérieures à 50Hz pour favoriser la détection de certains types de défaut. Les expériences réalisées dans ce sens ont montré qu'une diminution de la fréquence améliorerait globalement la détection des défauts sous-jacents, mais également que son augmentation pouvait permettre d'améliorer la qualité de détection lors du contrôle d'une pièce de géométrie complexe avec des



Eclairage énergétique et durée d'exposition

PF310LED	Vision indirecte (x1=400 mm)		Vision directe (X2=100 mm)	
	Eeff (280-400 nm)	Euva (315-400 nm)	Eeff (280-400 nm)	Euva (315-400 nm)
Eclairage énergétique	45.28 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	0.48 W/m^2	3.85 mW/m^2	40.52 W/m^2
Durée maximale d'exposition journalière	> 24 h	5 h 47 mn	2 h 9 min	4 min 7 s

NB : Les durées maximales d'exposition sont données sans utilisation d'équipement de protection (lunettes, gants...). Le cas d'une vision directe pour les yeux (Euva) ne rentre pas dans les conditions normales d'utilisation.

FIGURE 15 : Exemple de résultats concernant l'éclairage PF310.

défauts débouchants très fins. La fréquence intermédiaire de 50Hz reste aujourd'hui bien souvent un bon compromis technico-économique mais des contrôles à d'autres fréquences, voir multifréquences, pourraient être envisagés pour permettre d'améliorer un contrôle magnétoscopique dans certains cas particuliers.

En conclusion :

La magnétoscopie conventionnelle est une technique de contrôle non destructif très éprouvée pour laquelle des méthodes ou des techniques de mise en œuvre alternatives permettant de répondre à diverses problématiques particulières existent, et ont déjà fait leurs preuves pour certaines.

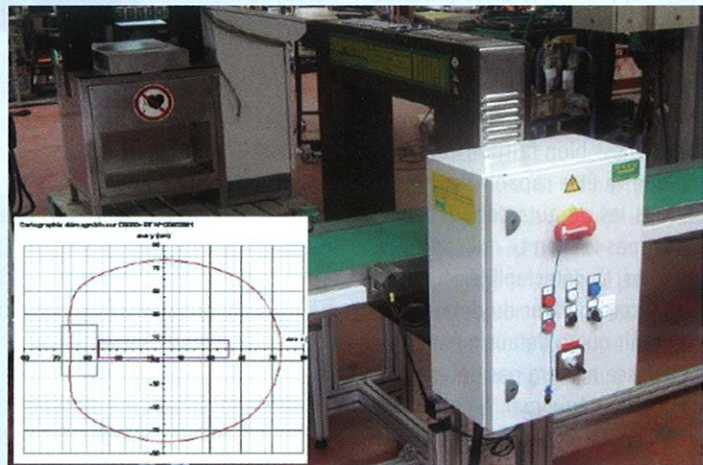


FIGURE 16 : Exemple de résultats concernant un démagnétiseur.

Néanmoins, il n'y a pas à ce jour de recette miracle et universelle pour améliorer ou remplacer la magnétoscopie. Les clés de la réussite sont plutôt à rechercher dans l'adéquation entre les contraintes particulières de chacune des applications et la réponse technique apportée.

Et la question de l'environnement

L'environnement de l'opérateur est au cœur des préoccupations actuelles, en particulier depuis la sortie des directives 2006/25/CE qui concerne l'exposition aux rayonnements UVA et 2013/35/UE qui concerne l'exposition au champ magnétique.

La tendance est à l'écoconception des éclairages dédiés au contrôle non destructif par magnétoscopie. Cela se traduit par le remplacement progressif des lampes de rayonnement UV-A dotées d'ampoules à vapeur de mercure ou de xénon (substance classifiée comme dangereuse pour l'environnement) par des lampes UV-A à LED pour la magnétoscopie fluorescente.

	Directive 2004/40/CE	Directive 2013/35/UE	Directive 2013/35/UE	Directive 2013/35/UE
	Exposition tête et tronc (sans autre précision)	Exposition tête et tronc (cas général)	Exposition tête et tronc (dérogatoire)	Exposition des membres
Induction magnétique (mT)	0,5	1	6	18
Champ magnétique équivalent dans l'air (A/m)	400	800	4 800	14 400

FIGURE 17 : Récapitulatif des valeurs à 50 Hz.

La diminution de la consommation d'énergie fait aussi partie des dispositions à prendre. La manière la plus simple d'y arriver est d'améliorer l'efficacité par exemple en assurant un bon couplage magnétique entre la pièce à contrôler et le système d'aimantation. Dans certains cas, il est aussi possible de mettre en place des dispositifs de compensation d'énergie réactive (batteries de condensateurs, correcteurs actifs de facteur

de puissance) permettant de réduire très sensiblement la consommation électrique sur le réseau.

Suite à la mise en œuvre de la norme environnementale visant notamment à réduire les émissions des composés organiques volatils, de très nombreux progrès ont été réalisés et de nouveaux produits avec un impact plus limité sur l'environnement et sur les utilisateurs vont continuer à voir le jour.