

# L'ÉVOLUTION DU CONTRÔLE MAGNÉTOSCOPIQUE AU REGARD DE LA DIRECTIVE EUROPEENNE 2004/40/CE

## EVOLUTION OF MAGNETIC PARTICLE INSPECTION UNDER THE EUROPEAN DIRECTIVE 2004/40/EC

E. CRESCENZO – IXTREM

### Résumé

L'intégration de la Directive Européenne 2004/40/CE relative à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques obligera de prendre des dispositions pour la mise en œuvre du contrôle magnétoscopique, même si son application au niveau des états membres est suspendue pour l'instant.

Indépendamment des plans de prévention et de mise en œuvre de nouveaux moyens d'aimantation, de mesure du champ magnétique tangentiel, d'application de l'indicateur magnétique voir de vision par caméra, il est fort probable de devoir mettre en place des actions de recherche plus conséquentes pour respecter les seuils fixés par la Directive.

L'objectif de cet exposé est de faire le point sur le sujet, d'identifier les vrais besoins et proposer des solutions techniques appropriées dont certaines peuvent conduire au futur remplacement de la magnétoscopie par d'autres nouvelles techniques de CND (ondes ultrasonores guidées, méthodes thermographiques...).

### Abstract

*The integration of the European Directive 2004/40/EC on the exposure of workers to risks arising from electromagnetic fields require to make arrangements for the implementation of the MPI, even if its enforcement at the members states level is suspended at the moment.*

*Regardless to prevention plans and implementing new ways of magnetization, magnetic field measurement, application of magnetic inks see vision by camera; there is a strong possibility to have set up research activities more consistent with regard to the threshold recommended by the Directive.*

*The objective of this presentation is to provide an update on the topic, identifying the real needs and provide appropriate technical solutions, some of which may lead to the replacement of the Magnetic Particule Inspection by other new NDT techniques (ultrasonic guided waves, thermographic methods ...).*

## 1 - INTEGRER CORRECTEMENT LES EXIGENCES DE LA DIRECTIVE EUROPEENNE 2004/40/CE DU 29 AVRIL 2004 [1]

### Objectif et champ d'application

La Directive porte sur les risques qu'entraînent, pour la santé et la sécurité des travailleurs, les effets reconnus nocifs à court terme sur le corps humain, causés par la circulation de courants induits et par l'absorption d'énergie, ainsi que par les courants de contact résultant ou susceptibles de résulter d'une exposition à des champs électromagnétiques (intègre dans cette définition les champs magnétiques statiques ; électriques ; magnétiques et électromagnétiques de 0 Hz à 300 GHz).

Toutefois, la Directive ne traite pas des effets à long terme, y compris les effets cancérogènes à propos desquels il n'existe pas de données scientifiques probantes à ce jour qui permettent d'établir un lien de causalité. Il est important de mentionner que cette définition donnée dans cette Directive date de 2004 et que depuis, de nombreuses études tentent à prouver le contraire (en particulier une récente étude de 2007, réalisée par le « Bio Initiative Working group »).

## 2 - LES EXIGENCES DE LA DIRECTIVE 2004/40/CE

Elles peuvent se résumer synthétiquement de la façon suivante :

- VLE (Valeur limite d'exposition) : 10 mA/m<sup>2</sup>
- VDA (Valeur déclenchant l'action) selon le tableau ci-après

Champ magnétique variable		Champ magnétique continu
	Valeurs à 50 Hz	163 kA/m
$E = 500/f$ (KHz)	(10 KV/m)	200 mT
$H \text{ A/m} = 20/f$ (KHz)	(400 A/m)	
$B \mu\text{T} = 25/f$ (KHz)	(500 $\mu\text{T}$ )	
$I_{\text{contact}} = 1\text{mA}$		

Il est important de signaler que ces valeurs appliquées au niveau du système nerveux central (cerveau et moelle épinière) sont basées sur des effets avérés nocifs : effets aigus essentiellement instantanés, reconnus scientifiquement et que ses valeurs de seuil dépendent de la fréquence donc des harmoniques. Enfin, la Directive fait visiblement abstraction des effets du champ électromagnétique sur d'autres organes tout aussi sensibles tels que le cœur et les yeux.

## 3 – CONNAISSANCE ACTUELLE DU RISQUE [2]

De notre point de vue, l'ensemble des connaissances scientifiques à ce jour peuvent être considérées comme suffisantes pour s'obliger dès maintenant à prendre toutes les précautions qui s'imposent pour réduire l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques basse fréquence. Plus précisément, nous nous plaçons dans un contexte de prévention des travailleurs dans l'attente d'une normalisation mieux adaptée au regard d'investigations scientifiques plus poussées.

En effet, Les interactions champs magnétiques et électromagnétiques sur la matière biologique sont connues (Force de Lorentz sur les charges ioniques, effet Faraday : courants induits ; force magnétique sur les molécules para et diamagnétiques), mais leurs effets bien que souvent démontrés in vitro ou sur animaux, ne le sont pas démontrés ou systématiquement démontrés sur des volontaires.

Actuellement le SCENIHR (Scientific Committee on Energy and Newly Identified Health Risks) étudie la possibilité d'augmenter cette valeur de seuil de la Directive retardant aujourd'hui son application en prenant en considération l'accroissement prévisible dans les prochaines années de l'exposition aux champs électromagnétiques des travailleurs dans l'industrie et le secteur médical. A contrario, de nombreux scientifiques ou groupes de travail comme le Bio Initiative Working Group demandent d'abaisser cette valeur de seuil. Pour la

profession du CND, si l'on se réfère d'une façon analogue à l'évolution des techniques de contrôle par rayonnements ionisants ; la mise en place des moyens de prévention pour maîtriser ce risque n'a pas entraînée l'impossibilité d'utiliser ces rayonnements comme un moyen de contrôle jugé performant pour vérifier la qualité des matériaux et de leurs assemblages.

Afin d'y voir plus clair sur l'analyse du besoin pour les industriels mettant en œuvre les CND par magnétoscopie et les opérations de soudage ainsi d'ailleurs que d'autres process de production comme les traitements thermiques ; le découpage arc / air, il est nécessaire de constituer un socle d'informations sur le sujet ; ce en quoi nous préconisons de mettre en place une base d'informations accessibles aux industriels pour « démystifier » ce type de risque et mieux intégrer des moyens de prévention appropriés pour ce type de risque .

Aujourd'hui, l'essentiel des informations à connaître peut se résumer de façon suivante :

- On ne sait pas mesurer directement la VLE (10mA/m<sup>2</sup>), il est donc nécessaire d'avoir recours à des calculs modélisation. Cette démarche est plutôt du ressort des scientifiques et chercheurs que des industriels ayant pour souci de rationaliser leur démarche de prévention ; ce en quoi il est préférable de s'arrêter à ne pas dépasser la VDA à condition de pouvoir réaliser correctement les mesures. En effet, la VDA peut être déterminée avec des moyens de mesure existant sur le marché.
- Entre 1 à 10mA/m<sup>2</sup>, il n'y a pas d'effet connu sur la santé à court terme  
Entre 10 à 100mA/m<sup>2</sup>, des phénomènes sont constatés au niveau du système visuel et nerveux.
- Le champ magnétique ne donne pas naissance à une perception sensorielle sauf pour des champs magnétiques statiques de plusieurs Teslas (vertiges, nausées, goût « métallique » dans la bouche) et sauf sur le système visuel à basse fréquence : effet prédominant 20 Hz seuil de sensibilité moyen 5mT ; effets magnétophosphènes (impressions lumineuses équivalentes à une compression sur le globe oculaire).
- Cependant, des effets à long terme sont de plus en plus suspectés avec des niveaux de seuils bien plus faibles que ceux fixés par le Directive Européenne : hypersensibilité électromagnétique, leucémie, cancer, dépression & suicide, effets sur le système immunitaire et sur la fonction de reproduction. En particulier l'effet est prédominant chez les enfants avec un seuil d'alerte de 0,4  $\mu$ T
- Il est important de mentionner que les parties du corps les plus sensibles aux champs magnétiques sont : le système nerveux central : (cerveau et moelle épinière), les yeux et le cœur.
- Enfin, il ne faut pas négliger les autres effets indirects des champs électromagnétiques qui peuvent conduire à des accidents plus ou moins graves :
  - **Interférence avec des équipements électroniques.** En particulier porteur de pacemakers (0,12 mT à 50 Hz) et les porteurs de prothèses passives (pas de valeur fixée à titre de recommandations)
  - **Risque de projection** d'objets ferromagnétiques dans les champs magnétiques statiques (B > 3mT).
  - **Amorçage de dispositifs électro-explosifs.**
  - **Incendies et explosions** résultant de l'inflammation de matériaux par des étincelles causées par des champs induits, des courants de contact, des décharges

électriques (exemple : électricité statique), par échauffement des pièces, générateurs de courant ou câbles utilisés en dehors des limites d'échauffement imposées par les fabricants de matériels (effet Joule ou courants induits)

#### 4 – ANALYSE DES BESOINS DES INDUSTRIELS

Même en se limitant à ne pas dépasser la VDA (pour éviter de se justifier par des modélisations et tests de laboratoire onéreux de ne pas dépasser une intensité de courants induits de 10mA/m<sup>2</sup>), le problème de la mesure des champs magnétiques et électriques en milieu industriel reste complexe car les sources de champ électromagnétique sont rarement isolées, et généralement multifréquence principalement dû à l'utilisation de systèmes gradateurs (pour régler le courant d'aimantation) ou diodes (pour obtenir des formes d'ondes de type sinusoïdale redressé 1 ou 2 alternances).

Pour mettre en place un plan de prévention afin de réduire l'exposition au poste de travail, il convient donc d'opérer de façon structurée en mettant en place un groupe de travail composé de médecin du travail, responsable hygiène sécurité, encadrement, travailleurs concernés par ce risque, consultants spécialisés dans la mesure des champs électromagnétiques et la gestion de ce type de risque.

Par expérience, il est rare que seule une solution technique suffise pour régler le problème de protection des travailleurs. En particulier, l'intérêt est de mixer entre elles les solutions possibles : solutions techniques, organisationnelles, information et formation du personnel concerné ainsi que de l'encadrement pour éviter de mettre en place des moyens de protection par blindage très onéreux et en définitif peu flexibles pour permettre à l'opérateur de réaliser sa tâche dans de bonnes conditions.

#### 5 – EXEMPLES DE STRATEGIE D'ACTION [3]

Les principales étapes d'une stratégie d'action consiste à :

- **Une réflexion collective à laquelle contribueront** Médecin du travail ; Responsable hygiène - sécurité ; Opérateurs ; Travailleurs de proximité et l'Encadrement

Cette réflexion collective se fera sur la base d'une identification préalable des risques au poste de contrôle magnétoscopique, de soudage ou de production. En ce sens, le risque « électromagnétique » doit être intégré dans sa totalité sachant que celui-ci peut être direct, indirect, associé ou influent sur d'autres risques ex : ergonomie du poste de travail, risque d'incendie, d'électrocution... Cette identification et caractérisation du risque lié à l'utilisation des champs magnétiques statiques et/ou électromagnétiques à un poste de travail donné sera mise en œuvre en répertoriant les sources de champs magnétiques en fonction de leur fréquence, leur puissance ainsi que leurs conditions d'utilisation. Il s'agit également de faire des vérifications sur le terrain par des mesures physiques appropriées, mais aussi d'analyser les comportements à risques et l'ergonomie du poste de travail. Cette démarche nécessite d'analyser préalablement l'ensemble des documents disponibles à ce sujet : spécifications de soudage, de contrôle non destructif, fiches techniques du matériel utilisé afin de dresser un plan de mesure et d'investigation au poste de travail.

- **Répertorier les solutions industrielles selon la méthode «TOP»**
  - Technique
  - Organisation
  - Personne

- **Mettre en place des solutions Techniques**
  - Protections de zones matérielles et/ou immatérielles : blindage, balisage, pictogrammes, systèmes de surveillance de zone...
  - Optimiser les moyens d'aimantation et leurs mises en œuvre pour réduire l'exposition.
  
- **Mettre en place des solutions Organisationnelles**
  - Organisation du poste de travail
  - Mise à disposition des guides utilisateurs et fiche d'information.
  
- **Mettre en place des solutions de communication au sein de l'entreprise**
  - Actions de sensibilisation et formation selon l'intervenant (encadrement, opérateur de contrôle, soudeurs).

## **6 – EVOLUTION DU BESOIN**

Les scientifiques sont amenés à s'interroger à la fois sur le niveau des seuils acceptables, mais aussi sur la surexposition aujourd'hui « admise » de certaines parties du corps humain comme les mains ou les membres et enfin, concernant la dangerosité liée aux expositions cumulés de « doses » plus faibles ou vis et versa celle liée à une « surexposition » de courte durée mais d'un niveau « raisonnable » qui pourrait peut-être admise si elle est suivie de périodes suffisamment longues sans exposition. Cette façon de faire, obligerait de développer et valider des outils méthodologiques pour le suivi et la traçabilité sur le long terme des expositions professionnelles

Les solutions actuelles qui consisteraient à éloigner l'opérateur de la source électromagnétique comme par exemple utiliser des moyens de mesure de champ magnétique tangentiel et/ou de pulvérisation à distance(système de rallonge) pourraient devenir caduques ou insuffisants. Dans cette hypothèse, l'utilisation des caméras resterait une solution technique acceptable, sauf pour le contrôle par électroaimant où l'exposition des mains est particulièrement élevée.

Il devient donc impératif de commencer à s'intéresser à d'autres technologies de remplacement si l'on ajoute à ce problème celui de l'émission des gaz à effet de serre (réduire la consommation d'énergie) et limiter les émanations de COV (Composés Organiques Volatils) qui font l'objet d'autres réglementations.

En ce sens, le chapitre ci-après sera réservé à résumer un ensemble de solutions techniques envisageables à plus long terme pour limiter l'exposition des travailleurs.

## **7 – RESUME DES SOLUTIONS TECHNIQUES EXISTANTES OU ENVISAGEABLES A PLUS OU MOINS LONG TERME [4]**

### **7.1 – Améliorer les moyens existants et l'ergonomie du poste de travail**

L'un des moyens technique le plus simple pour limiter l'exposition des opérateurs de contrôle magnétoscopique et soudeurs est de les éloigner des sources de champ magnétique principalement variable et de haute fréquence ou encore limiter l'émissivité des rayonnements électromagnétiques à la source.

Sans être exhaustif, il existe à ce niveau un grand nombre de moyens dont certains peuvent nécessiter l'intervention d'un expert :

- Eviter d'utiliser des électroaimants pour lesquels la prise en main se fait directement sur la bobine magnétisante.
- Utiliser des systèmes de rallonges mécaniques pour réaliser la mesure de champ magnétique tangentiel, pour pulvériser la liqueur magnétique ; de façon à éloigner l'opérateur le plus possible de la pièce à contrôler durant l'aimantation.
- Maîtriser les énergies mis en œuvre durant les opérations d'aimantation et de désaimantation : angle d'ouverture de Thyristors, intégrer le comportement des matériaux magnétiques à partir de leur cycle d'hystérésis (des gains substantiels d'énergie peuvent être obtenus par ce biais), combiner les aimantations (un champ magnétique statique est moins dangereux qu'un champ magnétique variable)...

## 7.2 – Aimantation par champ tournant utilisant un puits d'aimantation [5]

La technique du « puits vertical » d'aimantation 3D par champ magnétique tournant assure une meilleure protection de l'opérateur qu'un banc traditionnel d'aimantation (Figure 1). En effet, la conception de ce moyen d'aimantation évite l'opérateur d'être directement dans le flux magnétique des bobines (Figure 2).



Figure 1 - Technique du puits vertical d'aimantation 3D par champ magnétique tournant

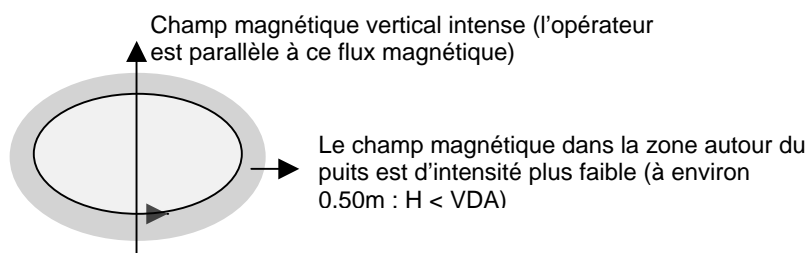


Figure 2 - Répartition schématique du Champ magnétique

### 7.3 – La technique courant de Foucault

Cette technique bien qu'un peu moins sensible que la technique magnétoscopique, permet le contrôle en automatique des pièces présentant au moins un axe de symétrie pour faire tourner la pièce sur elle même, ou encore le contrôle des produits longs au défilement comme les barres, billettes, tubes...

Cette technique n'est pas très adaptée pour le contrôle complet des pièces à géométrie complexe. Toutefois, cette technique peut être utilisée en examen local ; l'utilisation d'un scanner optique d'imagerie sans fil et ne nécessitant pas de mécanique de balayage facilite l'interprétation par un opérateur sans avoir l'obligation d'être un expert en la matière (système Free Scan [6]).

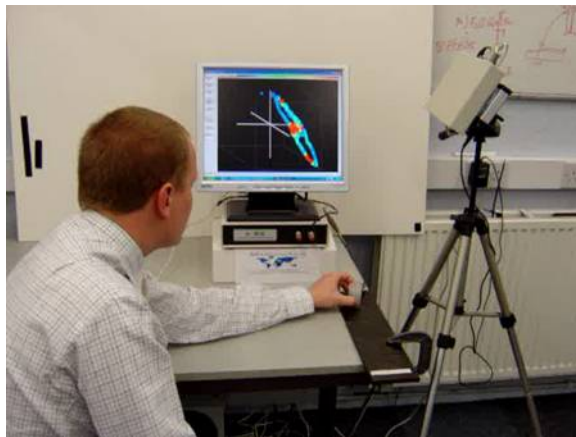


Figure 3 – Mise en œuvre d'un contrôle CF ou US utilisant un scanner optique

### 7.4 – Contrôle magnétoscopique utilisant une ou plusieurs caméras

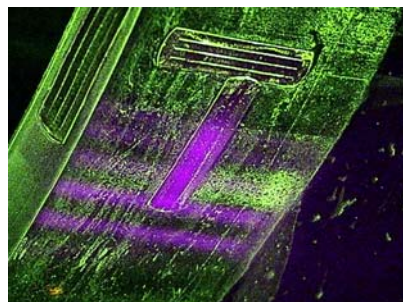

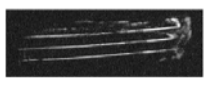

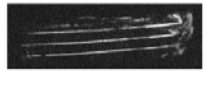

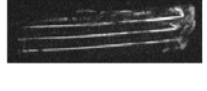

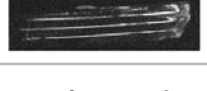


Figure 4 – Exemple d'un système de vision par caméra pour le contrôle des extrémités de tube

<u>Camera couleur sans filtre</u>	<u>Images obtenues après filtration</u>	<u>Niveau d'éclairage ambiant</u>
		~ 1 LUX
		~ 7 LUX
		~ 25 LUX
		~ 50 LUX

*Figure 5 - Des systèmes de caméras performants permettent de faire des observations en présence de lumière blanche  
Exemples d'images obtenues avec un indicateur magnétique fluorescent standard*

L'évolution des technologies de vision par caméra, en termes de performances techniques, taille et capacité à réaliser des traitements d'images en temps réel, offre maintenant des perspectives très intéressantes d'être mises en place pour les contrôles magnétoscopiques. Ainsi, l'opérateur dispose de moyens de réglage du zoom et de l'orientation de la caméra qui lui permettent d'observer confortablement la formation des spectres magnétiques durant l'aimantation des pièces.

Par ailleurs, ces nouveaux systèmes de caméra offre l'avantage à l'opérateur de faire l'interprétation sans être plongé dans l'obscurité.

En effet, l'utilisation d'indicateurs magnétiques fluorescents plus performants et la possibilité de filtrer la réponse de la caméra à la longueur d'onde d'émissivité de ces nouveaux traceurs permet de travailler avec des niveaux de luminosité pouvant atteindre 200 lux.

Cette amélioration permet de simplifier les cabines d'inspection, de réduire la fatigue oculaire des opérateurs

\*

## **7.5 – Les techniques combinées**

Parmi les méthodes de contrôle non destructif émergentes, on trouve de plus en plus des techniques dites *combinées*, pour lesquelles les ultrasons jouent le rôle de perturbation en se propageant dans le matériau à tester ; la détection s'effectue selon un autre procédé physique de mesure ou de visualisation de la perturbation des ondes ultrasonores au droit des défauts. A ce titre, on peut citer la shéarographie ou thermographie comme moyen de détection des perturbations des ondes ultrasonores par les défauts superficiels.

Dans ce cas, le dispositif d'imagerie shéarographique met en évidence l'interaction de l'onde avec un éventuel défaut. Il s'agit de réaliser par un procédé holographique une cartographie quasiment en temps réel des déplacements normaux en surface de la pièce. La visualisation du champ de déplacement dû à la propagation des ultrasons est rendue possible par synchronisation de l'excitation ultrasonore et du laser incident. Dans le cas où le front d'onde ultrasonore rencontre un défaut localisé, ce dernier se comporte de façon équivalente à une source secondaire directement visualisé par modification locale des déformations de surface qui sont rendues visibles par shéarographie.

La thermographie stimulée par ultrasons est une autre technique de contrôle plein champ développée récemment. Comme pour la thermographie classique, il s'agit d'une méthode de détection et de représentation bidimensionnelle de la température d'une zone relativement



étendue de la structure. La thermographie classique est basée sur le fait que la présence d'une hétérogénéité entraîne une variation locale de la température lors du changement thermique lié à la présence d'une modification de la conductivité thermique du matériau.

Dans le cas de la thermographie stimulée par ultrasons, une onde ultrasonore d'amplitude modulée est introduite dans la structure à tester. L'interaction de cette perturbation avec le défaut provoque la génération d'une onde thermique du fait de la conversion de l'énergie incidente en énergie thermique. Cette modification est rendue visible par thermographie (analyse des images en amplitude ou en phase). La détection est possible en raison de la modulation d'amplitude de l'onde ultrasonore.

Dans un autre domaine, l'analyse thermique par impact laser s'avère être également un procédé de contrôle intéressant.

## 7.6 – L'utilisation des ondes guidées [7]

Par ondes guidées, il faut entendre la production d'un ensemble d'ondes se propageant sur une grande distance et permettant de suivre le profil de surface de forme complexe, ondes de Lamb, SH (ondes polarisées horizontalement), ondes de surface (Rayleigh).

La génération et la propagation de ces types d'ondes n'est pas toujours très évidente car elles dépendent de l'épaisseur du matériau et/ou de la fréquence d'excitation. Les récents progrès de la modélisation des transducteurs et la propagation des ondes ultrasonores dans les matériaux permettent de mieux maîtriser les phénomènes physiques mis en jeu et de réaliser des systèmes d'inspection adaptés.

La génération d'ultrasons par laser, la détection EMAT constitue un enjeu pour le développement de ces nouvelles technologies, comme d'ailleurs la réception sans contact par des moyens optiques appropriés (interférométrie laser).



*Figure 6 - Système compact de détection de défauts type fissure de fatigue par ondes guidées à contact sec (zone de test jusqu'à 30m)*



*Figure 7 - Techniques ultrasons par ondes de surface (laser -transducteur par couplage sec)*



*Figure 8 - Système de contrôle ultrasons laser / EMAT  
(possibilité d'utiliser un PC portable)*

## **8 – CONCLUSIONS**

Le risque potentiel lié à l'exposition des champs électromagnétiques lors des opérations de contrôle magnétoscopique et/ou process de fabrication (ex : soudage, traitement thermique) est reconnu, mais mal maîtrisé que ce soit au niveau de la mesure des grandeurs physiques associés (champ magnétique, champ électrique, courants électriques induits dans les tissus biologiques) que des effets à long terme sur la santé.

Il est par conséquent nécessaire dès maintenant de se protéger contre l'exposition aux champs électromagnétiques à des niveaux les plus bas que possibles.

En se référant à la Directive Européenne 2004/40/CE, les seuils de limite d'exposition et de déclenchement d'action en fonction de la fréquence peuvent sembler faibles, mais d'autres études scientifiques tentent à démontrer qu'il faudrait abaisser notablement ces valeurs de seuils.

La mise en place de moyens de protection adéquats n'est pas évidente pour des opérateurs de contrôle magnétoscopique et les soudeurs qui sont amenés à côtoyer de très près les sources magnétisantes (ex : il est demandé d'observer la formation des spectres magnétiques durant l'opération de contrôle magnétoscopique).

Les travaux menés en ce sens montrent qu'il est indispensable de mettre en œuvre un ensemble de stratégies de prévention pour permettre le déroulement de ces opérations conciliant à la fois la qualité du contrôle magnétoscopique et la santé des travailleurs.

D'autres impératifs que celui de la prévention du risque électromagnétique (réduction de l'utilisation des composés organiques volatils ; économie d'énergie) feront qu'il sera vraisemblablement de plus en plus difficile de réaliser ce type de contrôle comme le ressasse d'ailleurs.

Par conséquent, il devient urgent de s'intéresser à des techniques de substitution et/ou accepter dans un premier temps d'utiliser des moyens de vision par caméra pour éloigner suffisamment l'opérateur des zones à risques.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[1] Directive Européenne 2004/40/CE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

[2] E. CRESCENZO, La problématique du risque liée à l'exposition aux champs électromagnétiques lors des opérations de contrôles magnétoscopiques, – Magazine « Contrôle Mesure & Essais ».

[3] E. CRESCENZO, Techniques et moyens de prévention et protection contre les risques magnétiques et électromagnétiques, Présentation COFREND du 13 novembre 2007.

[4] E. CRESCENZO, Point et impact sur les CND de la législation sur les ondes électromagnétiques, Présentation COSAC du 20 septembre 2007.

[5] E. CRESCENZO, La magnétisation sans contact par champ tournant

[6] Fiche technique « Free Scan » – Site web [www.ixtrem.fr](http://www.ixtrem.fr) rubrique « produits »

[7] E. CRESCENZO, D. CHAUVEAU, D. DULAY, Utilisation des ondes guidées exploitant des transducteurs à effet magnétostrictif pour la détection de corrosion – MATERIAUX 2006