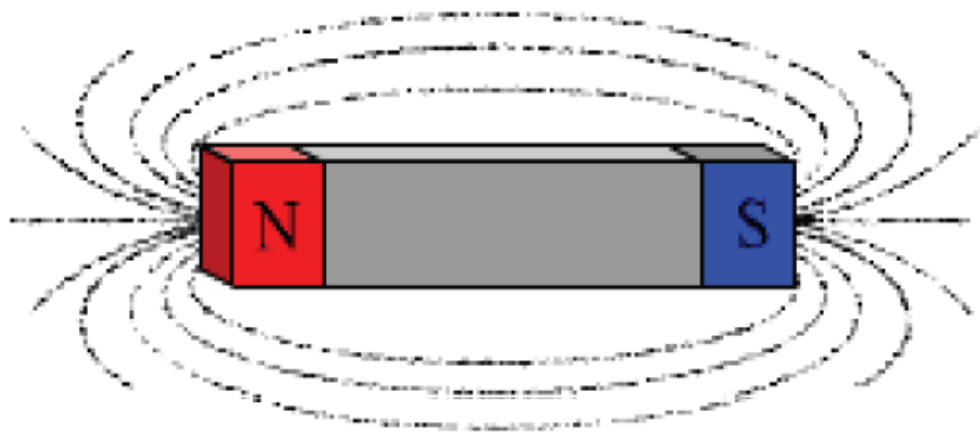


LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR MAGNETOSCOPIE

Pr. B. Boubeker

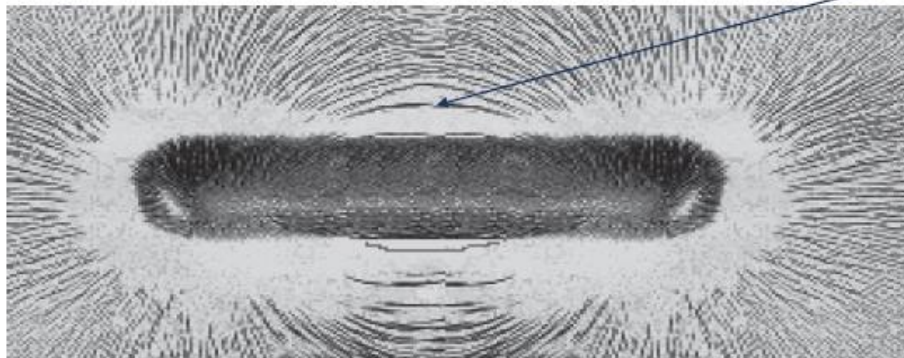
Principe de la magnétoscopie

Champs magnétique



Un aimant est constitué de deux pôles Nord et sud

Lignes de champs



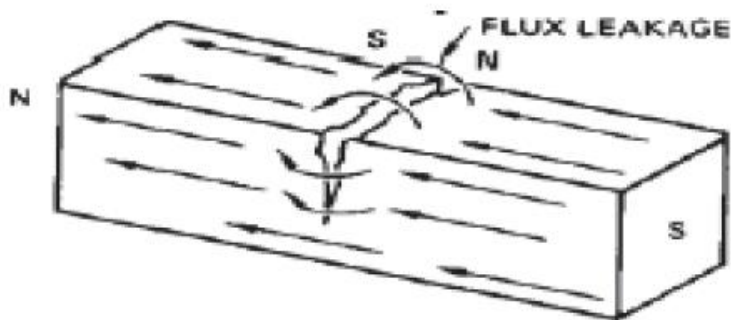
Ligne de champ

Mise en évidence des lignes de champ magnétique par la poudre ferromagnétique

Caractéristiques des lignes de champ magnétique

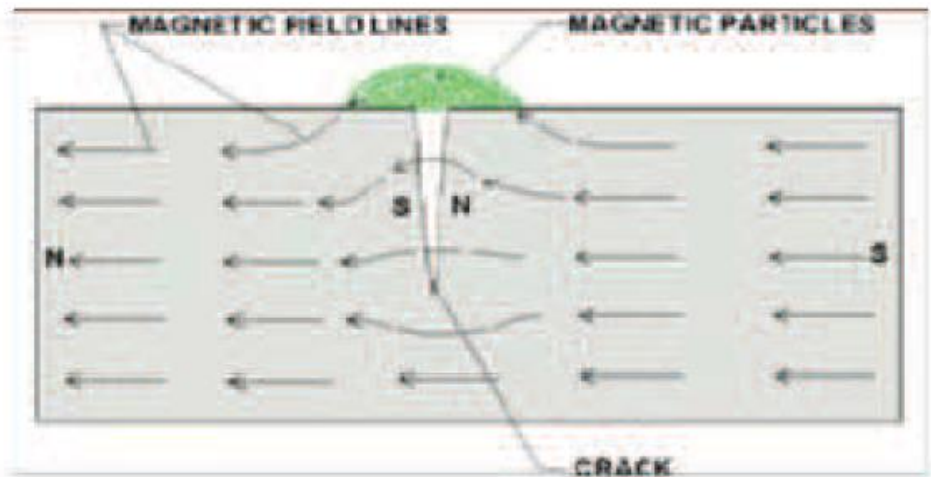
- Elles sont sous forme de boucles fermées.
- Elles ne se touchent pas.
- Elles ne sont pas intermittentes, elles sont continues

Fuite de champs



Les lignes de champs qui rencontre un défaut essaient de le contourner et fuient à l'extérieur si le défaut est surfacique ou sous jacent

Particules magnétiques



Le champ qui fuie attire la poudre ferromagnétique

Récapitulatif

- Le contrôle par magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif basé sur la fuite du champs magnétique.
- Elle détecte les défauts de surface et sous-jacent (juste au dessous de la surface).
- Elle s'applique uniquement aux matériaux magnétiques.

Etapes du contrôle par magnétoscopie

1. Préparation de la surface (nettoyage)
2. Application d'une couche mince du contraste.
3. Magnétisation de la partie à contrôler.
4. Application des particules magnétiques.
5. Examen et interprétation

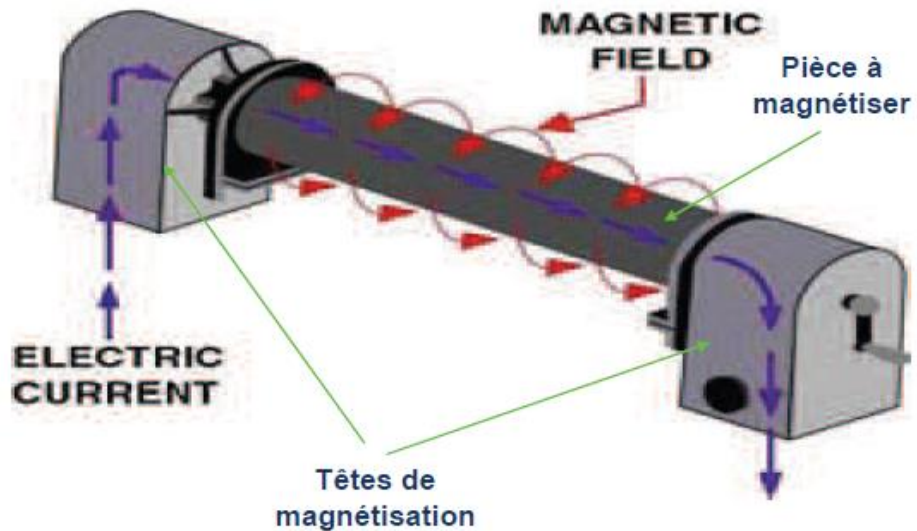
Préparation de la surface

- La préparation de la surface peut être faite par :
 - Brossage.
 - Meulage.
 - Nettoyage par solvants

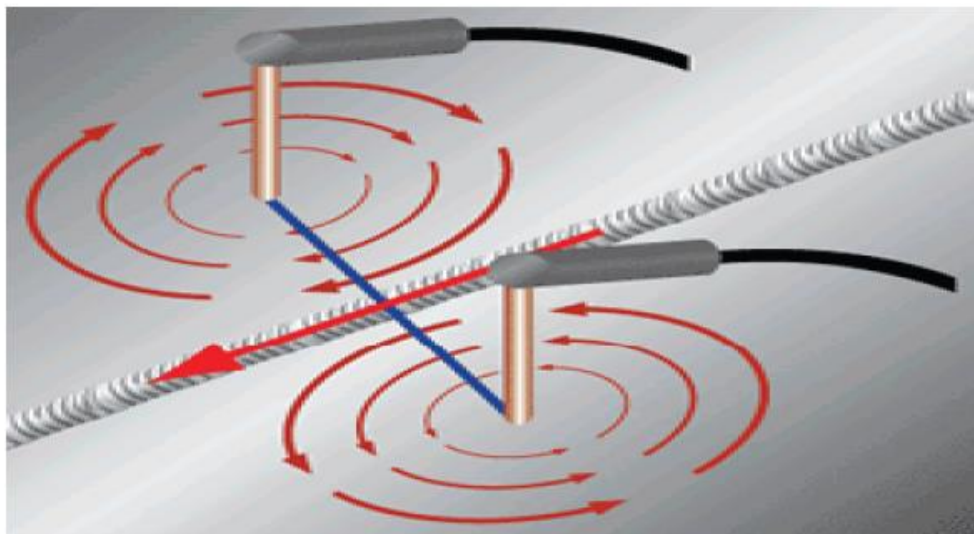
Particules magnétiques

- Les particules magnétiques peuvent être :
 - Poudre sèche
 - Particules ferromagnétiques suspendu dans l'eau ou pétrole.
 - Fluorescents ou visible.

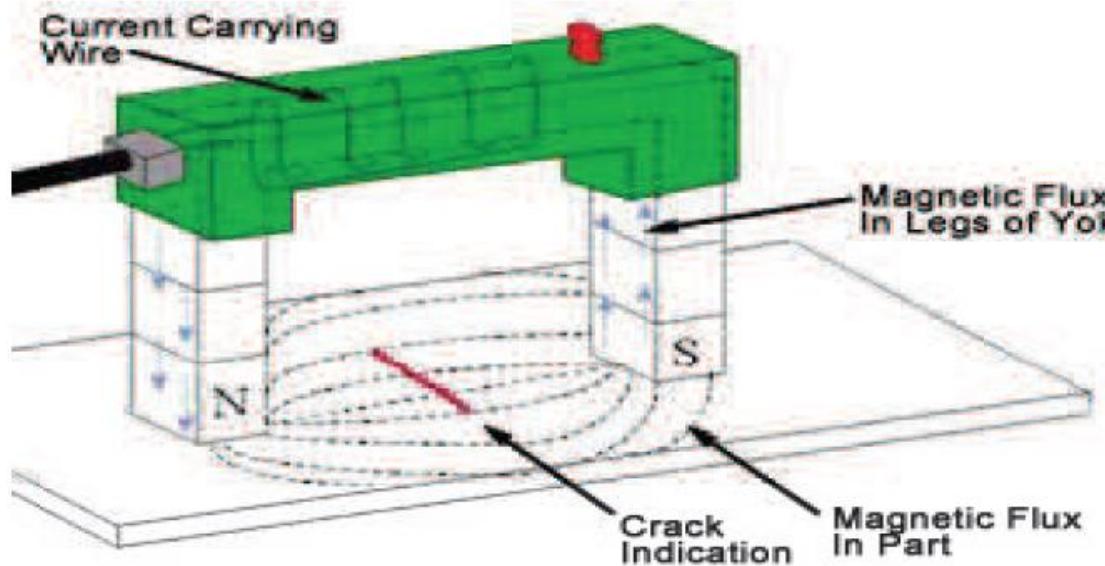
Méthode de la magnétisation du métal : Tension aux extrémités de la pièce : Contact direct



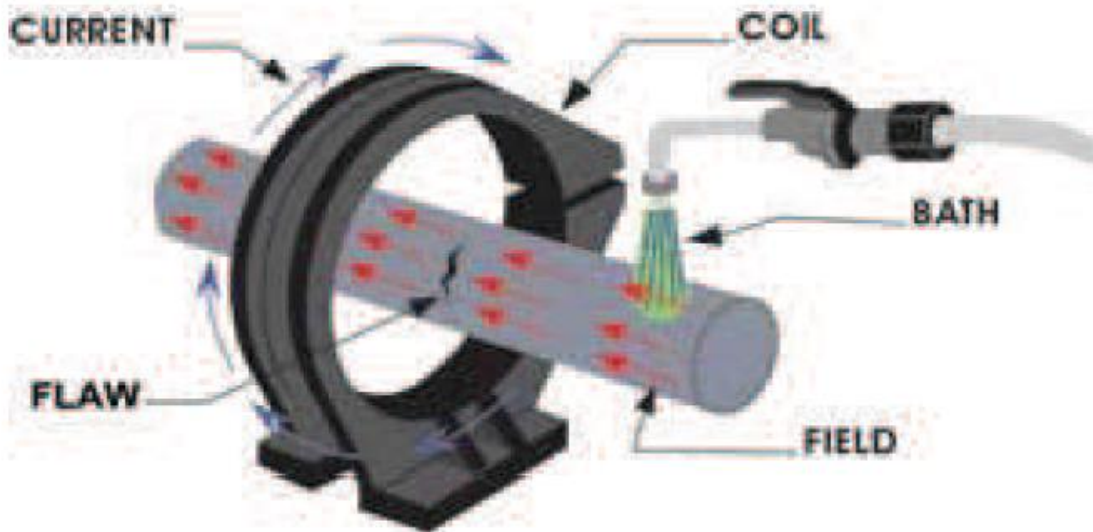
Magnétisation par touche (cosses)



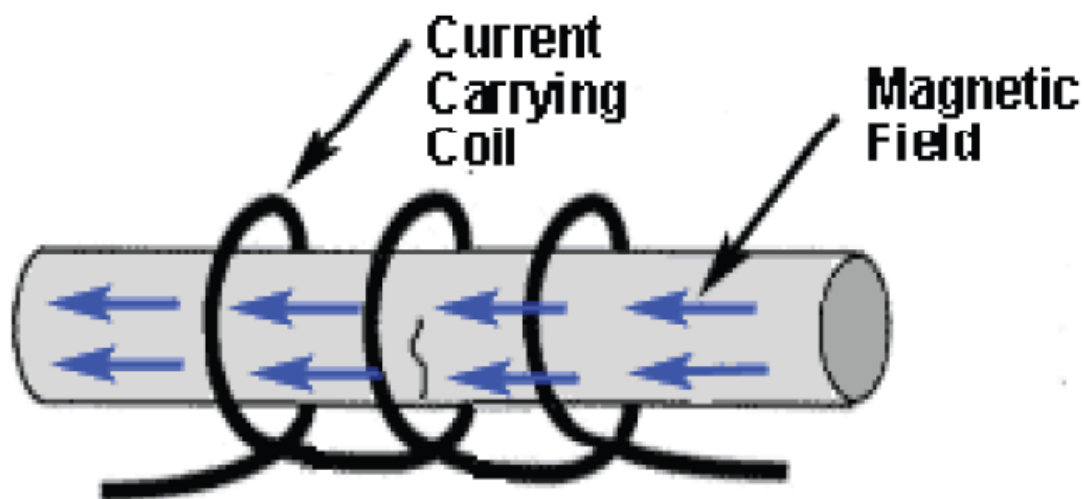
Magnétisation par électro-aimant



Magnétisation par bobine



Magnétisation par enroulement

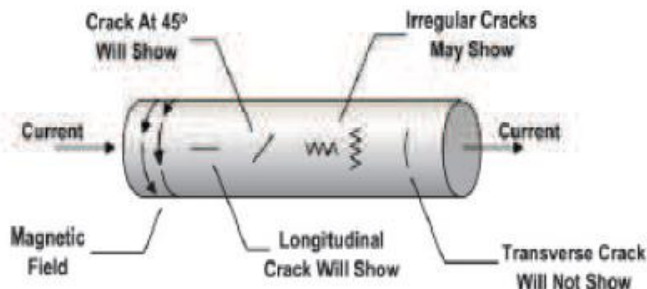


Magnétisation par câble central



Orientation des défauts détectés

- La magnétoscopie ne détecte que les défauts orientés perpendiculairement aux lignes de champs.



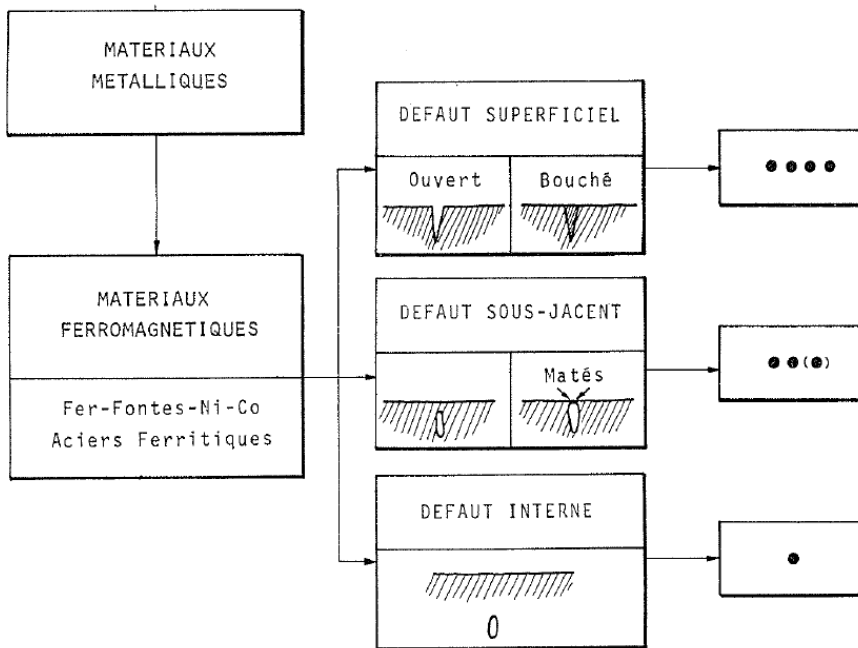
Techniques de la magnétoscopie

- Visible : Examen à la lumière du jour ou lumière naturelle.
- Fluorescent : Examen sous la lumière UV.
Il est plus sensible que le visible

Application de la magnétoscopie

- La magnétoscopie est la méthode la plus utilisée pour la recherche des fissures de fatigue. Ces fissures s'amorce souvent de la surface et se propagent vers l'intérieur.
- Elle est utilisée pour le contrôle des soudures dans les appareils à pression, le contrôle des ailettes des rotors des turbines...

Les limites de la technique



- Détection impossible
- Détection satisfaisante
- Détection aléatoire
- Détection très satisfaisante





Equipements



Contact direct par cosses



Portable Prod Unit

Bobine



Enroulement du câble



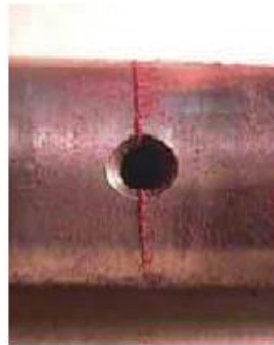
Application de la poudre ferromagnétique sèche



Méthode liqueur magnétique



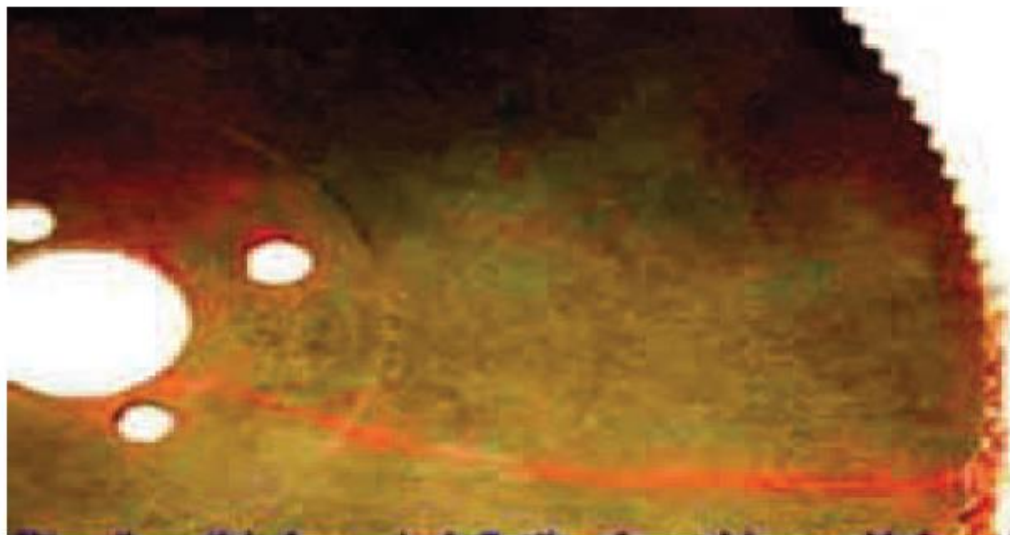
Exemple d'indication Poudre sèche



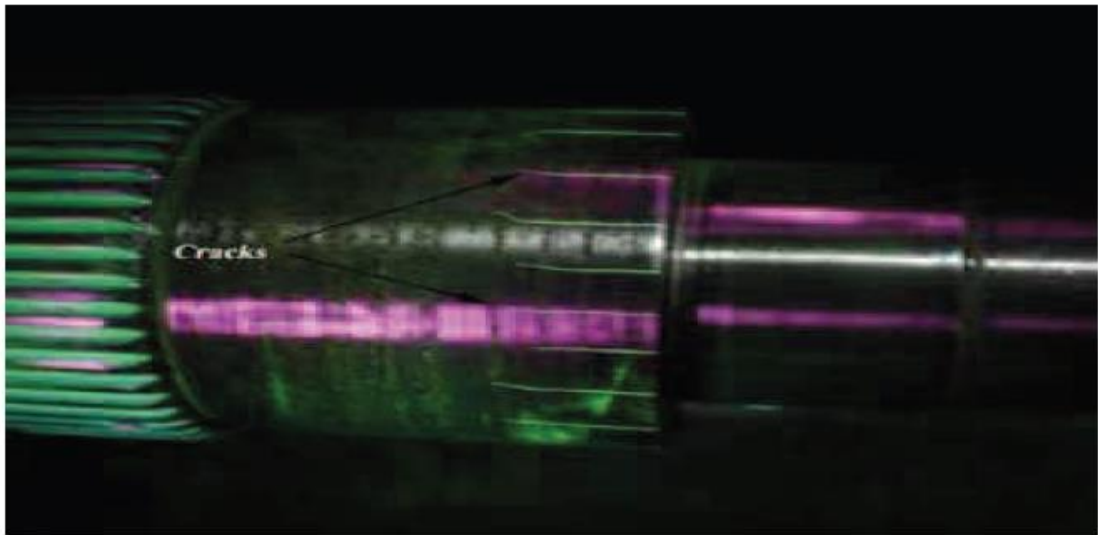
Fissure dans une soudure



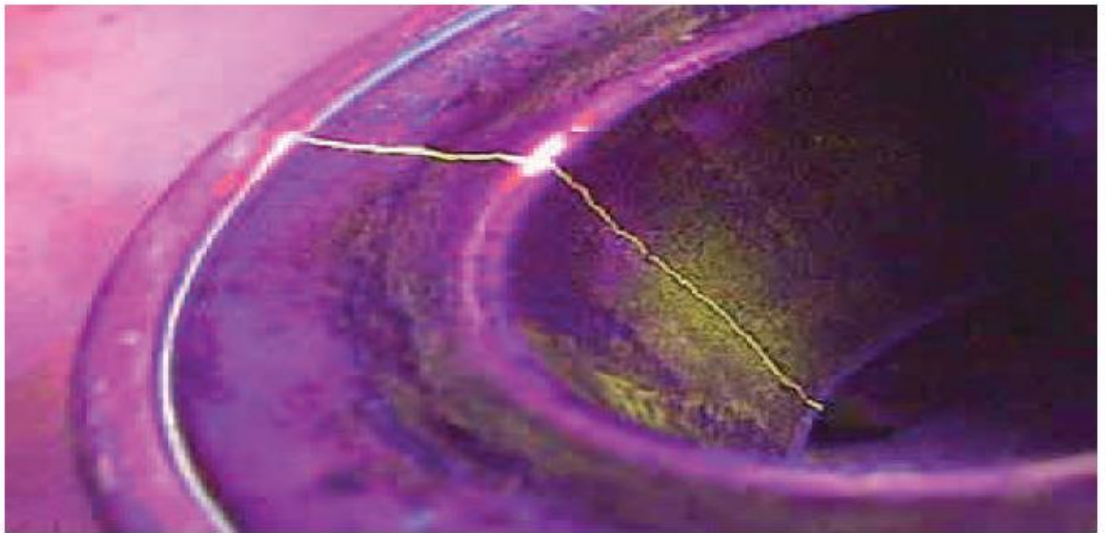
Indication de fissuration sur un disque de scie.



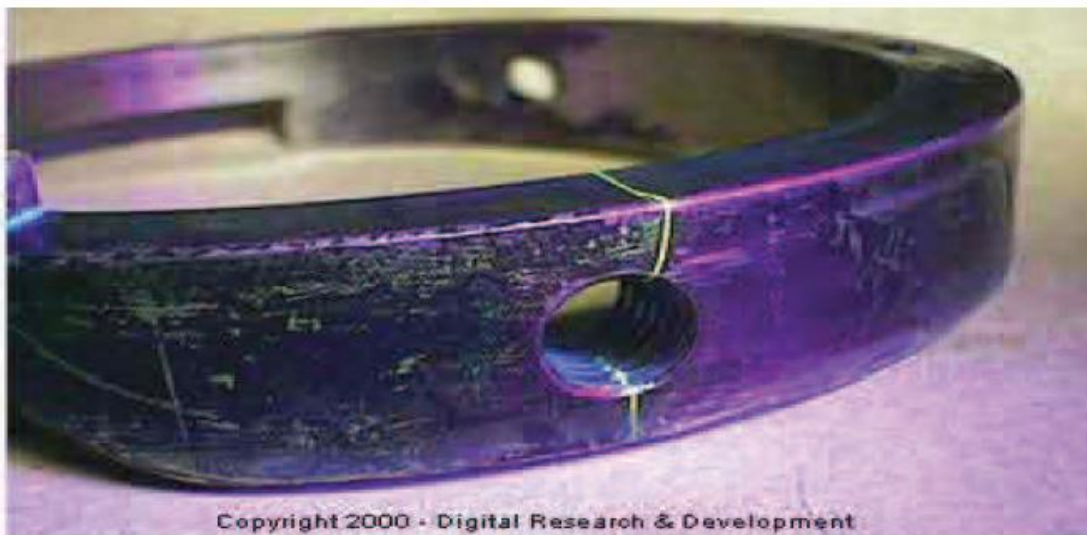
Indication fluorescent



Indication fluorescent



Indication fluorescent



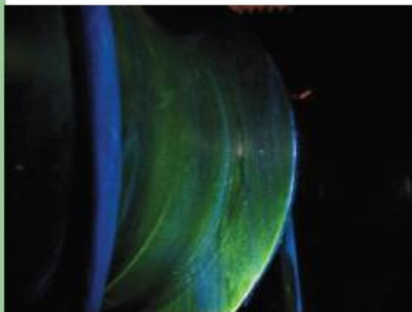
Copyright 2000 - Digital Research & Development

Application de MT pour les rotors



Magnétisation d'un rotor

Application de MT pour les rotors



RAPPELS SUR LE MAGNETISME

Champ magnétique d'excitation et champ magnétique d'induction

L'action d'un champ magnétique produit par un aimant naturel, ou artificiel, sur un matériau ferromagnétique (exemple limaille de fer), s'explique physiquement comme suit :

la limaille de fer (ou pièce de fer) soumise à une excitation (champ d'excitation magnétique appelé H) acquiert à l'intérieur d'elle même un champ d'induction magnétique appelé B responsable des forces attractives ou répulsives.

H s'exprime en A/m et B s'exprime en Tesla.

En l'absence de matière (dans le vide), l'induction magnétique existe et les deux champs sont directement liés par un coefficient μ_0

μ_0 constante universelle appelée perméabilité magnétique du vide, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ (S.I).

Ainsi on écrit : $B = \mu_0 H$.

Cependant, avec la présence de certaines matières, cette relation est modifiée. En effet, on prend en compte la perméabilité magnétique relative de matériau μ_r , et la relation devient :

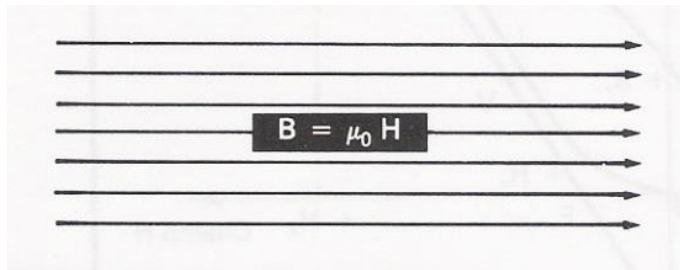
$$B = \mu_r \mu_0 H.$$

Rappel sur le Comportement magnétique des matériaux

Le comportement magnétique des matériaux dépend de leur susceptibilité magnétique χ . Il existe trois grandes familles matériaux suivant la valeur de cette susceptibilité.

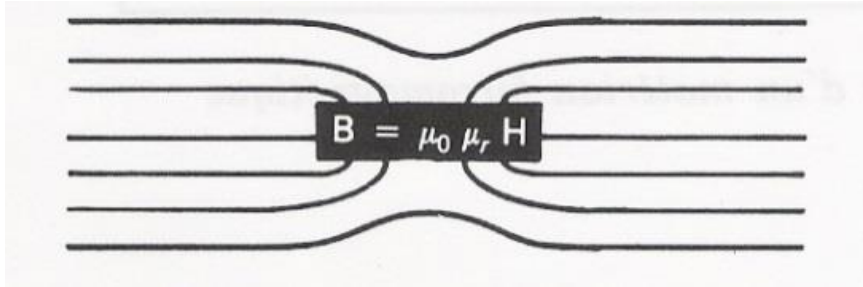
- Les matériaux diamagnétiques : leur susceptibilité magnétique est très faible et négative, ils sont considérés comme non - magnétiques ou amagnétiques (exemple : $\chi = -0,94 \cdot 10^{-5}$ pour le cuivre).
- Les matériaux paramagnétiques : leur susceptibilité magnétique est très faible et positive, on admet également qu'ils sont amagnétiques (exemple : $\chi = 2,1 \cdot 10^{-5}$ pour l'aluminium)
- Les matériaux ferromagnétiques : leur susceptibilité magnétique est très élevée et positive, ils sont magnétiques (exemple : $\chi = 350$ pour l'acier à 1% de carbone).

En conséquence, un barreau d'aluminium plongé dans un champ magnétique d'excitation, n'influence pas les lignes de champ, il est insensible au champ magnétique d'excitation présent dans le milieu.



Barreau d'aluminium dans un champ magnétique d'excitation

Par contre un barreau de fer plongé dans un champ magnétique d'excitation, provoque la déviation de champ magnétique.



Barreau de fer dans un champ magnétique d'excitation

En fait, une substance ferromagnétique plongée dans un champ, acquiert une aimantation qui a pour effet de modifier la valeur du champ, aussi bien à l'intérieur de la substance qu'à son extérieur.

A cette substance on attribue une perméabilité magnétique relative μ_r du matériau par rapport à celle du vide μ_0 .

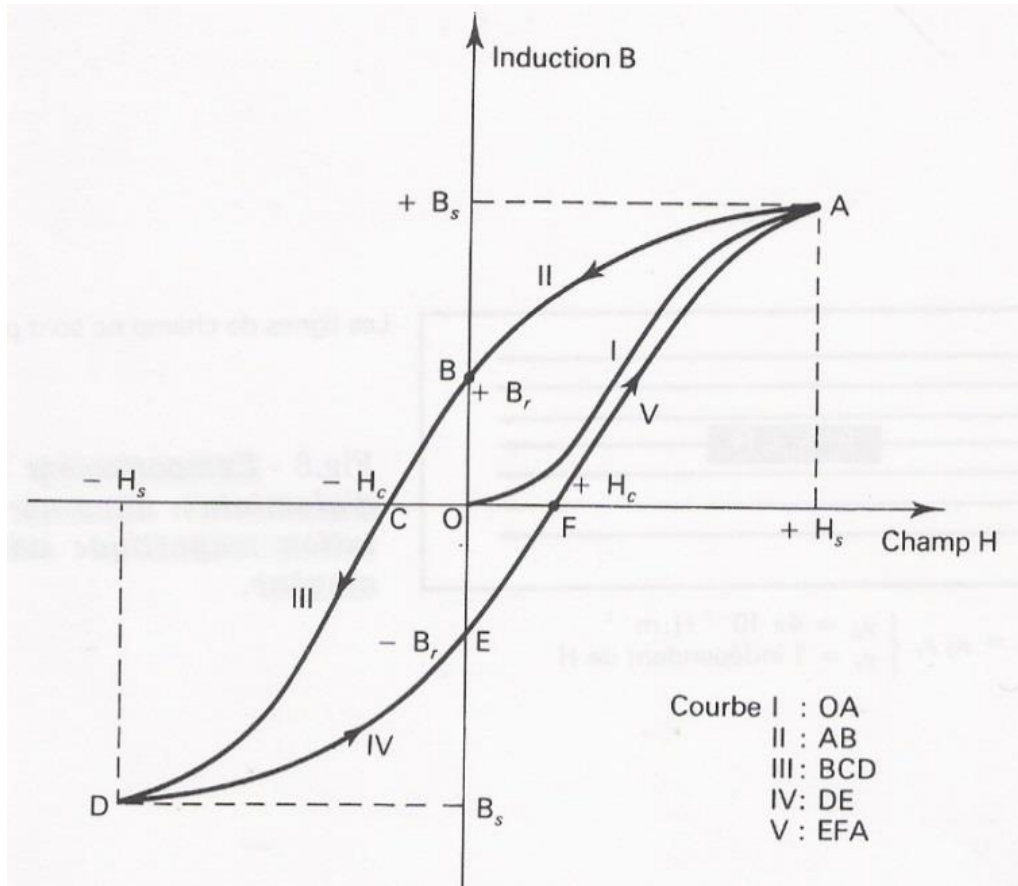
On dit que le matériau acquiert une induction B sous l'action du champ d'excitation H avec $B = \mu_0 \mu_r H$ (μ_r est sans dimension)

Cycle d'Hystérésis

L'induction B , dans un matériau ferromagnétique soumis à un champ d'excitation magnétique extérieur H pour la première fois, varie suivant un cycle caractéristique désigné par le nom de cycle d'Hystérésis.

On fait à partir de ($H = 0$, $B = 0$) croître positivement la valeur de champ H , on décrit alors une courbe jusqu'au point A (H_s , B_s). Une augmentation de H au-delà de H_s , n'apporte aucune augmentation significative de B . On dit que le matériau est saturé et la valeur B_s atteinte est l'induction de saturation.

Après une saturation (point A), on annule le champ d'excitation, on remarque que B ne s'annule pas ce qui se traduit par l'existence au sein de matériau d'une induction rémanente B_r .



Présentation de l'allure de cycle d'Hystérésis

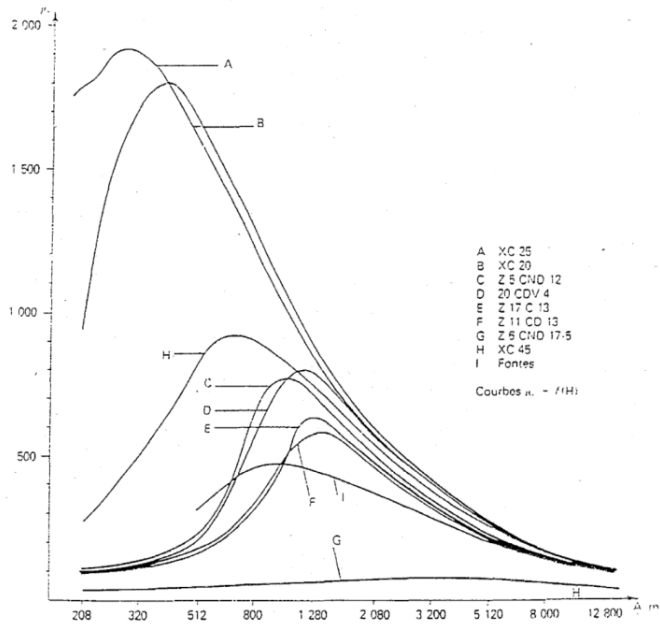
Il est à noter que le cycle d'Hystérésis peut varier dans des proportions importantes en fonction de la nature des matériaux ferromagnétiques.

On effet, la capacité d'un matériau à posséder de grandes propriétés magnétiques, peut être observée sur le cycle d'Hystérésis dans la mesure où la valeur de l'induction rémanente B_r est élevée.

A noter également que la perméabilité magnétique relative des aciers varie en fonction de leur teneur en carbone et en éléments d'addition, ainsi μ_r augmente quand %C diminue.

Ceci est cohérent avec le diagramme d'équilibre Fe-C, où l'on observe la prépondérance de la ferrite magnétique à bas taux de carbone.

PERMÉABILITÉ RELATIVE POUR DIVERS NUANCES D'ACIER



Mesure du courant utilisé pour l'aimantation

La sensibilité de la méthode dépend essentiellement de la force d'attraction des pôles à l'aplomb de défaut, c'est à dire de la valeur du champ magnétique d'excitation magnétique.

Théoriquement, les conditions optimales correspondent à une valeur d'excitation magnétique telle que la perméabilité magnétique relative μ_r du matériau à contrôler soit maximale.

Le caractère ferromagnétique du matériau compatible avec l'exécution du contrôle est défini par la norme NF A 09-590, comme présentant **une induction B d'au moins 1 tesla lorsqu'il est soumis à un champ magnétique d'excitation H, de 2400 A/m.**

Il faut cependant noter que les conditions d'aimantation pratiquées, sont généralement reliées aux types d'industrie et sont indiquées dans différentes normes et codes. Le tableau ci-après donne une idée des valeurs de champs magnétiques d'excitation préconisés dans différents domaines.

Origine Pays	Document organisme	Recommandations	Valeur du champ préconisée en A.m ⁻¹
France	AFNOR A 09-570	Intensité du champ magnétique supérieure à celle conduisant au maximum de perméabilité	$2\ 000 < H_T < 4\ 000$
	IRSID	Recommandations de la norme AFNOR adaptées aux teneurs en carbone G.I. Aciers non alliés : $300 \text{ à } 600 \text{ A.m}^{-1}$ G II. Aciers à 13 % Cr : $800 \text{ à } 1\ 400 \text{ A.m}^{-1}$ G III. Aciers à 17 % Cr et 4 % Ni : $\sim 3\ 200 \text{ A.m}^{-1}$	$300 < H_T < 600$ $800 < H_T < 1\ 400$ $H_T \sim 3\ 200$
	AIR 0819 (SNECMA)	Fils, barres billettes aciers en réception $6\ 400 \text{ à } 12\ 800 \text{ A.m}^{-1}$	$6\ 400 < H_T < 12\ 800$
	Bureau de Normalisation de la fonderie	S'applique aux bobines circulaires : 40 à 80 Ampère-tours par centimètre de long	$4\ 000 < H_T < 8\ 000$
Allemagne RFA	MULLER	Valeurs pratiques du champ : $4\ 800 \text{ à } 9\ 600 \text{ A.m}^{-1}$ Aciers doux 960 A.m^{-1}	$960 < H_T < 9\ 600$
	RESW (Völklingen)	Aciers en barres gros défauts $1\ 600 \text{ A.m}^{-1}$ petits défauts $4\ 000 \text{ A.m}^{-1}$ lignes d'inclusions $8\ 000 \text{ A.m}^{-1}$	$1\ 600 < H_T < 8\ 000$
		Pièces de forges usinées fissures $800 \text{ à } 1\ 600 \text{ A.m}^{-1}$ petits défauts $1\ 600 \text{ à } 4\ 000 \text{ A.m}^{-1}$	$800 < H_T < 4\ 000$
Allemagne RDA	HEPTER et STROPE	Environ $4\ 800 \text{ A.m}^{-1}$	$H_T \sim 4\ 800$
Etats-Unis	ASTM E138	Grandes pièces 100 à 400 A par pouce de diamètre soit : $1\ 250 < H_T < 5\ 000 \text{ A.m}^{-1}$ Petites pièces 400 à 700 A par pouce de diamètre soit : $5\ 000 < H_T < 8\ 800 \text{ A.m}^{-1}$	$1\ 250 < H_T < 8\ 800$
		BETZ MAGNAFLUX	En général : $1\ 600 \text{ A.m}^{-1}$ Cas particuliers : $4\ 000 \text{ A.m}^{-1}$
	Aéronautique	Recommandations particulières	$H_T \sim 12\ 000$
Grande-Bretagne		Recommandations particulières	$800 < H_T < 960$

Méthode d'aimantation des pièces

Rappels

- Champ magnétique d'excitation produit par un fil infini : $H = \mu I / 2\pi a$
- Champ magnétique d'excitation produit par un solénoïde : $H = \mu NI / L$
- Champ magnétique d'excitation produit par une bobine : $H = \mu NI / D$

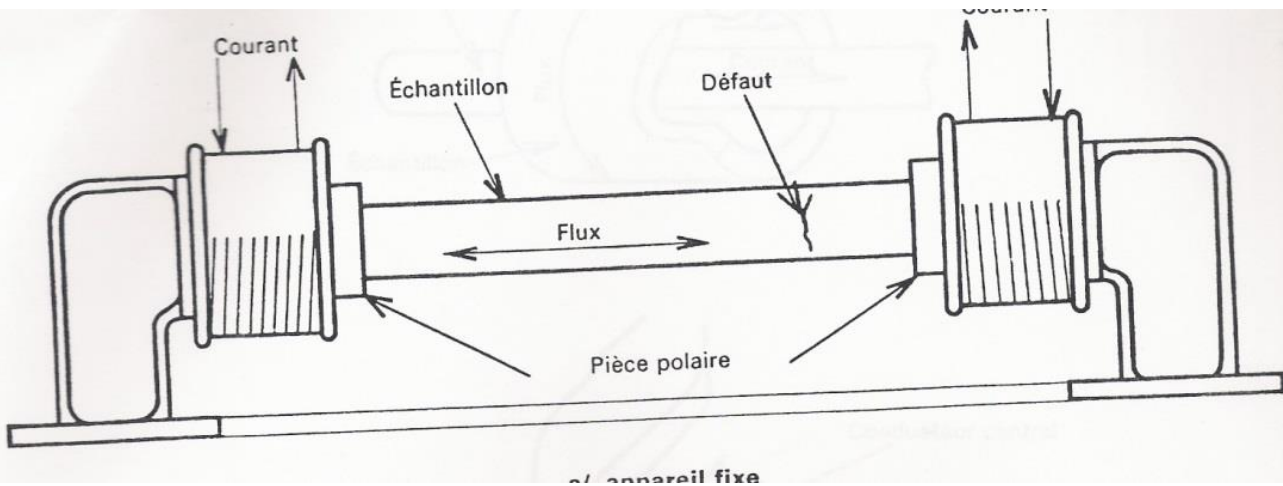
Méthode directe (Aimantation longitudinale)

On utilise généralement dans ce cas, soit des électro-aimants, des solénoïdes, des bobines, ou encore des conducteurs auxiliaires.

La pièce est « traversée » par un champ magnétique.

La méthode directe, ou aimantation longitudinale, peut être appliquée avec un appareil fixe (exemple un banc d'aimantation industriel), ou encore avec un appareil mobile (électro - aimant mobile).

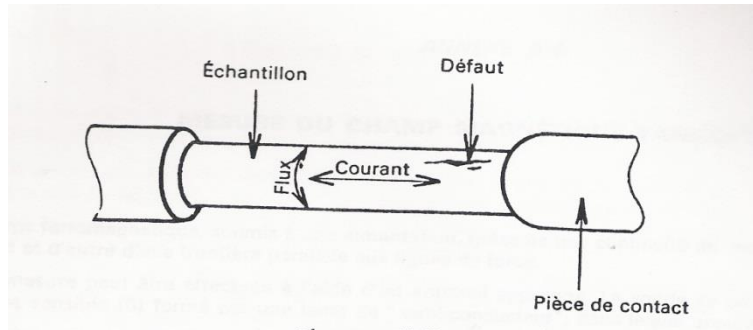
Aimantation directe par un appareil fixe



Méthode indirecte (aimantation transversale)

Le passage d'un courant circulant dans la pièce induit la création d'un champ magnétique d'excitation. Cette méthode appelée également aimantation transversale, peut être appliquée avec un appareil fixe ou mobile.

L'intensité de champ magnétique produit, est directement liée à l'intensité de courant. Il est donc nécessaire de veiller sur les contacts électriques entre les pièces et les amenées de courant.



Méthode indirecte d'aimantation par passage de courant

Vérification des conditions de contrôle

Pour vérifier l'efficacité globale de contrôle, on utilise **des témoins comportant des défauts artificiels.**

Ils sont placés directement en contact avec la surface de la pièce à contrôler. L'observation de ces défauts permet de juger de l'efficacité de contrôle.

On peut citer le témoin AFNOR (français), Berthold (allemand), ASME (américain).

Ces témoins sont fabriqués à partir d'un acier extra doux ou en fer industriel.

Le témoin AFNOR, est par exemple de forme carrée d'environ 20 mm de coté et de 1 à 2 mm d'épaisseur percée d'un évidement circulaire (défaut artificiel).

Lors de la vérification des conditions de contrôle, on place le témoin sur la surface à contrôler, les lignes de champ traversent alors le témoin, et l'on révèle le défaut artificiel.

La sensibilité est considérée comme satisfaisante, si l'on voit apparaître nettement, deux arcs, diamétralement opposés, sur la surface de témoin.

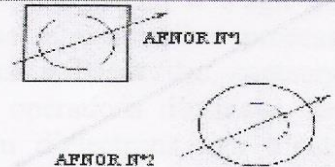
De même, le témoin Berthold est lui traversé par deux lignes perpendiculaires formant une croix (d'où le nom de croix de Berthold). Lors de la vérification de la sensibilité, les lignes de champ sont perturbées par l'existence de cette croix.

Exemples de témoins de contrôle

ETALON AFNOR N°1 ET N°2

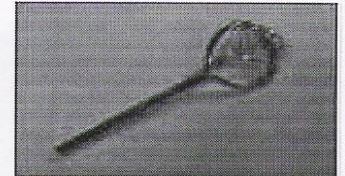
NF A 09 590

Témoins d'aimantation permettant de contrôler les conditions d'aimantation longitudinale et/ou transversale d'une pièce en un point précis. Permettent également de vérifier rapidement le bon fonctionnement du système d'aimantation. (NF 09 590)



CROIX DE BERTHOLD

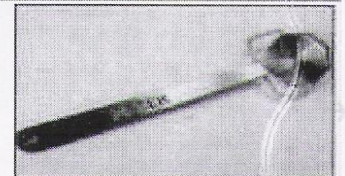
Témoin d'aimantation à sensibilité réglable, permettant un contrôle local des conditions d'aimantation d'une pièce. Permet de vérifier si toutes les conditions sont favorables à une bonne détection des discontinuités.



TEMOIN ASME ASTM

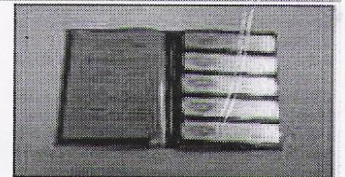
E 709 95

Témoin d'aimantation permettant un contrôle local des conditions d'aimantation d'une pièce. Permet de vérifier si toutes les conditions sont favorables à une bonne détection des discontinuités.



INDICATEURS CASTROL

Témoins souples permettant d'indiquer la direction et de contrôler l'intensité d'un champ magnétique. Il existe plusieurs types d'indicateurs avec différentes sensibilités permettant de vérifier si les conditions d'aimantation dans la zone à contrôler sont satisfaisantes.



5.2.3 MISE EN PLACE DU TEMOIN D'AIMANTATION A LA LIMITE DU CHAMP OPERATOIRE.

Le témoin d'aimantation permet de vérifier d'une manière globale que les conditions d'examen sont bien réalisées :

- Conditions de magnétisation.
- Qualité du révélateur.
- Conditions d'examen.
- Habilité de l'opérateur.

Après établissement du champ magnétique et application du produit indicateur, la sensibilité sera considérée comme satisfaisante si l'on voit apparaître nettement deux arcs de circonférence diamétralement opposée.

La direction du champ magnétique sera donnée par le diamètre joignant les centres des arcs de cercle.



Figure 13 Examen à l'aide d'une encre magnétique noire, témoin AFNOR N°1

Processus de désaimantation

Après le contrôle des pièces, **on procède à leur nettoyage**, afin de ne pas affecter l'utilisation ultérieure des pièces.

Ensuite, on procède **au contrôle de l'aimantation résiduelle**. Cette aimantation dite également champ rémanent, dans les pièces est due au champ induit dans la pièce suivant la description faite grâce au cycle d'Hystérésis.

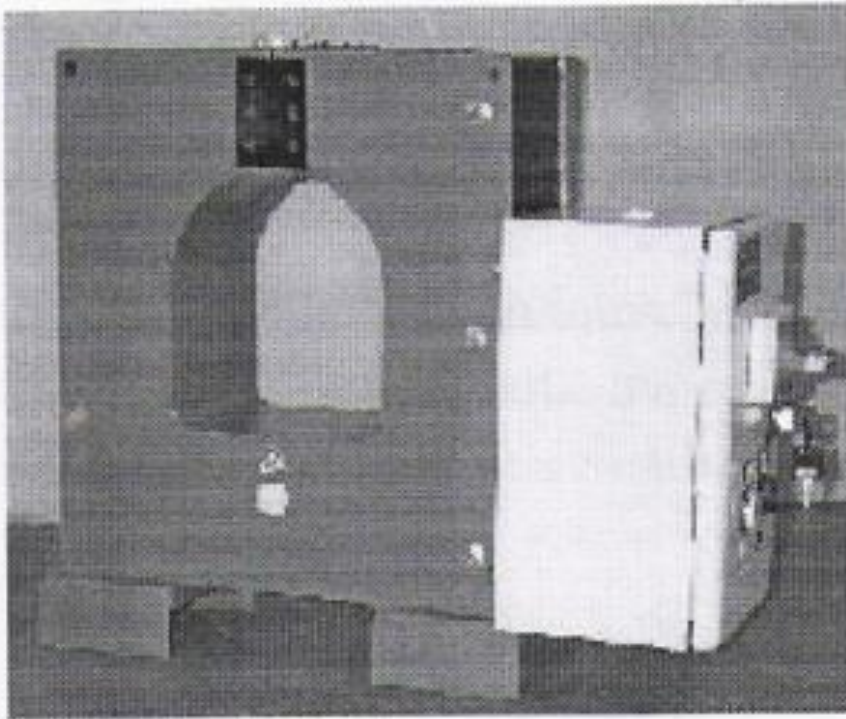
Si cela s'avère nécessaire, **on procède alors à la désaimantation des pièces**.

Pratiquement la désaimantation des pièces est réalisée par l'une des deux méthodes suivantes :

- Directement à partir de l'installation à poste fixe par passage d'un courant alternatif dans la pièce (ou dans un conducteur auxiliaire) qui est réduit progressivement en intensité jusqu'à la valeur nulle.

- A partir d'un tunnel de désaimantation prévu à cet effet. Après avoir placé la pièce dans le tunnel, on l'éloigne progressivement jusqu'à un minimum de 2 mètres de distance et on coupe l'alimentation du tunnel.

Le tunnel est constitué d'une bobine de grand diamètre généralement parcourue par un courant alternatif et le simple fait d'éloigner la pièce, réduit l'intensité du champ d'excitation magnétique.



Dispositif de désaimantation : tunnel de désaimantation

La vérification de la désaimantation consiste à mesurer le champ à la surface de la pièce au moyen d'un mesureur de champ tangentiel.

On utilise également des dispositifs plus simple type « boussole graduée » ou encore une chaîne de trombones, dont le comportement renseigne sur le caractère magnétique de la pièce.

Types de défauts susceptibles d'être détectés par magnétoscopie

(Aciers ou fontes moulées)

Dans le cas des pièces d'acier ou de fonte moulées, les discontinuités qui peuvent être rencontrées dans les pièces sont données dans la norme NF A 04-193. Ainsi les défauts peuvent être sous formes de :

Soufflures et piqûres

Points de sable, inclusions et films d'oxyde

Retassures

Tapures

Criques

Restes d'inserts

Gouttes froides et reprises

Ces défauts peuvent être soit :

Sous forme d'indications non linéaires isolées, elles sont alors désignées par indications SM,

Sous forme d'indications linéaires (non alignées), elles sont alors désignées par indications LM,

Sous forme d'indications linéaires (alignées), elles sont alors désignées par indications AM,

Dans chaque cas **un niveau de sévérité est établi**, et des images de références types, permettent au contrôleur lors de l'interprétation, **de comparer « ses images », aux images de référence**, afin d'établir un rapport indiquant les résultats de contrôle et le niveau de sévérité des défauts détectés, d'où une décision finale de rebut ou d'acceptation de la pièce, par rapport au cahier des charges

Niveau de sévérité SM 3

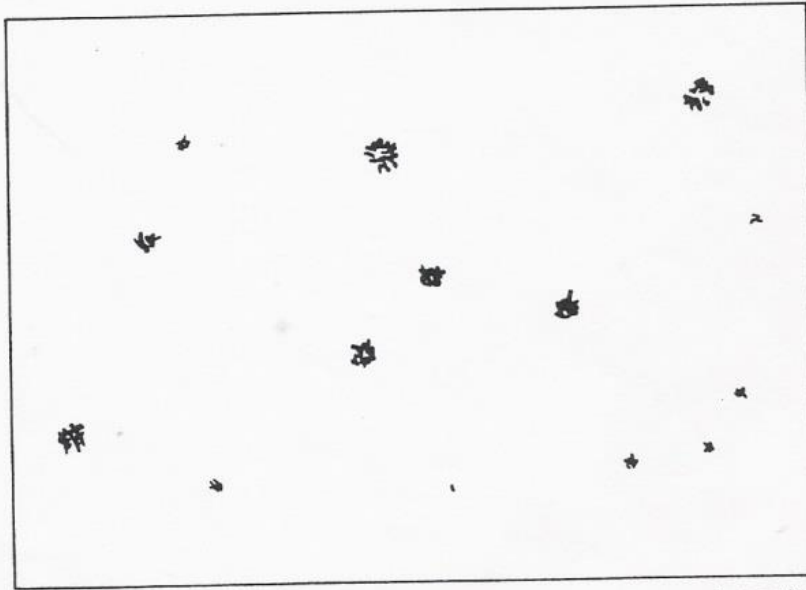


Image n° 3

Exemple d'images de références :
Indication non linéaires isolées SM
(Niveau de sévérité 3)

Niveaux de sévérité LM 5c – AM 5c

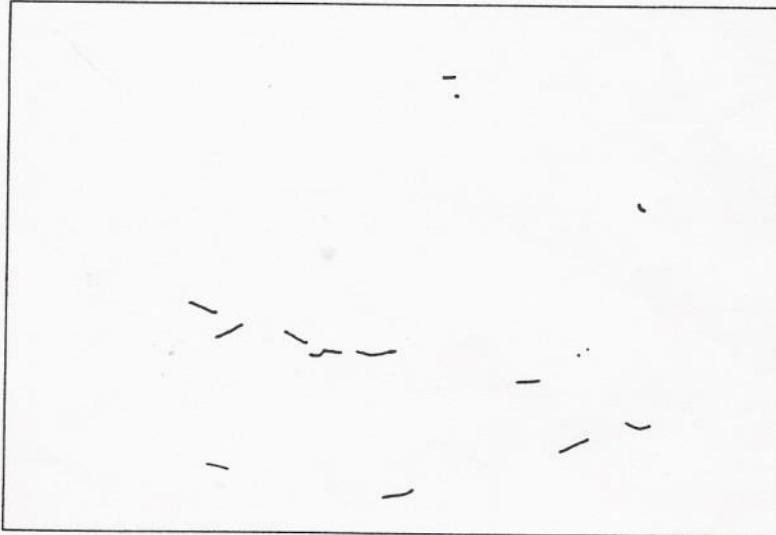


Image n° 12

Exemple d'images de références :
Indication linéaires non alignées SM, et
alignées AM
(Niveau de sévérité 5)

Aspect normatif

Le contrôle magnétoscopique, est mis en œuvre en respectant les règles de l'art définies auparavant. Ces règles sont citées et rapportées dans **des codes et normes internationales**. Elles permettent de définir et d'établir des cahiers de charges pour garantir la qualité et santé des pièces et des installations.

Pour les opérateurs et contrôleurs en magnétoscopie, la norme EN 473, fixe les conditions de formation, de qualification et de certification des opérateurs.

Ainsi on peut citer des exemples de normes pour le contrôle magnétoscopique :

- **NF A 09 590 : Essais non destructifs des produits métallurgiques. Principes généraux de l'examen magnétoscopique.**
- **NF A 04 121 : Produits sidérurgiques. Détection des défauts superficiels des produits longs par examen magnétoscopique**
- **NF A 09 599 : essais non destructifs. Moyens d'examen superficiels (ressuage, magnétoscopie). Caractérisation des sources de lumières ultraviolette.**
- **NF A 04 193 : Contrôle par magnétoscopie des pièces moulées en aciers et en fontes magnétiques.**

Aperçu sur les codes

- CODE ASME : Le plus utilisé au monde

Section 8 : Concerne des appareils à pression

Choix des matériaux, fabrication,
soudage, traitements thermiques, CND

Section 5 : Concerne les CND

Section 9 : Concerne la qualification des soudeurs
et des modes opératoires.

Aperçu sur les codes : CODAP

- CODAP : Code de Construction des Appareils à Pression.

CODE ASME : Complet

CODAP : Incomplet, renvoie souvent à d'autres normes

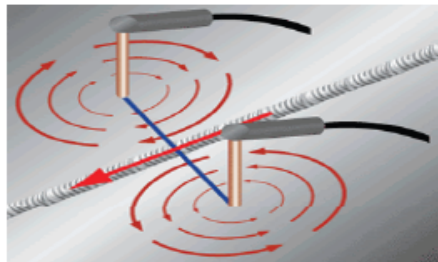
Spécification du contrôle par magnétoscopie : CODE ASME Article 7

- **Préparation de surface** : toujours ajouter 25 mm de chaque extrémité de la zone à contrôler.
- **Préparation de surface** : On peut contrôler une surface peinte (peinture non magnétique) à condition que les essais aux mêmes conditions soient concluants.
- **Éclairage** : doit être minimum 1000 Lux pour le visible et $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour UV.

Courants de magnétisation : Technique par touche

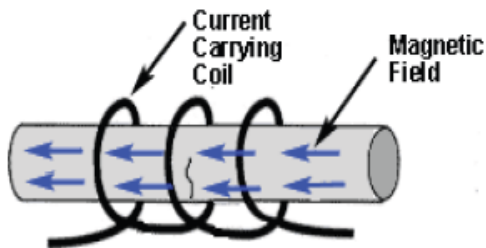
- Le courant de magnétisation :
Pour les épaisseurs sup à 19 mm, le courant doit être de 4 à 5 A par mm d'espacement entre cosses.

Épaisseurs inf à 19 mm, le courant doit être de 3,6 à 4,4 A par mm d'espacement entre cosses.
- L'espacement maximal est 200 mm
- L'espacement minimal est 75 mm



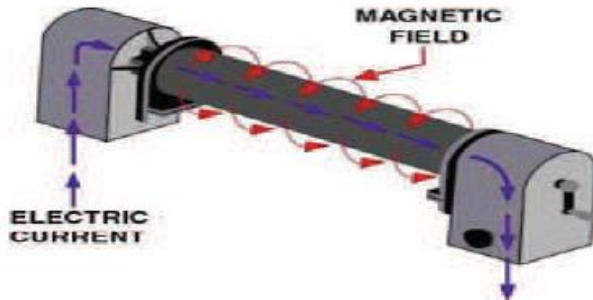
Courants de magnétisation : Technique par bobine ou câble

- Technique utilisée uniquement si $L/D \geq 2$
- Courant de magnétisation en fonction de L/D
 - $L/D \geq 4$: Ampere x tours = $35000/((L/D)+2)$
 - $L/D < 4$: Ampere x tours = $45000/(L/D)$
- Pour les grandes pièces : Courant de magnétisation 1200 à 4500 Ampere x tours



Courants de magnétisation : Technique de contact direct

- Courant de magnétisation : 12 à 31 A par mm de diamètre extérieur



Courants de magnétisation : Technique de conducteur central

- Courant de magnétisation : $12 \text{ à } 31 \text{ A par mm de diamètre extérieur} \times \text{Nombre de tour du conducteur}$



Spécification du contrôle par magnétoscopie : CODE ASME Article 7

- Évaluation suivant ASME 8
 - Basé sur la taille des indications et non pas sur la taille du défaut.
 - Seules les indications de plus de 1,5 mm de longueur sont considérées.
 - Une indication est considérée linéaire si sa longueur est 3 fois plus que sa largeur.
- Ne sont pas acceptables :
 - Les indications linéaires de plus de 1,5 mm de longueur.
 - Les indications non linéaires de plus de 5 mm de longueur
 - 4 ou plus des indications non linéaire séparées par moins de 1,5 mm bord à bord.

Conclusion

Le contrôle magnétoscopique correctement effectué (respect des normes et règles de l'art) permet d'avoir un diagnostic assez pertinent sur la santé des pièces.

La méthode permet une localisation des défauts en surface ou sous jacents, et elle se caractérise par sa simplicité.

Son utilisation à la fois sur chantier et en atelier, lui donnent des atouts indéniables, et explique son utilisation très large chez les industriels.

Néanmoins, ses limites au niveau de la nature ferromagnétique rend son champ d'application, réduit.

Elle présente également l'obligation de procéder presque systématiquement à une démagnétisation de matériau contrôlé, et enfin elle fait appel dans bien des cas à la méthode contrôle par ultrasons pour déterminer la profondeur des défauts révélés