

PROPRIÉTÉS D'EMPLOI DES ACIERS

SOUDABILITÉ DES ACIERS

Partie B: Comportement des produits
sidérurgiques aux sollicitations dans l'épaisseur
sous l'effet des liaisons effectuées par soudage

AVERTISSEMENT

Aux termes de l'article 55, alinéa 2 c, du traité instituant la Communauté européenne du charbon et de l'acier, la Commission encourage la recherche intéressant le charbon et l'acier, notamment en accordant des aides financières. La présente brochure rend compte de l'exécution et des résultats de l'un de ces projets de recherche.

En conséquence du traité de fusion du 8 avril 1965, la Commission unique des Communautés européennes exerce les pouvoirs et les compétences dévolus à l'ex-Haute Autorité de la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (CECA).

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés européennes.

Il est précisé que la Commission des Communautés européennes, ses contractants, ou toute personne agissant en leur nom :

- ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privés ;
- n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés décrits dans le présent document.

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

Direction générale «Affaires industrielles et technologiques»

PROPRIÉTÉS D'EMPLOI DES ACIERS

SOUDABILITE DES ACIERS

**PARTIE B: COMPORTEMENT DES PRODUITS
SIDÉRURGIQUES AUX SOLLICITATIONS DANS
L'ÉPAISSEUR SOUS L'EFFET DES LIAISONS
EFFECTUÉES PAR SOUDAGE**

INSTITUT DE SOUDURE

Paris

Convention N° 6210-55/3/230

(1.9.1970 - 31.8.1972)

RAPPORT FINAL

Edité par la Direction Générale
Information Scientifique et Technique et Gestion de l'Information

1975

EUR 5305 f
(2ème Vol.)

RÉSUMÉ

Dans le cadre du Contrat CECA n° 6210-55/0/11 l'Institut de Soudure avait pour mission d'effectuer des recherches sur le comportement des produits sidérurgiques aux sollicitations dans l'épaisseur sous l'effet de liaisons effectuées par soudage.

La première partie des travaux est relative à l'étude bibliographique (1) concernant l'arrachement lamellaire ainsi qu'à celle d'incidents récents liés à ce phénomène (2).

L'étude des données principales de ce mode particulier de rupture repose sur l'analyse :

- de ses conséquences
- du mécanisme de son apparition
- des moyens mis en œuvre pour apprécier la sensibilité des produits laminés vis à vis de ce phénomène
- des dispositions permettant de limiter ou d'en éviter les risques.

La seconde partie de l'étude a pour objet essentiel la recherche et la mise au point de méthodes d'essais destructives ou non destructives permettant d'apprécier la sensibilité d'un produit laminé à l'arrachement lamellaire.

Les essais ont été effectués d'une part, sur des tôles d'épaisseurs, de nuances, modes d'élaboration et états de traitement thermique différents et d'autre part, sur des produits issus de constructions affectées par l'arrachement lamellaire.

Les essais mécaniques effectués à partir de ces tôles, sur éprouvettes soudées ou non consistent essentiellement en essais de traction exécutés dans le sens « travers-court » sur des éprouvettes classiques ou spécialement mises au point dans le cadre de l'étude. Ces derniers ont permis d'obtenir des informations particulièrement significatives.

Par ailleurs, à l'issue d'une sélection des méthodes d'essais non destructives, les tôles ont été soumises à un examen par ultrasons qui a été effectué successivement selon une méthode conventionnelle dite par réflexion puis par « analyse fréquentielle ». Dans les deux cas les résultats ont été décevants.

Enfin, dans une dernière phase, la mise au point d'une technique spéciale d'examen par ultrasons a permis, comme le montrent les résultats des essais mécaniques relatifs aux valeurs des striction et allongements, de caractériser de façon satisfaisante le comportement d'un matériau vis à vis des sollicitations dans l'épaisseur.

(1) A déjà fait l'objet d'un document séparé (rapport IS-5 556).

(2) Un cas industriel d'arrachement lamellaire a été étudié dans le rapport IS-5 559.

S O M M A I R E

<u>CHAPITRE 1</u> - INTRODUCTION	7
<u>CHAPITRE 2</u> - PROGRAMME DE RECHERCHE	9
<u>CHAPITRE 3</u> - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	11
<u>CHAPITRE 4</u> - CHOIX ET APPROVISIONNEMENT DES PRODUITS DE BASE	13
<u>CHAPITRE 5</u> - SELECTION DES METHODES DE CONTROLE NON DESTRUCTIVES ET CHOIX DES EQUIPEMENTS	15
1. Examens par ultrasons	15
1.1. Choix des méthodes d'examen et description des matériels spécifiques	15
1.1.1. Recherche des inclusions par mesure de l'énergie réfléchie	16
1.1.2. Détermination et mesure de l'absorption de l'énergie acoustique dans les matériaux	17
1.2. Description du matériel de base sélectionné pour l'examen des tôles	23
1.2.1. Générateur d'impulsions ultrasonores	23
1.2.2. Palpeurs	25
1.2.3. Dispositif de contrôle automatique en immersion (type CE 1)	25
1.2.3.1. Dispositif d'entraînement mécanique du palpeur	26
1.2.3.2. Cuve	26
1.2.4. Dispositif d'enregistrement	27
1.3. Matériels complémentaires divers utilisés lors de l'étude	28
1.3.1. Générateurs d'ondes ultrasonores	28
1.3.1.1. Emission par oscillations amorties	28
1.3.1.2. Emission par trains d'oscillations entretenues (Module ER 3079)	29
1.3.2. Palpeurs	29
1.3.3. Milieux de couplage	30
<u>CHAPITRE 6</u> - MISE EN OEUVRE DES EXAMENS NON DESTRUCTIFS ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS	31
1. Examen par ultrasons	31
1.1. Examens effectués selon la méthode conventionnelle	31

1.1.1. Examens dits de référence	31
1.1.1.1. Essais préliminaires	32
1.1.1.2. Contrôle systématique des tôles	39
1.1.2. Examens complémentaires	45
1.1.2.1. Examens par ondes longitudinales	45
1.1.2.2. Examens par ondes transversales	45
1.2. Examens effectués selon la méthode d'analyse fréquentielle	47
1.2.1. Essais préliminaires	47
1.2.1.1. Examen initial d'une tôle de 30 mm d'épaisseur (repère 59) dite de référence	47
1.2.1.2. Etalonnage et choix des paramètres d'examen pour le contrôle automatique en immersion	48
1.2.2. Examen proprement dit	49
1.2.2.1. Tôle de référence (n° 59)	50
1.2.2.2. Tôles dites "neuves"	50
1.2.2.3. Tôles issues de constructions endommagées par des ruptures d'arrachement lamellaire	51
2. Examen par aimantation	52
2.1. Mode opératoire	52
2.2. Résultats obtenus	52
2.2.1. Tôles spécialement approvisionnées pour l'étude (dites "neuves")	52
2.2.2. Tôle de référence n° 59	52
2.2.3. Tôles issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire	52
3. Conclusion	
<u>CHAPITRE 7 - ESSAIS DESTRUCTIFS</u>	51
1. Buts	5
2. Essais d'identification	5
2.1. Essais de traction	5
2.2. Essais de résilience	5
2.3. Analyses chimiques	5
2.4. Examens métallographiques	5
3. Essais "de comportement dans l'épaisseur"	!
3.1. Vue d'ensemble	!
3.2. Orientation des travaux	!

3.3. Etude critique des divers essais proposés	59
3.4. Amélioration de certaines procédures d'essais	59
3.4.1. Essais Brodeau	59
3.4.2. Essais de traction sur éprouvettes soudées	60
3.5. Etude d'essais nouveaux	62
3.5.1. Essai de traction sur implants	63
3.5.2. Essais d'emboutissage	63
3.6. Détermination du comportement dans l'épaisseur des matériaux étudiés	63
3.6.1. Au moyen de l'essai Brodeau type B	63
3.6.2. Au moyen de l'essai de traction sur implant - Résultats	64
3.6.3. Au moyen des essais de traction sur éprouvettes soudées	66
3.6.3.1. Eprouvettes prismatiques soudées par faisceau d'électrons	66
3.6.3.2. Eprouvettes cylindriques soudées par friction	67
3.6.4. Au moyen de l'essai d'emboutissage sur éprouvette type Persoz	68
4. Remarques générales sur les tôles expérimentées	69
4.1. Influence de l'état de traitement thermique sur les propriétés R _m , A % et Z _d ou Z _h	69
4.2. Influence conjuguée du mode d'élaboration et de l'état de traitement thermique sur les propriétés ductiles	70
4.3. Conclusions	72
<u>CHAPITRE 8</u> - CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DES EXAMENS PAR ULTRASONS ET LE COM- PORTEMENT DES PRODUITS LAMINES AUX SOLLICITATIONS EXERCEES DANS LA DIRECTION DE L'ÉPAISSEUR	73
1. Etablie à partir des résultats obtenus à l'aide des méthodes d'examen par ultra- sons et conditions opératoires définies au Chapitre 5	73
2. Etablie à partir des résultats obtenus au moyen d'une méthode d'examen par ultrasons particulièrement adaptée	74
2.1. Orientation des travaux	74
2.2. Description de la technique d'examen mise en oeuvre	75
2.2.1. Principe	75
2.2.2. Matériel mis en oeuvre	75
2.2.3. Détermination des paramètres d'examen	76
2.2.3.1. Distance palpeur-pièce "d ₁ "	76
2.2.3.2. Sensibilité d'examen	77
2.2.3.3. Position de la zone de sélection	78

2.3. Résultats obtenus	78
2.3.1. Recherche des conditions optimales de détection des inclusions affectant les zones superficielles d'une tôle sensible à l'arrachement lamellaire (tôle B 30)	78
2.3.2. Recherches des inclusions au voisinage de chacune des faces de tôles dont les caractéristiques mécaniques dans la direction de l'épaisseur sont particulièrement significatives de la plus ou moins grande sensibilité à l'arrachement lamellaire	79
2.3.2.1. Tôles présentant de bonnes caractéristiques dans le sens du "travers court"	79
2.3.2.2. Tôles présentant de très faibles caractéristiques mécaniques dans le sens du "travers court"	79
2.4. Conclusion	80
<u>CHAPITRE 9</u> - CONCLUSIONS GENERALES	81

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les travaux évoqués dans le présent rapport s'inscrivent dans le cadre d'études sur la soudabilité des aciers dans le but d'en promouvoir l'emploi grâce à l'acquisition des connaissances sur des problèmes définis.

Il s'agit ici essentiellement de recherches relatives au comportement des produits sidérurgiques lorsque ceux-ci sont sollicités dans l'épaisseur par l'intermédiaire de liaisons effectuées par soudage.

A l'époque où l'étude a été décidée, elle était justifiée par les faits suivants :

1°) Des enquêtes effectuées dans différents pays, il ressortait que les incidents ou accidents consécutifs à des décohésions dans l'épaisseur (arrachement lamellaire) des produits laminés étaient relativement nombreux et que leur fréquence semblait croître au moins dans certains pays.

2°) Bien que ce problème ait fait l'objet de nombreuses publications, les connaissances sur le sujet étaient fragmentaires et dispersées.

3°) Il n'existait pas de moyens industriels permettant de prévenir l'apparition du phénomène.

Devant l'importance des problèmes posés, un programme de recherche a été établi, et les travaux correspondants répartis entre le CRM de Liège et l'Institut de Soudure de Paris. Ce programme comporte :

- Une étude bibliographique destinée à rassembler et à synthétiser les informations d'une part, disponibles dans la littérature technique et d'autre part, connues des laboratoires chargés de la réalisation du programme.

- Une partie expérimentale, cette dernière ayant surtout pour objet :

1°) de rechercher des procédures d'essais non destructifs susceptibles de renseigner l'utilisateur sur le risque de décohésion dans l'épaisseur d'un produit donné,

2°) d'étudier les différents types d'essais destructifs expérimentés par les divers chercheurs afin d'en préciser les mérites et les inconvénients ou limitations, ceci dans le but de donner aux élaborateurs et aux usagers le moyen de choisir les essais en fonction de l'objectif visé,

3°) d'étudier l'adaptation de la méthode des implants à la mise en évidence de la sensibilité à l'arrachement lamellaire,

4°) de profiter de l'expérimentation pour étendre les connaissances dans le domaine de l'influence des procédés d'élaboration et des traitements thermiques sur la sensibilité à l'arrachement lamellaire des produits considérés.

En ce qui concerne l'Institut de Soudure, l'étude bibliographique et les essais concernant les possibilités offertes en ce domaine par la méthode des implants ont fait l'objet de documents séparés.

Les travaux concernant les essais non destructifs et destructifs sont décrits dans le présent rapport (1). Ils ont porté notamment sur :

- La sélection, l'approvisionnement et l'identification d'un éventail de produits représentatifs des fournitures sidérurgiques actuelles.

- La collecte d'échantillons prélevés sur des constructions ayant, lors de leur réalisation ou en service, subi des dommages consécutifs à l'arrachement lamellaire.

- L'expérimentation des diverses méthodes d'essais destructifs décrites dans la littérature technique et l'amélioration de ces méthodes ou la recherche d'autres techniques ne présentant pas les inconvénients des méthodes connues.

- La recherche et la mise au point de méthodes semi-destructives susceptibles de s'appliquer "sur le site" afin de caractériser un produit du point de vue des risques qu'il présente vis à vis de l'arrachement lamellaire.

- L'examen systématique par ultrasons suivant des méthodes conventionnelles des produits approvisionnés et l'expérimentation de méthodes ultrasonores nouvelles afin de tenter de trouver un moyen non destructif capable de renseigner a priori sur les risques d'arrachement lamellaire.

- Des examens non destructifs par aimantation sur le chant des divers produits disponibles.

(1) Toutefois, l'étude approfondie d'un cas industriel d'arrachement lamellaire survenu à une construction en cours de réalisation a fait l'objet d'un rapport séparé (Cf. rapport IS 5 559).

CHAPITRE II

PROGRAMME DE RECHERCHE

La conduite de l'étude a nécessité l'exécution du programme de recherche défini ci-après :

1 - PHASE PRELIMINAIRE -

Etude bibliographique de documents d'origine française et étrangère ayant déjà fait l'objet d'une publication et relatifs au phénomène d'arrachement lamellaire. Ces travaux ont donné lieu au rapport n° 5 556 du 15 mai 1974 (Chapitre III).

2 - ETUDE PROPREMENT DITE -

Celle-ci a donné lieu par ordre chronologique aux opérations suivantes :

2.1. Choix et approvisionnement des produits de base (Chapitre IV)

2.2. Sélection des méthodes d'essais

2.2.1. Non destructives (Chapitre V)

- par ultrasons
- par aimantation

2.2.2. Destructives ou semi-destructives (Chapitre VII)

- essais mécaniques

a) essais de traction

- . sur éprouvettes Brodeau type B
- . sur implants soudés
- . sur éprouvettes prismatiques soudées par faisceau d'électrons
- . sur éprouvettes cylindriques soudées par friction.

b) d'emboutissage (tension biaxée)

- . sur éprouvette type Persoz réalisée par soudage par faisceau d'électrons

- examens métallographiques (Chapitre VI et VIII)

- . macrographies et micrographies sur coupes réalisées parallèlement au plan XOZ
- . empreintes Baumann sur coupes précitées.

2.3. Sélection des équipements de contrôle par ultrasons (Chapitre V).

2.4. Mise en oeuvre des essais

2.4.1. Non destructifs (Chapitre VI)

2.4.2. Destructifs ou semi-destructifs (Chapitre VII)

2.5. Comparaison des résultats obtenus lors des essais non destructifs et destructifs (Chapitre VIII)

2.6. Conclusion générale : synthèse des résultats obtenus (Chapitre IX).

CHAPITRE III

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Entreprise dans le but de faire le point des connaissances acquises tant en France qu'à l'étranger dans le domaine de l'arrachement lamellaire, cette étude constitue la phase préliminaire des travaux entrepris par l'Institut de Soudure dans le cadre du présent contrat de recherche (Convention CECA/IS n° 6210-55/0/11).

Celle-ci fait l'objet du rapport IS n° 5 556 en date du 15 mai 1974.

CHAPITRE IV

CHOIX ET APPROVISIONNEMENT DES PRODUITS DE BASE

L'étude de certains exemples d'arrachements lamellaires ainsi que les travaux de plusieurs auteurs dont il est fait état dans le rapport bibliographique (Cf. chapitres 3 et 4 de ce document) ont montré que l'initiation et le développement du phénomène résultaient très souvent de certains facteurs d'ordre métallurgiques et notamment :

- de la disposition particulière de la structure des produits (structure en bande) → (recuit ou non recuit)
- de la présence et de la distribution des inclusions résultant d'un calmage partiel ou total de l'acier (associées ou non avec une structure en bande)
- de la nature et de la forme des inclusions et en particulier des impuretés non métalliques (inclusions déformables telles que sulfure de manganèse, silicates, inclusions d'oxyde et inclusions indéformables telles que les aluminates et certains oxydes)
- de la nuance de l'acier utilisé.

La sélection des produits de base destinés à cette étude pouvait donc être effectuée :

- d'une part arbitrairement à partir de tôles dites "neuves" et spécialement approvisionnées pour cette étude
- d'autre part à partir de prélèvements issus de constructions ayant subi des dommages par arrachement lamellaire lors de leur réalisation ou en service.

1°) Nature et composition des tôles ayant fait l'objet d'une commande spéciale en aciérie.

Il convenait de formuler a priori un choix permettant une investigation aussi vaste que possible sur un échantillonnage de tôles dont le mode d'élaboration (procédé d'élaboration, nature du calmage), l'état de traitement thermique (recuit et non recuit), la nuance et l'épaisseur soient aussi différents que possible mais conformes cependant aux qualités couramment rencontrées en construction soudée.

C'est dans cet esprit qu'un certain nombre de tôles répondant aux impératifs précédents a fait l'objet, auprès de la Société Mandel-Sidelor, d'une commande spécialement destinée à cette étude.

Les caractéristiques principales de ces tôles sont consignées au tableau n° 1 en annexe complété par les nota 1 et 2 ci-après :

Nota 1 : Lors de la livraison de ces produits, il a été constaté des lacunes dans le repérage d'un certain nombre de tôles qui ne permettaient pas pour celles-ci l'identification de certaines caractéristiques spécifiées par nos soins et notamment :

- l'état de traitement thermique (recuit : R et non recuit : NR),
- la direction du laminage (qui devait être indiquée par une flèche),
- le mode d'élaboration (procédé et nature du calmage).

L'aciériste n'ayant pu fournir les renseignements permettant de lever ces indéterminations, un certain nombre d'essais mécaniques (Cf. chapitre VII) et examens métallographiques (Cf. planche n°1 à 6 annexées) ont été effectués par nos soins afin d'identifier les tôles concernées.

La composition chimique des produits ainsi que les résultats des contre-analyses et essais mécaniques sont consignés au tableau n° 2 joint en annexe.

Nota 2 : Les tôles ont été livrées au format carré de 1000 x 1000 mm à notre demande afin de réduire les opérations de mise aux dimensions de 500 x 1000 mm requises lors des contrôles automatiques par ultrasons.

2°) Nature et caractéristiques des échantillons de tôles issues de constructions affectées par le phénomène d'arrachement lamellaire.

Ces échantillons sont issus de prélèvements effectués à notre demande par différents constructeurs sur des fabrications diverses endommagées lors de leur réalisation par le phénomène d'arrachement lamellaire.

Ce dernier est apparu systématiquement soit pendant le soudage, soit au cours de la période qui a suivi immédiatement cette opération.

En outre, il convient de remarquer que les soudures affectées sont dans tous les cas des assemblages d'angle dont les préparations adoptées sont certes différentes, mais qui ont tous en commun la particularité d'exercer une contrainte de retrait ou de bridage dans la direction de l'épaisseur de l'un des éléments assemblés.

Le repérage ainsi que les caractéristiques dimensionnelles et la nature des fabrications dont sont issus ces échantillons de tôle sont consignés dans le tableau n° 3 annexé.

Afin d'établir une comparaison avec les tôles précitées dites "neuves" ayant fait l'objet d'une commande particulière pour cette étude, un dosage des principaux éléments constitutifs du matériau de chacun de ces échantillons a été effectué.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau n° 4 annexé.

Remarque : Parallèlement à cette étude, l'Institut de Soudure a entrepris, à partir des échantillons de tôles repérés C88 et C112, issus d'une même construction, l'étude systématique d'un cas industriel d'arrachement lamellaire.

Les travaux effectués et les résultats obtenus ont fait l'objet du rapport n° 5 559 du 19 mai 1974.

CHAPITRE V

SELECTION DES METHODES DE CONTROLE NON DESTRUCTIVES ET CHOIX DES EQUIPEMENTS

Les connaissances acquises dans le domaine de l'arrachement lamellaire et en particulier les travaux de BAR, BAKER, NEWMAN, et ELLIOT (Cf. chapitre IV du rapport bibliographique) ont montré le rôle important que jouent certains types d'inclusions dans le mécanisme d'initiation et de développement d'une fissuration par arrachement lamellaire.

Il convenait donc de choisir et de mettre en oeuvre des méthodes de contrôle susceptibles de fournir des informations qualitatives et quantitatives permettant de déterminer la présence, la nature éventuellement, et le nombre (densité) d'inclusions dans les produits examinés.

La ou les techniques de contrôle retenues devaient en outre, si possible, présenter un caractère industriel et pouvoir ultérieurement être utilisées lors de la réception des tôles par exemple.

C'est en raison de leur aptitude particulière au contrôle global des produits laminés que les ultrasons ont été utilisés dans cette étude.

Le contrôle par aimantation a été mis en oeuvre à titre de complément parallèlement aux examens métallographiques (Cf. § 2 chapitres V et VI) compte-tenu du caractère non-métallique des inclusions recherchées.

1 - EXAMENS PAR ULTRASONS -

1.1. Choix des méthodes d'examen et description des matériels spécifiques.

En raison des dimensions variables des inclusions recherchées (quelques dixièmes de millimètre à plusieurs millimètres), il était nécessaire d'envisager leur détection :

- soit en mesurant la valeur de l'énergie réfléchie par le défaut ou le groupe de défauts dans le cas d'inclusions de dimensions relativement importantes (plusieurs millimètres). A ce titre, on admet, en fonction de l'expérience, que les ultrasons peuvent en principe mettre en évidence les inclusions de dimensions égales ou supérieures à la demi-longueur d'onde du signal

- soit en appréciant l'absorption de l'énergie acoustique provoquée par diffusion de celle-ci sur les défauts de très petites dimensions.

L'utilisation de plusieurs méthodes et dispositifs correspondants était alors étudiée conjointement par l'Institut de Soudure et la Société des Réalisations Ultrasoniques constructrice du matériel.

1.1.1. Recherche des inclusions par mesure de l'énergie réfléchie.

C'est une méthode conventionnelle dite "par réflexion d'impulsions" qui a été mise en oeuvre.

Elle consiste à utiliser un palpeur qui émet perpendiculairement à la surface de la tôle examinée des impulsions brèves d'ondes longitudinales. A l'issue de chaque réflexion des ondes acoustiques dans le matériau, une partie de l'énergie réfléchie est captée par le même palpeur et convertie sous la forme d'un oscillogramme comportant 1 ou plusieurs échos de réflexions successifs dits échos de fond. (représentation type A).

Lorsqu'une hétérogénéité (inclusion) de surface notable (en principe dont la dimension moyenne est supérieure à la demi-longueur d'onde de la vibration) est située sur le trajet du faisceau ultrasonore, elle intercepte puis réfléchit prématurément une partie de l'énergie dans la direction de la source d'émission (palpeur). Après réception et amplification, il apparaît un écho de réflexion intermédiaire dit écho de défaut sur l'écran de l'appareil.

L'amplitude de cet écho dépend principalement :

- de la surface du défaut ;
- de son orientation (il convient de noter qu'en raison du laminage, les défauts du type inclusion ou dédoublement présentent une orientation privilégiée vis à vis de leur détection) ;
- des conditions de couplage entre le palpeur et la pièce. (Afin de s'affranchir des variations éventuelles de celui-ci dues notamment aux variations de pression exercée sur le palpeur lors d'un contrôle manuel par contact et aux modifications de l'épaisseur du milieu de couplage entre le palpeur et la pièce, les contrôles dits de référence ont été systématiquement effectués en immersion totale à l'aide d'une installation qui sera décrite ultérieurement) ;
- de la perméabilité du matériau ;
- de l'état de surface de la tôle ;
- de la position du défaut dans l'épaisseur du produit (absorption).

Si l'énergie réfléchie par un réflecteur plan, telle qu'une inclusion déformable à chaud, dépend principalement de la surface de ce dernier, un autre paramètre déterminant est la surface relative du défaut par rapport à la section du faisceau au niveau considéré.

Ceci nous a conduit à contrôler successivement chaque tôle ou échantillon à l'aide de faisceaux ultrasonores normalement divergents, puis focalisés et de diamètres de palpeurs différents.

En outre, différentes fréquences d'examen ont été utilisées dans le but de comparer les résultats obtenus compte-tenu de l'incidence de la longueur d'onde vis à vis de la détection des petits défauts.

Remarque : La détection globale de défauts de faible dimension (inclusions) peut être envisagée selon une autre méthode qui sera décrite dans le paragraphe suivant (solution c).

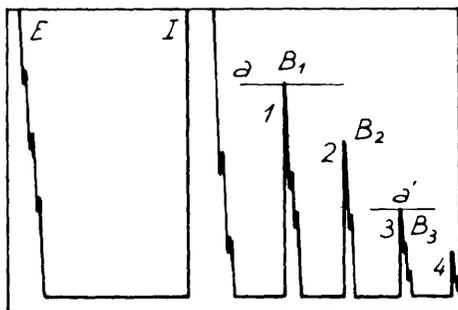
1.1.2. Détermination et mesure de l'absorption de l'énergie acoustique dans les matériaux

Une méthode générale permettant de mesurer l'affaiblissement de l'énergie ultrasonore dans un matériau consiste généralement à comparer qualitativement ou quantitativement les amplitudes de crête des échos de fond successifs obtenus ou mieux encore, à mesurer la pente de la courbe enveloppe de ceux-ci. Cette dernière opération ne peut toutefois être que qualitative en raison de la forme exponentielle de la courbe due aux caractéristiques des amplificateurs linéaires classiques d'une part et aux phénomènes de propagation des vibrations acoustiques dans les matériaux, d'autre part (l'amplitude de l'onde est de la forme $A_x = A_0 e^{-kx}$)

Différentes méthodes et dispositifs permettant une mesure quantitative de l'absorption ont été envisagés :

Solution a : Consiste à réguler automatiquement, à l'aide d'un dispositif approprié, l'amplitude du premier écho de fond afin de compenser les variations éventuelles d'intensité de l'énergie acoustique introduite dans la pièce dues notamment, lors d'un examen en immersion totale (couplage constant) aux irrégularités de surface de celle-ci.

La mesure de l'absorption est faite dans ce cas en détectant l'amplitude du n^e écho de fond obtenu en utilisant la méthode d'examen dite "par réflexions d'impulsions d'ondes longitudinales et échos multiples" (Cf. figure ci-contre).



Le rang n est défini en fonction de l'absorption du matériau considéré.

Dans un système de mesure analogique la tension de sortie aux bornes du dispositif sera proportionnelle à l'amplitude de l'écho de rang n considéré et les variations de ce dernier pourront être enregistrées sur une table X-Y selon une représentation type C par exemple.

a : amplitude réglée automatiquement

a' : amplitude mesurée sur un écho de rang $n = 3$ par exemple.

I : écho obtenu à l'interface eau-acier

E : Emission

B1, B2, B3... échos de fond successifs.

L'application pratique de cette méthode nécessitait l'incorporation de deux circuits indépendants dans l'appareil de contrôle par ultrasons à savoir :

- un module référencé "S5" par le fabricant qui permet de réguler automatiquement le gain de l'amplificateur de façon à maintenir constante l'amplitude du premier écho de fond.

- un module référence "S1" permettant la sélection et la détection de l'écho de rang n choisi.

Cette solution qui a l'avantage d'être simple présente toutefois deux inconvénients majeurs :

- une dynamique du circuit de mesure relativement faible (15 décibels), ce qui réduit les possibilités de détecter, pour un même réglage de l'amplification, les variations d'absorption supérieures à cette valeur,

- une constante de temps de régulation de l'amplitude du 1er écho de fond élevée qui ne permet pas d'effectuer de mesures significatives si les variations d'amplitude de cet écho sont trop rapides (supérieures à 6 dB par 1/5^e de seconde environ).

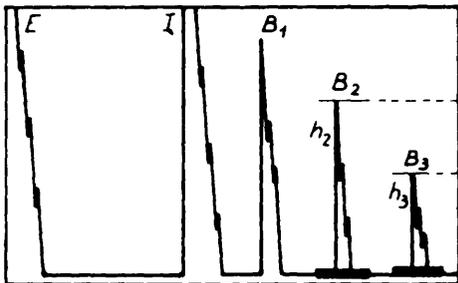
C'est essentiellement ce dernier point qui nous a conduit à rejeter cette solution. En effet, le déplacement du palpeur est, dans le dispositif utilisé qui sera décrit ultérieurement, effectué mécaniquement et à une vitesse de translation constante et non réglable de 250 mm par seconde (50 mm par 1/5^e de seconde).

Cette vitesse ne permet pas en effet de déceler les variations rapides de perméabilité du milieu au droit des zones défectueuses de faible surface (dont la plus grande dimension est inférieure à 50 mm) ou de régions étendues dont les limites sont explorées pendant une durée bien inférieure au temps de réponse minimal de l'appareillage.

Solution b : Lors de l'examen d'une tôle effectué selon la méthode dite "par réflexion d'impulsions d'ondes longitudinales", l'oscillogramme obtenu présente, pour un réglage défini de la puissance à l'émission et de l'amplification à la réception, une succession d'échos de fond.

Les amplitudes de ceux-ci diminuent en général d'une façon monotone au delà d'une certaine distance de parcours des ultrasons dans le matériau, distance qui correspond à la longueur du champ proche du palpeur (ou zone de Fresnel).

La différence des amplitudes de crête des échos de fond dépend de plusieurs paramètres et principalement de l'absorption du matériau considéré.



La méthode envisagée consiste à mesurer simultanément à l'aide d'un sélecteur à 2 canaux (référence SDR1) incorporé à l'appareillage classique, l'amplitude de crête de deux échos de fond distincts consécutifs ou non (Cf. fig. ci-contre). Ce dispositif analogique délivre une tension de sortie proportionnelle à la différence Δh des amplitudes mesurées.

$$\left. \begin{aligned} u &= h_2 - h_3 \\ u &= f(\Delta h) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{tension de sortie} \\ \text{du sélecteur SDR 1} \end{array}$$

- à la sortie de l'amplificateur logarithmique : $\log u = \log h_2 - \log h_3$

$$\text{d'où } u = \frac{h_2}{h_3}$$

La particularité du système consiste à remplacer l'amplificateur linéaire d'origine par un amplificateur logarithmique (ER 100) (Cf. fig. 1 pl. 7) dont la tension de sortie est alors proportionnelle au rapport des amplitudes exprimées en décibels, autre méthode permettant de mesurer quantitativement l'absorption du matériau.

L'enregistrement des résultats, peut, comme précédemment, être effectué graphiquement selon une représentation type C à l'aide d'une table traçante.

L'absorption du matériau à l'aplomb d'un point de la surface de la tôle examinée de coordonnées (x, y) peut alors être exprimée :

- soit par brûlage d'intensité proportionnelle à la tension de sortie de l'amplificateur logarithmique
- soit de façon beaucoup plus précise en injectant la tension de sortie de l'amplificateur aux bornes de l'un des modules X ou Y de l'enregistreur, de telle sorte que la déviation du stylet encreur selon l'une de ces directions lui soit proportionnelle.

Cette solution présente en outre l'avantage d'utiliser un dispositif de sélection type SDR1 dont la dynamique est de 60 décibels environ, donc très importante, et le temps de réponse est très bref, la constante de temps étant dans ce cas égale à 1 période de la cadence de répétition des impulsions (fréquence de récurrence).

Toutefois, un certain nombre d'inconvénients inhérents à cette méthode n'ont pas permis d'en retenir l'essai et la mise en oeuvre éventuelle ; il convient de citer notamment :

- les délais de livraison, jugés trop importants, d'éléments très spécifiques tels que le sélecteur et l'amplificateur logarithmique
- les modifications profondes de l'appareillage de base qu'aurait entraînée l'incorporation du matériel précité
- enfin, l'utilisation de l'amplificateur logarithmique nécessitait le remplacement du module de l'émission et de réception du type ER 30 initialement prévue dont l'une des caractéristiques essentielles est de délivrer des trains d'ondes sinusoïdaux dont la fréquence et la durée peuvent être réglées de façon continue ce qui permet de beaucoup mieux contrôler les caractéristiques de l'impulsion ultrasonore produite par l'élément piézo-électrique du palpeur utilisé.

Solution c : Alors que les solutions précédentes sont essentiellement destinées à la mesure de l'absorption par comparaison des amplitudes de deux échos de fond successifs, la solution finalement retenue exploite les possibilités a priori plus étendues de l'analyse fréquentielle. (détection des défauts et mesure simultanée de l'absorption).

Bien que le principe de cette méthode ainsi que ses perspectives aient déjà fait l'objet d'une analyse complète de la part de la Société des Réalisations Ultrasoniques (Cf. contrat d'étude DGRST n° 717.2904.00221.75.01), il paraît toutefois opportun dans le cadre de la présente étude d'en rappeler les données essentielles.

Les appareillages de contrôle classiques exploitant une présentation type A, mesurent le temps de parcours et l'amplitude d'un signal émis et détecté le plus fréquemment par un palpeur unique travaillant dans une gamme de fréquence assez étroite.

La théorie et l'expérience montrent que si de tels dispositifs permettent dans les meilleurs conditions de déterminer la position d'un réflecteur éventuel, les dimensions de ce dernier ne peuvent en revanche être déduites avec certitude de l'amplitude de l'écho réfléchi.

Il apparaît en particulier qu'une définition beaucoup plus précise de la structure des matériaux examinés (détection des défauts de compacité éventuels et mesure de l'absorption) peut être obtenue en faisant intervenir le paramètre fréquence.

En effet, lors d'un examen effectué par réflexions d'impulsions, l'énergie réfléchie par un obstacle plan infini et orienté perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore fournit aux bornes de l'élément piézo-électrique un signal de la forme :

$$E(\omega) \cdot R(\omega)$$

où :

$E(\omega)$ = signal électrique d'excitation de l'élément piézo-électrique de fréquence ω

$R(\omega)$ = fonction de transfert du palpeur qui tient compte de son rendement et des caractéristiques de son rayonnement à la fréquence d'excitation ω .

Lorsque la réflexion a lieu sur un réflecteur de forme quelconque, (inclusion par exemple), le signal reçu est de la forme :

$$E(\omega) \cdot R(\omega) \cdot h(\omega)$$

Dans cette nouvelle expression, $h(\omega)$ est la fonction de transfert de l'obstacle considéré qui définit les variations de l'énergie renvoyée en direction du palpeur lorsque la fréquence varie.

Il a été démontré que cette fonction est égale, à un facteur constant près, à la transformée de Fourier d'une fonction $R(x)$ appelée "profil réflecteur de l'obstacle associé à une direction".

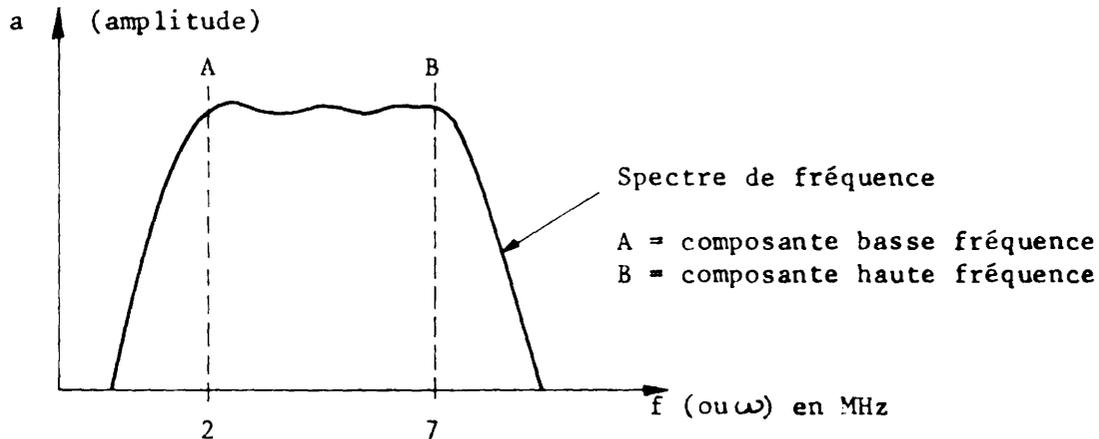
La connaissance de cette fonction doit donc permettre de connaître les caractéristiques principales des réflecteurs rencontrés.

Toutefois, bien que dans les appareillages classiques, la forme des impulsions réfléchies soit déjà affectée par les caractéristiques de l'obstacle, ce phénomène échappe malgré tout à l'examen en raison du spectre de fréquence relativement étroit des impulsions émises et de l'utilisation de circuits électroniques non adaptés.

La Société des Réalisations Ultrasoniques a donc étudié et réalisé un appareillage dénommé SAF 20 (Cf. fig. 2 pl. 7) permettant à chaque instant de faire l'analyse du champ ultrasonore recueilli, puis la synthèse des informations obtenues.

Le principe du dispositif consiste à produire des impulsions ayant un spectre de fréquence étendu à l'aide de palpeurs dont l'élément piézo-électrique est fortement amorti.

Toutefois, en raison de la forme trop complexe des impulsions engendrées par les éléments piézo-électriques classiques, l'utilisation pratique du spectre de fréquence nécessitait une mise en forme de ce dernier au moyen de circuits électroniques spéciaux permettant l'obtention d'impulsions de forme rectangulaire, donc simple, et dont les déformations pourraient être éventuellement observées sur un analyseur de spectre ou mieux enregistrées dans une perspective industrielle.

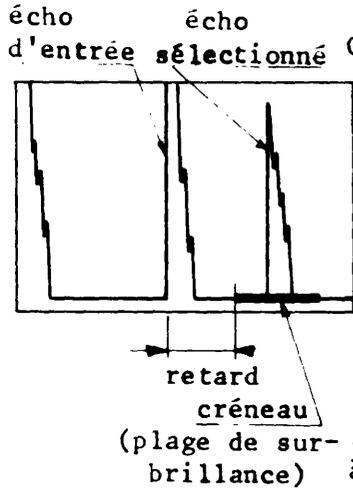


Dans ces conditions, et compte-tenu de la connaissance encore partielle de cette technique, la mise en oeuvre de l'analyse fréquentielle pour le contrôle des produits laminés paraissait alors particulièrement séduisante dans le cadre de cette étude.

En effet, toute déformation anormale du spectre était susceptible de fournir simultanément des informations globales d'une part sur la présence d'inclusions constituant de petits réflecteurs dont la détection individuelle à l'aide d'une méthode classique pouvait s'avérer mauvaise en raison de leur faible surface et de leur position superficielle dans le cas de tôles sensibles à l'arrachement lamellaire et d'autre part sur l'absorption du matériau due à la présence de ces inclusions. En outre, il n'était pas interdit de penser a priori que cette méthode permettrait d'établir une distinction entre une absorption due à une diffusion de l'énergie acoustique au niveau d'inclusions de très faibles dimensions (phénomène de diffraction) et une autre forme d'atténuation provoquée par une structure hétérogène à gros grains mais non défectueuse (phénomène d'opacité).

Comme indiqué précédemment, la mise en oeuvre de cette méthode a nécessité l'acquisition d'un élément particulier (SAF 20) qui, en raison de sa conception modulaire, a pu être incorporé au matériel de base (R7).(1)

Ce dispositif permet essentiellement de comparer à tout instant les composantes haute et basse fréquence du spectre d'émission à large bande engendré par un palpeur fortement amorti.



Ce système comporte en outre :

- un dispositif de sélection qui permet d'étudier un écho de fond de rang n obtenu après une ou plusieurs réflexions du faisceau ultrasonore dans l'épaisseur du matériau, le créneau de sélection pouvant être positionné soit manuellement, soit automatiquement. Dans ce dernier cas, lors d'un contrôle en immersion, il sera asservi en position à l'écho d'entrée et aura par conséquent un retard fixe par rapport à celui-ci (fig. ci-contre).

- un circuit de mesure proprement dit comportant deux galvanomètres :

l'un à zéro central (Cf. fig. 2 pl. n° 7), équilibré initialement à l'aide d'un potentiomètre (la dynamique du circuit d'équilibrage est supérieure à 20 décibels) sur un obstacle de référence (face opposée d'une tôle saine par exemple) affiche en permanence la valeur instantanée du rapport HF/BF, exprimé en décibels, des amplitudes des composantes haute et basse fréquence du spectre, conventionnellement égales dans ce dispositif à 7 MHz et 2 MHz. Une tension proportionnelle à ce rapport peut être prélevée afin d'en permettre l'enregistrement en coordonnées X-Y, la totalité de l'échelle de mesure aux fréquences considérées correspondant à un rapport d'amplitudes de 10 décibels.

Il est à remarquer cependant que la dynamique de la mesure qui dépend de la fréquence sélectionnée peut être très importante.

l'autre indique soit l'amplitude maximale exprimée en décibels de l'écho sélectionné dans le cas d'un fonctionnement en gain non régulé, soit la valeur de la tension de régulation de l'amplitude de cet écho lors d'un asservissement automatique du gain, l'appareil comportant son propre amplificateur dont la bande passante est de 20 MHz à - 4 décibels et la dynamique de régulation de 25 décibels. Dans ce dernier cas, le dispositif éliminant en particulier les erreurs dues aux pertes d'énergie intervenant lors de chaque réflexion, doit en principe permettre des mesures d'absorption beaucoup plus précises, que lors des deux premières solutions envisagées.

Ce dispositif d'analyse fréquentielle comporte en plus des fonctions déjà mentionnées, un circuit d'atténuation dont la dynamique est de 30 décibels et dont le réglage à l'aide d'un potentiomètre permet d'éviter le cas échéant la saturation des étages d'entrée.

La constante de temps de l'ensemble des circuits est comme pour la solution précédente très brève, de l'ordre de 1 période de la cadence répétition des impulsions.

En outre, et comme pour les solutions a et b, l'enregistrement graphique des résultats sur une table traçante X-Y nécessitera l'adjonction au matériel

./.

(1) Cette acquisition a été décidée suite à des essais encourageants effectués avec un système analyseur de fréquence (cf. §1312)

de base d'un module sélecteur S1 qui, fonctionnant lors de la disparition de l'écho sélectionné, assurera la délimitation du contour du produit examiné. La description de cet élément sera faite dans le § suivant.

1.2. Description du matériel de base sélectionné pour l'examen des tôles.

En raison d'une part de la quantité de tôles à examiner (Cf. tableaux n° 1 et 3) et d'autre part, des inconvénients inhérents à une méthode de contrôle manuelle (variations permanentes de la sensibilité d'examen liées aux irrégularités du couplage lors d'un contact direct entre le palpeur et la pièce), le choix du matériel de contrôle a été orienté, a priori, vers un dispositif d'inspection automatique.

Les caractéristiques essentielles du matériel acquis dans cet esprit sont, indépendamment de l'automatisme, les possibilités étendues qu'offre l'appareil de contrôle par ultrasons proprement dit qui est de conception modulaire (adaptation possible des éléments spécifiques décrits au paragraphe précédent) et l'enregistrement simultané des résultats d'examen au moyen d'une table traçante X-Y asservie au dispositif automatique d'entraînement du palpeur.

L'ensemble de l'appareillage utilisé, et dont la description est faite ci-après apparaît sur la photographie de la planche 8 jointe en annexe.

1.2.1. Générateur d'impulsions ultrasonores

C'est un appareil Métalloradar type R7 de la Société des Réalisations Ultrasoniques présenté sous la forme de un ou plusieurs ensembles modulaires (racks) (Cf. planche n° 9) incorporés dans un meuble (baie) comportant une alimentation électrique régulée et l'interconnexion des différents dispositifs de base (tiroirs).

L'équipement utilisé au titre de cette étude comprend :

a) un module d'affichage type TC1 (Cf. figure 1 planche 10) constitué principalement par un tube cathodique permettant une présentation type A (amplitude de l'énergie réfléchie en fonction du temps), des résultats sur un écran rectangulaire gradué horizontalement et verticalement et de format 70 x 105 mm. En outre, ce module comporte un certain nombre de commandes permettant notamment le réglage :

- . de la luminosité
- . des cadrages verticaux et horizontaux
- . de l'astigmatisme
- . de la concentration.

b) un module d'Emission-Réception à fréquence et temps d'impulsions variables type ER 30 (Cf. figure 2 planche 10).

C'est un générateur de trains d'ondes sinusoïdaux dont la fréquence et la durée peuvent être réglées de façon continue afin de contrôler les caractéristiques de l'impulsion ultrasonore émise par l'élément piézo-électrique du palpeur.

Ces réglages sont assurés au moyen d'un commutateur à touches à 5 positions et d'un vernier qui permettent un réglage continu de la fréquence entre 0,8 et 14 Mhz environ, la variation de $0,2 \mu s$ à $2 \mu s$ du temps d'impulsion étant réalisée à l'aide d'une commande distincte.

Ce tiroir comporte un amplificateur dont le gain est réglable en continu de 0 à 70 décibels avec une précision de 2 décibels.

La puissance électrique à l'émission est réglée en agissant sur l'amor-
tissement du circuit de sortie au moyen d'un commutateur à 6 positions.

Enfin, ce dispositif à deux sorties permet d'effectuer des examens
soit par réflexion (1 seul palpeur) soit par transmission (2 palpeurs dis-
tincts).

c) un module générateur de signaux de synchronisation et de balayage
type Bla (Cf. figure 3 planche n° 10)

Cet élément présenté également sous la forme d'un tiroir fournit les
signaux nécessaires au balayage du tube du module d'affichage (TCI) ainsi qu'au
synchronisme des tiroirs auxiliaires éventuellement mis en oeuvre (S1, SAF20,
etc....).

Ce dispositif comporte dix gammes de distances (ou vitesses de balayage)
dont les limites extrêmes pour 1 division de l'échelle de profondeur de l'écran
de l'appareil (module TCI) correspondent respectivement à 1 mm et 1 mètre
(linéarité $\pm 1\%$).

Chaque gamme de balayage peut être pré-étalonnée soit en ondes longi-
tudinales, soit en ondes transversales à l'aide d'un inverseur (OL et OT).
En outre, si le choix de chacune des gammes est effectué au moyen d'un commu-
tateur à 10 positions, un vernier assure un réglage continu de la vitesse de
balayage et un recouvrement entre gammes discontinues consécutives.

Un circuit de retard, indépendant de la vitesse de balayage, et comman-
dé de façon discontinue (5 gammes) ou continu (de 0 à 5 mètres) à l'aide d'un
potentiomètre multitours permet de décaler dans le temps les origines respec-
tives de l'émission et du balayage horizontal. Cette caractéristique est par-
ticulièrement utile lors d'un contrôle automatique en immersion.

Enfin, la cadence de balayage (fréquence de récurrence) variable de
10 Hz à 2000 Hz est commutée en même temps que les différentes gammes de
balayage.

d) module sélecteur d'échos monocanal type S1

Ce tiroir (dit d'apparition) permet de sélectionner et de mesurer l'am-
plitude de crête des échos apparaissant dans un intervalle de temps donné
et matérialisé sur le balayage horizontal de l'écran du tube cathodique (module
TCI) par une plage de surbrillance (créneau) dont la largeur exprimée en dis-
tance parcourue dans l'acier doux par le type d'onde utilisé varie de 1 à 500mm.

La position de cette plage peut, à l'aide d'un inverseur, être réglée
par rapport à deux origines différentes :

. soit par rapport à l'impulsion d'émission lors d'un contrôle effectué
par contact direct du palpeur sur la pièce (Dans ce cas la position du
créneau de sélection peut être réglée de façon continue ou discontinue
entre 5 et 5000 mm, ces valeurs correspondant à des distances dans l'a-
cier doux lors d'un examen en ondes longitudinales).

. soit par rapport à un écho de référence distinct de l'émission et pouvant être, notamment dans le cas d'un contrôle en immersion, la courbe de réponse obtenue à l'interface eau-métal. (Ce mode de fonctionnement autorise un positionnement variable du créneau de sélection de 1 à 100 mm lors d'un contrôle par ondes longitudinales dans l'acier ordinaire). La zone sélectionnée se trouve alors asservie dans ce dernier cas à la position de cet écho et les variations de distances entre le palpeur et la pièce n'ont pas d'influence sur le réglage initial.

Le signal de mesure est délivré sous forme analogique, la tension de sortie étant variable de 0 à 5 volts. Deux circuits indépendants peuvent filtrer ce signal en agissant sur les temps de montée et de descente des courbes de réponse obtenues sur l'oscillogramme. En l'absence de filtration le temps de réponse est égal à la période séparant deux impulsions consécutives à l'émission.

La sensibilité maximale au niveau du signal de mesure est de 0,8 volt ce qui correspond à un écho dont l'amplitude verticale est de 1 cm sur l'écran de l'appareil. En outre, il est nécessaire d'associer chaque tiroir sélecteur S1 à un amplificateur de puissance lors d'un enregistrement par brûlage du signal de mesure.

e) modules complémentaires

A l'équipement de base précédemment décrit peuvent être incorporés, selon la méthode d'examen utilisée, l'un des tiroirs modulaires suivants :

. un second tiroir sélecteur S1 (dit de "disparition") avec ou sans amplificateur de puissance (selon le mode d'enregistrement utilisé) fonctionnant lors de la disparition des échos de fond dans le produit contrôlé et permettant ainsi une délimitation précise du contour extérieur de ce dernier. Ce matériel est utilisé lors de la recherche des défauts de compacité internes (inclusions notamment) par mesure de l'énergie réfléchie par ceux-ci (méthode conventionnelle décrite au § 1.1.1. du présent rapport).

. un tiroir sélecteur SAF 20 qui est substitué au tiroir sélecteur S1 dit "d'apparition" lors de la recherche des anomalies internes et de la détermination de l'absorption de l'énergie acoustique dans le matériau selon la méthode d'analyse fréquentielle. Ce matériel a fait l'objet d'une description détaillée au § 1.1.2. précédent (solution c).

1.2.2. Palpeurs

Les caractéristiques des palpeurs utilisés lors de l'étude sont consignées dans le tableau n° 5 annexé.

1.2.3. Dispositif de contrôle automatique en immersion (type CE 1)

Conçu et réalisé par les soins de la Société des Réalisations Ultrasoniques, ce matériel comprend deux parties indépendantes :

- un dispositif d'entraînement mécanique du palpeur,
- une cuve contenant une solution eau-huile soluble dans laquelle sont disposées les pièces à contrôler.

1.2.3.1. Dispositif d'entraînement mécanique du palpeur. (Cf. pl. n° 8)

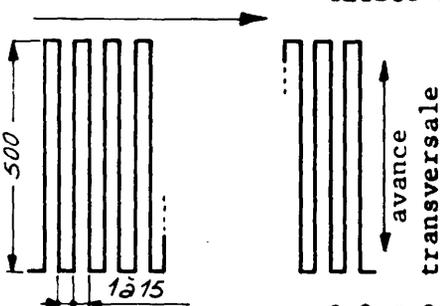
Ce dernier est fixé à l'extrémité d'une potence (porte-palpeur) dont la course verticale utile de 300 mm permet d'ajuster la distance palpeur-pièce à la valeur requise (cas des palpeurs focalisants)

En outre, deux verniers permettent un réglage angulaire précis de l'axe du faisceau ultrasonore dans le plan horizontal d'une part (de 0° à 360°) et dans le plan vertical d'autre part (de 0° à 180°) afin d'obtenir une transmission optimale de l'énergie acoustique dans une pièce.

Le porte-palpeur se déplace sur un chariot transversal équipé d'un jeu de glissières à billes avec une course utile de 500 mm et une vitesse fixe de 250 mm à la seconde.

Un chariot longitudinal dont la course utile est de 1500 mm environ supporte l'ensemble précédent. Son avance discontinue avec un pas réglable de 0,5 à 15 mm est commandée à chaque fin de course du chariot transversal. Deux moteurs, deux coupleurs électromagnétiques, un variateur et une courroie crantée assurent l'entraînement de ce chariot qui se déplace au moyen de galets sur un bâti dont l'horizontalité est obtenue par l'intermédiaire de pieds à vis.

avance longitudinale



L'ensemble ainsi défini permet au palpeur d'effectuer dans le plan horizontal, un balayage conforme à la courbe représentée à la figure ci-contre. Le réglage du pas de l'avance longitudinale assure selon le diamètre du palpeur utilisé et son type (focalisant ou non focalisant) un contrôle de la totalité de la surface d'un produit dans les limites toutefois des courses utiles longitudinales et transversales des chariots

1.2.3.2. Cuve

Réalisée en acier inoxydable et indépendante du bâti mécanique, elle a les dimensions suivantes :

- longueur : 1500 mm
- largeur : 500 mm
- hauteur : 400 mm.

Ces caractéristiques dimensionnelles associées aux courses utiles des chariots permettent l'inspection totale d'une tôle dont les dimensions hors-tout sont de 1400 x 480 mm. En outre, un sommier métallique réalisé par nos soins à l'aide de profilés en U soudés et destiné à supporter les tôles à examiner repose sur le fond de la cuve par l'intermédiaire de 3 vis de manoeuvre qui permettent d'assurer un parallélisme rigoureux entre la surface de la tôle et le plan dans lequel se déplace le palpeur.

1.2.4. Dispositif d'enregistrement

C'est un enregistreur type "X-Y Recorder 7004 B" de la Société HEWLETT-PACKARD.

Présenté sous la forme d'une table traçante à modules enfichables, cet enregistreur a été rendu électriquement solidaire du dispositif d'entraînement mécanique du palpeur.

Cette liaison permet au stylet-enregistreur de la table traçante et au palpeur de décrire des trajectoires homothétiques et d'obtenir ainsi une correspondance satisfaisante entre les échelles et par conséquent un repérage précis des anomalies observées.

Les caractéristiques essentielles de cet appareil sont indiquées ci-après :

L'enregistreur est composé d'un châssis principal comprenant une table traçante proprement dite au format 250 mm (Y) x 380 mm (X), les commandes de mise en route de l'appareil et deux modules de base identiques permettant l'un suivant l'axe des X, l'autre suivant l'axe des Y, l'ajustement des zéro et le réglage fin des sensibilités d'enregistrement.

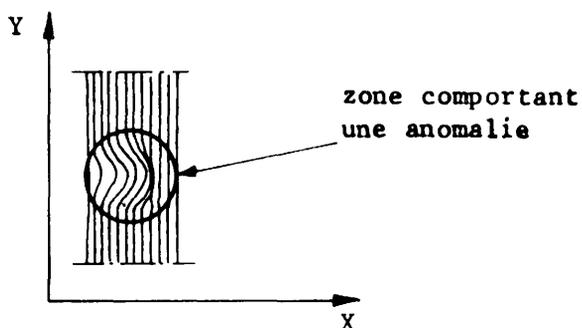
En outre, chaque axe comporte deux modules d'entrée supplémentaires :

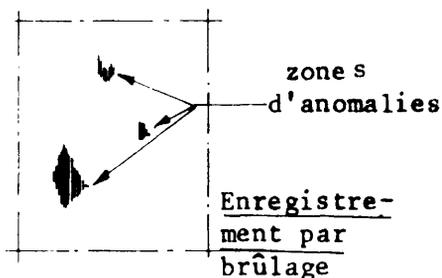
- l'un référencé 17.171 A est un préamplificateur à courant continu qui permet un réglage discontinu de la sensibilité d'enregistrement à l'aide d'un commutateur à 14 positions étalonnées de 0,25 mV/cm à 5mV/cm.

- l'autre référencé 17.174 B fournit une tension continue de compensation qui permet un décalage du zéro et un enregistrement à pleine échelle d'un signal superposé à une tension continue permanente, positive ou négative dans les limites ± 1 Volt.

Enfin, cet appareil permet un enregistrement type C des informations issues des tiroirs sélecteurs S1 (d'apparition) ou SAF 20 incorporés au générateur d'ondes ultrasonores type R7, selon deux modes d'inscription :

- soit par stylet encreur, la tension analogique délivrée par le tiroir sélecteur considéré étant appliquée au module d'entrée de l'axe X de l'enregistreur (Cf. figure ci-dessous).





- soit par brûlage d'un papier métallisé, la tension de sortie du tiroir sélecteur utilisé (S1 ou SAF 20) étant appliquée après amplification (rôle des amplificateurs de puissance mentionnés au § 1.2.1.d) entre la table traçante et l'électrode mobile de l'enregistreur (Cf. figure ci-contre).

1.3. Matériels complémentaires divers utilisés lors de l'étude.

Ce matériel a été utilisé à titre de complément à différents stades de l'étude et notamment :

- lors d'examen préliminaires effectués manuellement, soit sur certaines tôles faisant l'objet d'une commande spéciale (tôles dite "neuves"), soit systématiquement sur les portions de tôles issues de constructions affectées par le phénomène d'arrachement lamellaire.

- lors d'essais dits de comparaison effectués manuellement et localement au droit de certaines zones douteuses ou défectueuses décelées au cours de l'inspection automatique.

Le détail du matériel mis en oeuvre à cet effet, ainsi que l'objet de son utilisation sont indiqués ci-après :

1.3.1. Générateurs d'ondes ultrasonores

Deux appareils réalisés par la Société KRAUTKRAMER, l'un de type USM2 et l'autre de type USIP 11 (ce dernier appareil dont les performances et possibilités d'examen sont supérieures à celles de l'USM2 ayant été acquis au cours de l'étude) ont été successivement utilisés (Cf. figure 1A et 2A planche 11).

Il s'agit de générateurs dont la conception générale est identique et qui présentent un type d'émission dit par "oscillations amorties" quelque peu différent de celui du module émetteur ER 30 de l'appareil R7 décrit précédemment (Cf. § 1.2.1. b).

Il convient en effet de noter que la durée totale de l'émission (ou temps d'impulsion) est l'un des facteurs qui indépendamment du palpeur conditionne non seulement la puissance émise mais aussi le pouvoir de résolution notamment au voisinage de la surface d'une pièce.

Cette caractéristique pouvant être considérée comme l'une des plus importantes dans le cadre de la présente étude (détection des inclusions situées à proximité de la peau des tôles), il paraissait opportun de comparer en ce domaine les possibilités de deux circuits d'émission de principes différents.

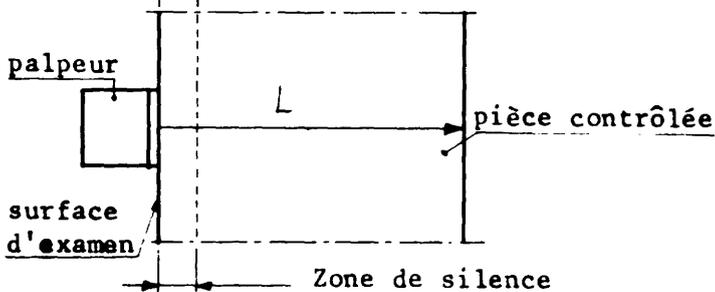
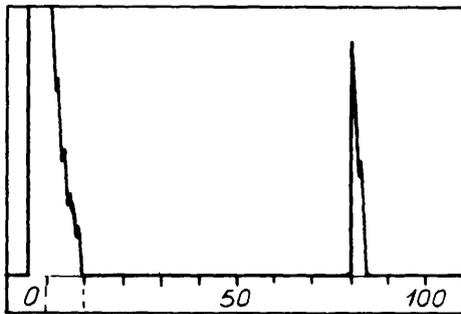
1.3.1.1. Emission par oscillations amorties

Ce type d'émission propre aux appareils USM2 et USIP 11 est généralement obtenu par décharge d'un condensateur dans un bobinage (circuit RLC) contenu soit dans l'appareil lui-même, soit dans le palpeur.

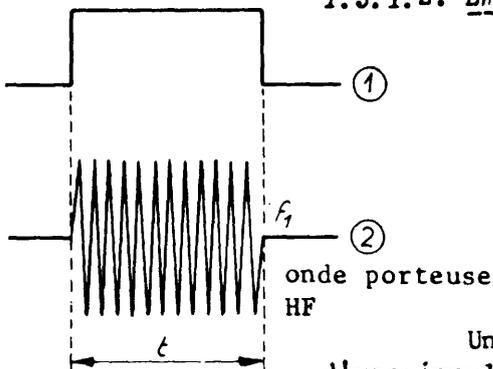
L'amortissement des oscillations peut en général être réglé (Cf. figures 1B et 2B de la planche n° 11) et, à la limite, celles-ci ne comportent sur certains appareillages qu'une demi-alternance. (Cf. figures 1A, 2A, 3A de la planche 12).

Il en résulte que lors d'un contrôle effectué manuellement par contact direct du palpeur sur la pièce (cf. figure ci-dessous), la zone de silence, qui est égale à la largeur de l'émission comptée

à partir de l'origine "o" de l'échelle horizontale (base de temps) de l'écran du tube cathodique, sera avec ce type d'émission la plus réduite possible. Il deviendra alors théoriquement possible de détecter des défauts situés très près de la surface d'examen de la pièce.



1.3.1.2. Emission par trains d'oscillations entretenues (module ER 30)



Dans ce cas l'émission à la forme d'une sinusoïde modulée (2) (Cf. figure ci-contre) par tout ou rien à l'aide d'une impulsion (1). Le temps d'impulsion t est réglable dans le dispositif considéré de 0,2 à 2 μ s. La fréquence f , de l'onde porteuse peut être réglée de façon continue et identifiée à la fréquence réelle du palpeur utilisé.

Un tel circuit d'émission conduit en général à l'obtention d'une impulsion dont la largeur est supérieure à celle qui est produite par des oscillations amorties. Il en résulte une zone de silence accrue et par conséquent une moins bonne détection des défauts situés dans le voisinage immédiat de la surface d'examen du matériau (Cf. fig. 1A, 2A, pl. n° 13).

Toutefois, on peut admettre qu'un tel circuit se comporte à la limite (pour un réglage minimal du temps d'impulsion de l'ordre de 2 μ s) comme le précédent.

N.B. Un analyseur de spectre Hewlett Packard, ainsi qu'un amplificateur logarithmique type ER 100 mis brièvement à la disposition du laboratoire ont été expérimentés succinctement lors de cette étude (Cf. pl. n° 7)

1.3.2. Palpeurs

Un certain nombre de palpeurs émetteurs-récepteurs d'ondes ultrasonores ont été utilisés. Les fréquences, dimensions et natures des éléments piézo-électriques, ainsi que la nature des ondes mises en jeu sont consignées dans le tableau n° 6 annexé.

Deux types d'ondes ont été mis en oeuvre pour les raisons suivantes :

- ondes longitudinales : couramment utilisées pour l'examen des produits laminés en raison d'une part de l'orientation relative de l'axe du faisceau et du plan de réflexion des défauts recherchés et d'autre part de leur propagation satisfaisante dans les milieux de couplage liquides (eau, huile....)

- ondes transversales : ne sont en général pas utilisées pour le contrôle des tôles car ce type d'ondes ne se propage pas dans les milieux de couplage liquides.

Toutefois, leur transmission dans les matériaux métalliques est possible soit en exploitant le phénomène de double réfraction (palpeur MWB 70) soit en utilisant une pâte de couplage à base de particules métalliques (pâte ZGY de KRAUTKRAMER) (palpeur MB4Y). Malgré ces difficultés, il a paru cependant intéressant d'observer à titre expérimental les résultats obtenus à l'aide de ces ondes qui ont la propriété de solliciter les grains du matériau parallèlement à la plus grande dimension des hétérogénéités internes (inclusions).

En outre, leur plus faible vitesse de propagation devrait en principe permettre une meilleure détection des petits défauts.

1.3.3. Milieux de couplage

Une huile minérale légère a été utilisée dans tous les cas lors des contrôles complémentaires manuels à l'exception des examens effectués à l'aide du palpeur MB4Y (ondes transversales) pour lesquelles la pâte ZGY mentionnée au paragraphe précédent a été employée.

2 - EXAMEN PAR AIMANTATION -

2.1. Méthode d'examen :

Les éprouvettes soumises à cet essai ont été disposées dans l'entrefer d'un électro-aimant et aimantées à l'aide du champ magnétique créé par ce dernier (aimantation longitudinale).

2.2. Matériel utilisé :

2.2.1. : Un électro-aimant à 3 branches comportant 3 bobines de 96 spires chacune montées en série et alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'une génératrice dont l'intensité peut être réglée de 80 à 260 ampères.

2.2.2. : La liqueur détectrice contient une poudre ferromagnétique constituée par de l'oxyde de fer Fe₂O₃ de couleur noire, dont la granulométrie varie de 3 à 11 microns et qui est en suspension dans du kérosène. (Ce liquide est commercialisé sous le nom de Fluxo n° 3 par la S.R.E.M.).

2.2.3. : Un témoin d'aimantation conforme au modèle défini par la norme française NF A 04-101 a été utilisé afin de contrôler la sensibilité des essais.

2.2.4. : Enfin une peinture cellulosique blanche diluée dans l'acétone a été étendue en une fine couche par pulvérisation sur les zones examinées afin d'améliorer la visibilité des spectres magnétiques.

CHAPITRE VI

MISE EN OEUVRE DES EXAMENS NON DESTRUCTIFS ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS (1)

Les conditions d'examens ainsi que les résultats obtenus qui sont consignés au présent chapitre ne concernent que les méthodes d'examen :

- par ultrasons
- par aimantation.

Toutefois, et comme il a déjà été précisé au chapitre précédent, les ultrasons constituent en raison de leurs propriétés physiques un excellent moyen de détection des défauts de compacité dans les matériaux métalliques et notamment dans les produits laminés. C'est pour cette raison que les différentes techniques d'examen relatives à ce procédé constituent la partie essentielle de ce chapitre.

1 - EXAMEN PAR ULTRASONS -

Ces examens ont été effectués successivement selon deux techniques distinctes à savoir :

a) une méthode dite conventionnelle dans laquelle est mesurée l'énergie réfléchie par le défaut considéré

b) une méthode originale dite d'analyse fréquentielle dans laquelle on considère le rapport HF/BF des composantes haute et basse fréquence du spectre à large bande réfléchi par la paroi opposée de la tôle.

1.1. Examens effectués selon la méthode conventionnelle

Ces examens ont été effectués par réflexions d'impulsions d'ondes longitudinales ou transversales dans le matériau des tôles.

1.1.1. Examens dits de référence

Réalisés au moyen de faisceaux d'ondes longitudinales non focalisés puis focalisés et de l'installation automatique décrite au § 1.2. du chapitre V, ces examens exploitent une technique couramment utilisée pour l'inspection des produits laminés. C'est pour cette raison que leurs résultats constitueront une base de référence lors des comparaisons ultérieures destinées à apprécier la sensibilité relative des différentes méthodes de contrôle par ultrasons mises en oeuvre.

En outre, ces examens dits de référence ont été effectués sur l'ensemble des tôles disponibles pour cette étude (tôles spécialement approvisionnées dites "neuves" et tôles issues de constructions endommagées par arrachement lamellaire).

./.

(1) Le chapitre VIII contient le dernier volet chronologique de la partie de l'étude relative à la mise en oeuvre des essais non destructifs.

1.1.1.1. Essais préliminaires

Destinés principalement à la détermination des paramètres d'exams suivants :

- réglage de la puissance et de l'amplification du générateur d'impulsions HF, type R7
- choix du type de palpeur le mieux adapté (diamètre, fréquence et éventuellement faisceau focalisé ou non) à l'épaisseur du produit à contrôler
- choix de la distance h_e dans le milieu de couplage (eau + huile soluble) entre l'élément piézo-électrique du palpeur et la surface la plus voisine de la tôle
- choix du mode d'enregistrement : par brûlage ou par inscription proportionnelle à encre
- réglage de la valeur du signal analogique à la sortie du tiroir sélecteur S, dit d'apparition ($U = f(h_e, \text{diamètre du réflecteur})$).

La recherche des conditions optimales d'examen a donc nécessité la réalisation d'un certain nombre de blocs d'étalonnage.

1 - Définition des blocs d'étalonnage

Trois tôles dites "neuves" d'épaisseurs respectivement égales à 15 - 40 et 80 mm ont donné lieu, après un examen manuel par ultrasons destiné à s'assurer de l'absence de défauts éventuels, au prélèvement de 3 blocs d'étalonnage repérés B1, B2 et B3 et dont les caractéristiques dimensionnelles sont consignées sur les schémas de la planche n° 14 annexée.

Afin de permettre un étalonnage optimal de la sensibilité d'examen et l'obtention d'un pouvoir de résolution satisfaisant de l'appareil permettant la détection des défauts situés à proximité de chacune des faces des tôles, les dispositions suivantes ont été adoptées :

Dans chaque bloc, deux séries de trous à fonds plats, de diamètres échelonnés ont été réalisées.

Les trous de chaque série ont une profondeur à peu près constante qui a été choisie de telle sorte que les réflecteurs circulaires plans que constituent les fonds de chacun d'eux soient situés à environ 5 mm de la face de perçage (1ère série) et à 5 mm environ de la face opposée (2ème série). Une exception toutefois concerne l'une des séries du bloc de 80 mm d'épaisseur dont la profondeur n'excède pas 72 mm en raison de difficultés d'usinage.

Il est à noter que le bloc B2 ($e = 40$ mm) comporte à l'une de ses extrémités un appendice de même épaisseur rapporté par soudage et affecté par un défaut du type doublage de faible surface ($s < 100$ mm²).

2 - Mise en oeuvre des examens préliminaires

A : Enregistrement par brûlage

A1 : Etude de l'influence du palpeur

α) Palpeurs à faisceaux non focalisés

L'ensemble des cinq palpeurs émetteurs-récepteurs d'ondes longitudinales immergeables dont nous disposons pour l'étude (Cf. tableau n° 5 du chapitre V) a donné lieu à une expérimentation au moyen des trois blocs d'étalonnage précités.

A l'issue de ces essais il était observé que seuls les trois palpeurs ci-après présentaient une sensibilité de détection admissible permettant leur utilisation lors des essais préliminaires :

- 1) palpeur n° 110, $f = 3$ MHz, $D = 15$ mm
- 2) palpeur n° 113, $f = 5$ MHz, $D = 10$ mm
- 3) palpeur n° 118, $f = 10$ MHz, $D = 10$ mm,

f = fréquence nominale du palpeur

D = diamètre de l'élément piézo-électrique.

Les enregistrements obtenus sur chacun des blocs d'étalonnage à l'aide des trois palpeurs sélectionnés et pour un réglage optimal de la sensibilité d'examen (Cf. § A2) figurent sur les planches n° 15 - 17 et 19 annexées).

β) Palpeurs à faisceaux focalisés

Les trois palpeurs émetteurs-récepteurs à faisceaux d'ondes longitudinales focalisés qui sont consignés au tableau n° 5 du chapitre précédent ont, au cours d'expérimentations analogues, donné lieu à des résultats très décevants pour deux d'entre eux.

Finalement, c'est le palpeur n° 49, référence 484 A/EL dont la fréquence est de 5 MHz et dont l'élément piézo-électrique a un diamètre de 10 mm et un rayon de courbure de 50 mm qui a été retenu pour les essais ultérieurs notamment sur les tôles de faible ou moyenne épaisseurs ($e = 15$ à 40 mm).

Sur la planche n° 21 sont consignés pour un réglage optimal de la sensibilité d'examen les enregistrements obtenus à l'aide du palpeur sélectionné sur les 3 blocs étalons.

A2 : Etude de l'influence de la distance h_e entre le palpeur et la surface la plus voisine de la tôle (hauteur de la colonne d'eau de couplage)

α) Palpeurs à faisceaux non focalisés

Ces essais ont été réalisés au moyen des trois palpeurs sélectionnés à l'issue des expérimentations initiales (Cf. § A1α) dont les

caractéristiques essentielles et notamment la longueur théorique de la zone de Fresnel dans l'eau relative à chacun d'eux sont rappelées au tableau n° 7 ci-après :

TABLEAU N° 7

N° palpeur	Fréquence (MHz)	Diamètre D de l'élément P.E. (mm)	Longueur lo de la zone de Fresnel dans l'eau (1) (en mm)
110	3	15	114,0
113	5	10	84,5
118	10	10	169,0

nota 1 : La longueur de la zone de Fresnel est calculée à partir de l'expression :

$$l_0 = \frac{D^2}{4\lambda}$$

où : D : diamètre de l'élément piézo-électrique (en mm)

λ : longueur d'onde de la vibration dans le milieu considéré (eau) qui a pour expression :

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

où V : vitesse des ondes longitudinales dans l'eau soit 1480 mètres par seconde environ

f : fréquence nominale du palpeur.

Compte tenu de ces éléments, les essais entrepris ont consisté à étudier à l'aide des 3 palpeurs sélectionnés, la variation de l'amplitude maximale de l'écho de réflexion (ou la variation de la valeur du signal de sortie du tiroir sélecteur S1 exprimée en volts) obtenues sur chacun des trous des 3 blocs d'étalonnage pour les valeurs de la distance h_e consignées au tableau n° 8 annexé.

Les réglages de la sensibilité d'examen (puissance et amplification) qui ont été adoptés sont consignés sur le tableau n° 9 annexé.

Ils correspondent aux conditions de détection les meilleurs qu'il ait été possible d'obtenir, pour chaque palpeur, au moyen du matériel utilisé sur les trous à fond plats situés au voisinage de la face postérieure des trois blocs et auxquelles correspondent les enregistrements des planches n° 9 - 11 et 13 annexées.

Il convient de noter en outre que la valeur minimale du signal de sortie permettant un enregistrement est de 2,5 V environ.

Les résultats obtenus sont représentés par les courbes $h(du)$ ou $U(\text{volt}) = f(h_e \text{ mm})$ des planches n° 23 à 25 annexées.

Remarque : L'amplitude des échos de réflexion est exprimée en divisions verticales de l'écran de l'appareil.

L'allure générale des familles de courbes ainsi obtenues permet les constatations suivantes :

Bloc B1 : (Cf. planche n° 23)

- Pour les réglages de la puissance et de l'amplification consignés au tableau n° 9, la sensibilité de détection maximale est obtenue respectivement aux distances h_e égales à 20 mm (palpeur de 5 MHz), 30 mm (palpeur de 10 MHz), et supérieures à 40 mm (palpeur de 3 MHz).

- On constate que pour chaque diamètre de trou et quelle que soit la distance h_e , la sensibilité de détection est maximale avec le palpeur de 5 MHz et minimale avec le palpeur de 3 MHz, la sensibilité du palpeur de 10 MHz n'étant que légèrement inférieure à celle de 5 MHz. Une exception toutefois est observée pour le trou de 4 mm de diamètre pour lequel on constate une inversion de la sensibilité de détection des palpeurs $f = 5$ et 10 MHz à partir de la distance h_e de 45 mm environ.

- Enfin, contrairement à ce qui pouvait être envisagé initialement, la sensibilité de détection du palpeur de 5 MHz décroît de façon monotone dans la zone de Fresnel puis au delà.

Bloc B2 (Cf. planche n° 24)

- On constate ~~comme~~ précédemment (Bloc B1) que la sensibilité de détection du palpeur de 5 MHz est systématiquement supérieure à celle des deux autres palpeurs étudiés avec dans l'ordre des sensibilités décroissantes :

- 1) Palpeur $f = 5$ MHz
- 2) Palpeur $f = 3$ MHz
- 3) Palpeur $f = 10$ MHz.

- La sensibilité de détection du palpeur de 10 MHz est, contrairement à ce qui était observé sur les courbes obtenues à l'aide du bloc B1, inférieure à celle du palpeur de 3 MHz. Cette constatation est en accord avec la loi de l'absorption de l'énergie acoustique dans les matériaux (de la forme $A_x = A_0 e^{-kx}$) en raison de l'épaisseur plus importante du bloc B2 et de la valeur déjà élevée de la fréquence ($f = 10$ MHz) le coefficient d'absorption k étant proportionnel au carré de cette dernière.

- Enfin, on observe pour les 3 palpeurs considérés une décroissance monotone de la sensibilité de détection lorsque la distance h_e augmente.

Bloc B3 : (Cf. planche n°25)

- Les remarques formulées lors des essais effectués à partir du bloc B2 peuvent être reprises ici intégralement.

De ces essais, il résulte que le choix de valeurs de h_e supérieure à la longueur de la zone de Fresnel pour chaque palpeur considéré ne présente aucun intérêt pratique et conduit à une perte de sensibilité de détection. En conséquence, et compte-tenu de l'allure générale des courbes obtenues, les valeurs suivantes de h_e ont été adoptées pour la suite des expérimentations :

- tôles d'épaisseur 15 mm : $h_e = 20$ mm
- tôles d'épaisseur 40 mm : $h_e = 30$ mm
- tôles d'épaisseur 80 mm : $h_e = 40$ mm.

β) Palpeur à faisceau focalisé

Le palpeur utilisé (Cf. § 1.1.1.1-2-A1-β) a pour caractéristiques :

- diamètre de l'élément piézo-électrique (P.E.) = 10 mm
- fréquence nominale = 5 MHz
- rayon de courbure de l'élément P.E. = 50 mm.

La détermination expérimentale de la distance focale dans l'eau a été effectuée à partir de l'enregistrement graphique du champ acoustique longitudinal obtenu par réflexion du faisceau sur une cible circulaire plane de 1 mm de diamètre déplacée dans le plan médian de ce dernier. (Cf. planche n° 26 en annexe). Cet enregistrement ainsi que l'allure des coupes transversales du faisceau obtenus par le même procédé à des distances comprises entre 5 et 90 mm du palpeur permettent de déterminer les paramètres recherchés :

- distance focale : environ 40 mm
- diamètre du faisceau au foyer : environ 4 mm.

Compte-tenu de ces éléments, il a été procédé à un certain nombre d'essais où la variation du signal de sortie en fonction de la distance h_e a été étudiée ($U = f(h_e)$) (Cf. planche n° 27).

La sensibilité de détection optimale (Cf. planche n° 21 et tableau n°10 annexé) a été obtenue sur les différents blocs (B1, B2 et B3) et compte-tenu de l'allure des courbes de la planche n° 21) pour les valeurs de h_e suivantes :

- Bloc B1 ($e = 15$ mm) : $h_e = 15$ mm
- Bloc B2 ($e = 40$ mm) : $h_e = 15$ mm
- Bloc B3 ($e = 80$ mm) : $h_e = 22$ mm.

Ces différentes valeurs de h_e permettent de calculer la position théorique du point de focalisation dans l'acier à partir de l'expression :

$$d_2 = (f_0 - d_1) \times \frac{V_1}{V_2}$$

dans laquelle :

d_2 : distance du foyer par rapport à la face d'entrée du faisceau dans la tôle

f_0 : distance focale

d_1 : distance palpeur-tôle (h_e)

V_1 : vitesse des ondes longitudinales dans l'eau (1490 m/s)

V_2 : vitesse des ondes longitudinales dans l'acier (5850 m/s).

Le calcul donne les valeurs suivantes :

- $d_2 = 6,25$ mm pour $h_e = 15$ mm

- $d_2 = 4,50$ mm pour $h_e = 22$ mm.

Comme ces résultats permettaient de l'espérer, la comparaison des planches n° 17 et 21 montre que le faisceau focalisé permet la détection des trous du Bloc B1 situés au voisinage de la surface opposée à partir d'un diamètre égal à 2 mm et de 3 mm pour les trous situés à proximité de la face d'entrée du faisceau.

Par contre, les résultats obtenus à l'aide de ce palpeur sur les blocs B2 et B3 sont nettement moins satisfaisants, ce dernier ne permettant que la détection des trous de plus gros diamètres.

B : Enregistrement proportionnel (à encre)

Les paramètres d'examen déterminés précédemment lors des essais effectués par brûlage à l'aide des palpeurs à faisceaux non focalisés et focalisés ont été reconduits pour ce mode d'enregistrement (Cf. tableaux n° 9 et 10). Il s'agit des réglages ou étalonnages :

- de la puissance de l'amplification de l'appareil,

- de la tension de sortie (signal analogique) correspondant aux courbes de réponse obtenues sur les plus petits trous décelables par brûlage,

- des distances palpeurs-tôles h_e respectivement égales à :

$h_e = 20$ mm (Bloc B1)

$h_e = 30$ mm (Bloc B2)

$h_e = 40$ mm (Bloc B3).

Les résultats obtenus permettent les constatations suivantes.

α) Palpeurs à faisceau non focalisés ($f = 3 - 5$ et 10 MHz)
(Cf. planches n° 16 - 18 et 20 annexées).

Pour l'ensemble des palpeurs considérés, la comparaison des planches n°15 et 16 ($f = 3$ MHz), n° 17 et 18 ($f = 5$ MHz) et n° 19 et 20 ($f = 10$ MHz) permet de noter que l'enregistrement proportionnel offre une plus grande sensibilité.

Cet avantage se traduit par la détection de trous dont le diamètre est inférieur de 1 à 2 mm à celui des plus petits trous décelables par brûlage.

Toutefois, en raison notamment de l'inertie de l'équipage mobile de l'enregistreur (et éventuellement de la divergence des faisceaux) on constate une déformation beaucoup plus importante de l'image des défauts que lors d'un enregistrement par brûlage.

β) Palpeur à faisceau focalisé ($f = 5$ MHz) (Cf. planche n° 22) annexée)

Comme il avait été constaté pour les palpeurs à faisceaux non focalisés, la comparaison des planches n° 21 et 22 montre que pour des conditions d'examen identiques, la plus grande sensibilité de détection est obtenue à l'aide de l'enregistrement proportionnel.

En outre, les déformations caractéristiques des images des trous à fond plat de chaque bloc qui étaient observées lors de l'utilisation des faisceaux non focalisés sont ici nettement atténuées.

3 - Discussion des résultats obtenus, choix des paramètres d'examen

1) Mode d'enregistrement

La méthode par brûlage, bien que légèrement moins sensible que l'enregistrement proportionnel, a été retenue pour l'examen systématique des produits. Ce choix résulte de la précision des enregistrements obtenus sur les blocs d'étalonnage à l'aide des deux méthodes.

En effet, les images de deux défauts voisins mais distincts peuvent lors d'un enregistrement proportionnel effectué notamment à l'aide de faisceaux non focalisés, être confondues ou superposées en raison des déformations de celles-ci. Cette affirmation se trouve confirmée par les résultats obtenus au cours de l'examen des tôles dites "neuves" de 80 mm d'épaisseur et dont l'enregistrement relatif à la tôle repérée 34 II (Cf. planches n° 44 et 46 annexées).

2) Palpeurs

C'est le palpeur de 5 MHz à faisceau non focalisé qui a été choisi en raison de sa bonne sensibilité sur la gamme d'épaisseur considérée (15 à 80 mm), pour l'examen systématique des tôles.

Toutefois, le palpeur de 5 MHz à faisceau focalisé dont la sensibilité est légèrement supérieure au précédent pour les faibles épaisseurs a été mis en oeuvre à titre comparatif sur 16 tôles de 15 mm.

3) Distances palpeur-tôle h_e

Les essais préliminaires ayant montré d'une part que l'augmentation de h_e s'accompagne d'une diminution régulière de la valeur du signal de sortie (U) ou de l'amplitude de l'écho de réflexion correspondant obtenu sur un réflecteur artificiel donné et d'autre part que l'influence de la zone de Fresnel pouvait être négligée, il convenait donc d'adopter des distances palpeur-tôle relativement faibles.

Les valeurs sélectionnées ont donc été les suivantes :

- tôles d'épaisseurs 15 à 30 mm : $h_e = 20$ mm
- tôles d'épaisseurs 40 mm : $h_e = 30$ mm
- tôles d'épaisseurs 80 à 112 mm : $h_e = 40$ mm.

4) Sensibilités d'examen

Les réglages adoptés pour l'étalonnage de la puissance, de l'amplification et l'ajustement de la tension du signal de sortie de l'appareillage (pour les conditions d'examen définies ci-dessus) figurent dans le tableau récapitulatif n° 11 annexé.

Ils correspondent à la sensibilité de détection globale maximale qu'il est possible d'obtenir à l'aide de l'appareillage (R7 et enregistreur) et des palpeurs utilisés pour cette étude.

1.1.1.2. Contrôle systématique des tôles

A été effectué à l'aide des conditions d'examen définies au paragraphe précédent.

Toutefois, l'exécution du contrôle systématique des produits (tôles dites neuves et tôles issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire) a préalablement donné lieu aux opérations suivantes :

1 - Préparation des tôles

A : Tôles dites "neuves"

Ces tôles dont les dimensions de livraison étaient de 1000x1000 mm ont été, pour leur examen automatique, découpées par oxycoupage en deux parties égales de 500 x 1000 mm (repères I et II) en raison des dimensions restreintes de la cuve d'immersion.

En outre, il a été procédé à un décalaminage soigné de chacune des faces au chalumeau oxyacétylénique.

B : Tôles défectueuses (prélevées sur des constructions endommagées par des arrachements lamellaires)

Ces échantillons de tôles dont les dimensions initiales permettaient leur insertion dans la cuve de contrôle n'ont donné lieu qu'à un décalaminage de leurs deux faces à l'aide du procédé indiqué ci-dessus.

2 - Conditions d'exécution des contrôles

Il a été procédé lors de l'examen de chaque tôle aux opérations préliminaires suivantes :

A - Mise en place de la tôle dans la cuve

Afin d'obtenir un parallélisme rigoureux ($he = \text{constante}$) entre le plan dans lequel se déplace le palpeur et chacune des faces de la tôle, celle-ci repose sur les trois ergots à extrémités sphériques d'une sommier métallique disposé au fond de la cuve.

Le réglage de l'ensemble est réalisé au moyen de 3 vis de manoeuvre solidaires du sommier qui permettent en outre d'ajuster la distance he à la valeur désirée.

B - Réglage de la sensibilité d'examen

Les étalonnages (Cf. tableau n° 11) ont été effectués ou vérifiés avant chaque examen sur le bloc B1, B2 ou B3 approprié disposé à l'une des extrémités de la tôle contrôlée.

Pour cela, l'équipage mobile supportant le palpeur a été déplacé manuellement au droit du trou de référence du bloc d'étalonnage considéré jusqu'à l'obtention d'un écho d'amplitude maximale et la tension de sortie du module sélecteur S1 dit "d'apparition" vérifiée et ajustée si besoin est à la valeur requise.

C - Réglage des paramètres d'enregistrement

C1 : Positionnement des créneaux de sélection

Le palpeur étant en position d'examen sur une partie saine de la tôle à examiner, il est alors procédé au réglage de la position et de la largeur des zones de surbrillance (créneaux) affichés sur le balayage horizontal de l'écran de l'appareil au moyen des tiroirs sélecteurs S1 dits "d'apparition" et de "disparition" (Cf. chapitre V § 1.2.1. d) comme indiqué ci-après :

- créneau dit "d'apparition": Sa largeur et sa position sont réglées de telle sorte que la zone de sélection corresponde à l'intervalle compris entre le flanc postérieur du premier écho d'entrée E1 obtenu à l'interface eau-acier et le front antérieur du premier écho de fond F1 dans la tôle. (Cf. figure 1 planche n° 28). Cette disposition permet la détection, à partir d'une certaine amplitude (3 divisions verticales), de tout écho de réflexion intermédiaire apparaissant dans ce domaine.

Toutefois, il apparaît cependant que tout défaut situé à proximité de la face d'entrée E de la tôle donnant lieu à un écho D' confondu avec l'écho d'entrée E1 ne pourra être enregistré.

Aux réglages de sensibilité utilisés, cette "zone morte" correspond à une couche superficielle dans le matériau dont l'épaisseur peut atteindre 5 mm.

L'examen complet d'une tôle nécessitera donc impérativement deux sondages successifs réalisés à partir des faces A et B, le second étant exécuté après retournement de la pièce.

- créneau dit "de disparition": (Cf. figure 2 planche 28) Doit avoir une largeur et une position telles qu'il soit centré sur le premier écho d'entrée E1 dans la tôle afin de permettre d'en déterminer le contour et le repérage ultérieur des anomalies ayant donné lieu à un enregistrement.

C2 : Echelle des enregistrements

Le réglage de la course longitudinale et transversale de l'équipage mobile de l'enregistreur X-Y a été effectué de telle sorte que les enregistrements soient réalisés à l'échelle 1/3 permettant ainsi une reproduction totale de l'image des tôles les plus grandes (500 x 1000 mm). Toutefois, la largeur de ces dernières étant légèrement supérieure à la course utile transversale du palpeur dans la cuve (480 mm environ), 4 plots amovibles ont été posés à 30 mm des bords de chaque tôle de façon à en obtenir un enregistrement permettant ultérieurement, en l'absence de l'image des rives longitudinales, un repérage rigoureux des défauts observés.

3 - Résultats obtenus

A - Tôles faisant l'objet d'une commande spéciale (tôles dites "neuves")

A1 : Examens effectués à l'aide du palpeur de 5 MHz à faisceau non focalisé

Le tableau récapitulatif n° 12 ci-après donne pour chacune des épaisseurs considérées les résultats obtenus :

TABLEAU N° 12

Epaisseurs des Tôles (mm)	Nombre total de tôles contrôlées	Résultats obtenus	
		Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut	Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones douteuses ou défectueuses
15	50	48	2
40	48	24	24
80	18	0	18

En outre, un certain nombre d'enregistrements correspondants à des tôles défectueuses sont consignés dans les planches énumérées ci-après, annexées au présent rapport. Ils permettant les observations suivantes :

- tôle e = 15 mm : Les planches n° 29 et 30 rendent compte des résultats obtenus par brûlage lors du contrôle de la tôle repérée 52 II à partir des faces A et B de celle-ci.

Au cours de cet examen, il a été observé une zone défectueuse repérée D1 à laquelle correspondent les oscillogrammes n° 1 et 2 de la planche n° 32 annexée. Les oscillogrammes n° 3 et 4 de la même planche ont été obtenus lors d'un contrôle manuel complémentaire dit de comparaison effectué au droit de la zone D1.

Trois macrographies (Cf. pl. n° 33) effectuées à des échelles différentes sur une coupe réalisée dans la zone D1 permettent de noter la présence d'une inclusion allongée de sulfure de Manganèse de 1,8 mm de longueur environ. Sur cette même planche figure une empreinte Baumann sur laquelle apparaît une concentration importante d'impuretés sulfureuses dans la zone centrale de l'épaisseur (acier effervescent). A titre de comparaison, deux macrographies et une empreinte Baumann correspondant à une zone saine S de la même tôle sont consignées sur la planche n° 31. Quelques très petites inclusions nodulaires éparses y sont observées. Les oscillogrammes 4 et 5 résultant d'essais complémentaires manuels effectués dans les mêmes conditions sur cette même zone sont à comparer à ceux (n° 3 et 4) de la planche n° 32.

- tôle e = 40 mm : L'examen de la tôle repérée 5I a donné lieu aux enregistrements par brûlage des planches n° 36 et 37 annexées. Quatre zones défectueuses repérées de D1 à D4 y ont été observées.

La zone D1 a donné lieu au relevé des oscillogrammes n° 1 et 2 de la planche n° 38 où il apparaît que l'écho de défaut correspond à une anomalie située à proximité de la face A de la tôle. Les oscillogrammes n° 3 et 4 de cette même planche ont été obtenus lors des essais manuels de comparaison et confirment les résultats précédents.

L'empreinte Baumann et l'examen par aimantation effectués sur coupe au niveau des zones S et D1 (fig. 5 et 6 de la planche n° 38) ainsi que les examens métallographiques avec ou sans attaque de la planche n° 40 confirment la présence d'inclusions de sulfures de manganèse allongées notamment au voisinage de la face A de la tôle.

A titre de comparaison, des examens manuels complémentaires ont été effectués au droit d'une zone saine S de cette même tôle (Cf. planche n° 41). L'étude métallographique correspondante (Cf. planche n° 42) met comme précédemment en évidence des inclusions de forme allongée dont la densité et la longueur sont peu différentes de celles de la zone défectueuse D1.

Enfin, les zones D2, D3 et D4 ont donné lieu au relevé des oscillogrammes correspondants (Cf. planche n° 39) où il apparaît que les défauts D2 et D3 sont situés au voisinage de la surface A et le défaut D4 vers le 1/3 de l'épaisseur comptée à partir de la face A.

le e = 80 mm

Les planches n° 43 et 44 donnent les résultats obtenus à partir de la face A de la tôle repérée 34 II et respectivement à l'aide des modes d'enregistrement par brûlage et proportionnel.

De façon analogue les deux méthodes d'enregistrement appliquées à partir de la face B ont donné les résultats consignés aux planches n° 45 et 46 annexées. On constate, quel que soit le mode d'enregistrement un grand nombre de défauts à proximité des deux rives longitudinales de la tôle et une densité d'anomalies nettement plus faible vers le centre de celle-ci.

Trois images de défauts repérées D1, D2 et D3 ont été sélectionnées et les oscillogrammes correspondants sont consignés sur la planche n° 47 annexée.

Ils permettent les observations suivantes :

- les défauts D1 et D2 sont situés au voisinage de la face B
- le défaut D3 est plus proche de la face B que de la face A mais est situé cependant dans une zone centrale dans l'épaisseur de la tôle.

Les résultats de l'examen métallographique des régions superficielles (PS et PI) et centrales (ME) de la tôle au droit de la zone saine S et de la zone défectueuse D1 sont consignés sur les planches n° 48 et 49 .

Si la zone S présente un état structural particulièrement sain (Cf. planche n° 48) un petit dédoublement de 3 mm de longueur, situé à 3,2 mm environ de la face B est par contre observé (Cf. planche n° 49) au droit de la zone défectueuse D1.

A2 : Examens effectués à l'aide du palpeur 5 MHz à faisceau focalisé

Rappelons qu'en fonction des résultats obtenus au paragraphe 1.1.1. 1-2, ce palpeur n'a été utilisé que pour l'examen d'un certain nombre de tôles de 15 mm d'épaisseur, la sensibilité de détection obtenue pour des épaisseurs supérieures (examen des blocs B2 et B3) étant inférieure à celle qui résulte de l'emploi du palpeur à faisceau non focalisé. Les planches n° 34 et 35 comportent les enregistrements obtenus sur la tôle repérée 52 II de 15 mm d'épaisseur à partir des faces A et B de celle-ci et à l'issue cependant du prélèvement pour examen métallographique (Cf. planche n° 33) de la zone défectueuse D1 décelée lors des examens effectués à l'aide du faisceau non focalisé. Comme les enregistrements permettent de le constater aucune autre zone défectueuse n'a été mise en évidence.

Les résultats de l'examen systématique à partir de chacune des 2 faces de 16 tôles de 15 mm d'épaisseur sont consignés dans le tableau comparatif n° 13 annexé. Ce dernier confirme que la sensibilité de détection est légèrement accrue lors de l'utilisation du faisceau focalisé ; ces résultats sont en accord avec les essais préliminaires réalisés sur le bloc B1 (Cf. planches n° 17 et 21..

B - Tôles issues de constructions endommagées par arrachement lamellaire

En raison de leurs épaisseurs, ces portions de tôles n'ont donné lieu qu'à un examen effectué au moyen du palpeur de 5 MHz à faisceau non focalisé.

Les résultats obtenus sur les différents échantillons ont été les suivants :

- tôle e = 20 mm (repérée B 20)

Les enregistrements par brûlage de la planche n° 50 résultant des examens réalisés à partir des faces A et B de l'échantillon ont mis en évidence un certain nombre de zones défectueuses réparties sur l'ensemble de la tôle.

Une étude métallographique a été effectuée sur une coupe réalisée au droit de la zone défectueuse D1. La macrographie de la planche n° 51 ainsi que les micrographies de la planche n° 52 permettent de constater la présence de plusieurs hétérogénéités allongées susceptibles de correspondre à des inclusions de sulfure de manganèse situées au voisinage de la face B et dont la longueur maximale est de l'ordre de 1,4 mm.

Sur ces planches sont en outre consignées les oscillogrammes en représentation classique (avec filtration de la HF ou affichage de la HF) obtenus lors d'examens par ultrasons complémentaires effectués manuellement au droit de la zone D1 à partir de la face A et au moyen de palpeurs émetteurs-récepteurs d'ondes longitudinales ou transversales. Il apparaît que l'examen effectué au moyen du palpeur MB4Y (ondes transversales) ne met pas les défauts en évidence.

Un second examen métallographique a été effectué au droit d'une zone saine repérée S de cet échantillon. Il permet d'observer (cf. planche n° 53) dans toute l'épaisseur de la tôle la présence d'un très grand nombre de petites inclusions de forme nodulaire non décelables aux ultrasons comme permettent de le constater d'une part les enregistrements effectués, et d'autre part les examens complémentaires par ultrasons dont les oscillogrammes figurent sur cette même planche.

- tôle e = 110 mm (repérée A 110)

Les enregistrements par brûlage réalisés à partir des faces A et B de cet échantillon (Cf. planche n° 54) montrent que ce dernier contient des défauts de compacité dont la surface ou le nombre affectent la presque totalité de sa superficie.

La macrographie ainsi que les micrographies de la planche n° 55 effectuées sur une coupe révèlent la présence de nombreuses inclusions allongées de plusieurs dizaines de millimètres de longueur et dont la nature peut correspondre à du sulfure de manganèse ou à des aluminates compte tenu de la teneur relativement élevée en aluminium du matériau (Cf. tableau n° 4).

- tôles e = 88 mm et 112 mm (repérées C88 et C112)

Issues d'une même construction endommagée par le phénomène d'arrachement lamellaire, ces deux tôles ont fait l'objet dans le cadre de ce présent contrat de recherche d'une étude préliminaire dont les résultats font l'objet du rapport IS n° 5 559.

Les planches n° 4 à 7 de ce document (Cf. planches n° 56 à 59 du présent rapport) rendent compte des résultats obtenus lors de l'examen par ultrasons où seule la tôle de 88 mm (échantillon n° 1) a donné lieu à l'enregistrement de quelques défauts de compacité internes qui ne correspondent pas aux défauts dits de surface (arrachements superficiels). Ces défauts internes de forme allongée peuvent correspondre à des inclusions de sulfures de manganèse situées au voisinage de la face A et dans la région centrale de l'échantillon et qui se trouvent associées à des inclusions de petites dimensions qui en raison de leur forme nodulaire ne peuvent être décelées lors du contrôle par ultrasons (Cf. rapport n° 5 559).

Les macrographies de la planche n° 66 relatives à la tôle C112 révèlent la présence de très petites inclusions allongées dont les très faibles dimensions n'en permettent pas la détection par ultrasons.

1.1.2. Examens complémentaires

Comme il a été précisé au paragraphe 1.3. du chapitre V, ces examens qui ont été effectués manuellement ont pour objet essentiel de permettre une analyse plus poussée de certaines zones défectueuses ou douteuses décelées lors des contrôles automatiques de référence.

1.1.2.1. Examens par ondes longitudinales

Trois palpeurs (Cf. tableau n° 6) constitués par des éléments piézo-électriques de natures, fréquences et diamètres différentes mais présentant un pouvoir de résolution élevé ont été utilisés.

Les résultats obtenus au cours d'essais dits de comparaison effectués notamment sur les tôles "neuves" et au niveau d'un certain nombre de zones défectueuses confirment, avec une sensibilité comparable à celle qui est obtenue lors des contrôles de référence, la présence d'anomalies internes (Cf. pl. n° 32, oscillogramme n° 3).

1.1.2.2. Examens par ondes transversales

Les résultats obtenus par l'Institut de Soudure aux cours d'opérations de contrôles effectuées antérieurement à cette étude sur des soudures d'angles interpénétrées assurant la liaison entre l'âme et l'une des semelles d'une poutre en I, avaient permis de constater que dans les conditions particulières de cet examen (1), les ondes transversales assuraient avec une bonne sensibilité la détection de petites inclusions allongées non décollées de leur matrice qui affectaient la tôle de semelle (Cf. planches n° 61 et 62).

./.

(1) Nota Le contrôle de la liaison âme-semelle de la poutre en I a été effectué au moyen d'un palpeur émetteur-récepteur d'ondes transversales (référence MWB 70) déplacé sur l'une des faces de l'âme le long de la soudure examinée et dont les caractéristiques sont consignées au tableau n° 6.

En revanche, des examens effectués au droit des défauts observés (à partir de la surface de la semelle opposée à la soudure au moyen des ondes longitudinales et à l'aide d'une sensibilité déjà supérieure à celle qui est préconisée par les différentes normes ou spécifications en vigueur), ne conduisaient qu'à l'obtention d'échos de défauts de faible amplitude (Cf. oscillogrammes n° 3, 4 et 5, planche n° 63).

Les résultats précédents confirment donc que la probabilité de détection des défauts est d'autant plus élevée que la longueur d'onde de la vibration est plus faible ce qui est le cas avec des ondes transversales.

Toutefois, ces observations nous ont conduit à envisager une expérimentation originale de ces ondes sur les tôles en émettant l'hypothèse que la mise en évidence des inclusions pouvait aussi dépendre de l'orientation des déplacements imprimés aux particules du matériau.

Il devenait alors intéressant d'étudier le comportement d'un palpeur type MB 4Y (Cf. tableau n° 6) dont l'élément piézo-électrique est un quartz taille Y et qui permet d'émettre un faisceau d'ondes transversales (ou de cisaillement) perpendiculairement à la surface des tôles, le déplacement des grains de matière étant alors contenu dans un plan parallèle à celui des inclusions allongées notamment. Les oscillogrammes n° 6, 7 et 8 de la planche n° 63 rendent compte des résultats obtenus au niveau de chacune des zones défectueuses D1, D2 et D3 de l'assemblage précité.

Les résultats qui ont été obtenus sur les tôles dites "neuves" au cours des essais relatifs au palpeur MB 4Y correspondent aux oscillogrammes consignés au tableau n° 14 ci-après :

Tableau n° 14

Epaisseur tôle (mm)	Repère tôle	N° oscillogramme	N° planche annexée
15	5 II	4	32
	-	2	31
40	5 I	3 et 4	38
	-	3 et 4	41

Les oscillogrammes obtenus permettent de constater que les anomalies décelées au cours de l'examen de référence sont de nouveau mises en évidence mais toutefois avec une légère perte de sensibilité qui confirme les résultats des essais effectués sur la semelle de la poutre en I.

Compte-tenu des difficultés rencontrées lors du couplage d'un palpeur émetteur-récepteur d'ondes transversales (dont l'élément piézo-électrique est un quartz taille Y) sur une tôle (les ondes transversales ne se propagent pas dans les liquides), il ne semble donc pas que cette méthode présente un intérêt pratique particulier.

1.2. Examens effectués selon la méthode d'analyse fréquentielle -

Ces examens ont été effectués au moyen d'impulsions d'ondes longitudinales ayant un spectre de fréquence étendu émises par un palpeur émetteur-récepteur dont l'élément piézo-électrique est fortement amorti.

1.2.1. Essais préliminaires

Ces essais ont été effectués en deux étapes successives :

a) examen manuel initial d'une tôle (repère 59) en acier de nuance E 36-3 de 30 mm d'épaisseur ne faisant pas partie des tôles "neuves" ou issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire.

b) étalonnage proprement dit des paramètres d'examen en vue du contrôle automatique en immersion.

1.2.1.1. Examen initial d'une tôle de 30 mm d'épaisseur (repère 59) dite de référence

Comme précisé au § 1.1.2. (solution C) du chapitre V, le principe fondamental de cette méthode consiste à apprécier les déformations d'un spectre de fréquence à large bande après réflexion sur une surface considérée et à en déduire la fonction de transfert de l'obstacle. Dans les matériaux métalliques et les tôles en particulier on sait que l'absorption des ondes ultrasonores, pour une structure donnée, dépend essentiellement de la fréquence.

L'affaiblissement de l'onde réfléchie par la paroi opposée d'une tôle (écho de fond) va donc dépendre (pour un état de surface donné) d'une part de la structure du matériau (gros grain), et d'autre part de la quantité d'inclusions qu'il contient dont les plus petites notamment vont pour les fréquences les plus élevées accentuer ce phénomène par diffusion de l'énergie acoustique.

L'examen préalable de la tôle repérée 59 au moyen de la méthode conventionnelle de référence ayant permis de déterminer les 4 zones de qualités différentes ci-après (Cf. oscillogramme de la planche n° 64 et enregistrements des planches n° 65 et 66).

- 1) zone saine repérée S
- 2) zone présentant une légère absorption repérée A
- 3) zone douteuse repérée d (petits échos de réflexion intermédiaires)
- 4) zone défectueuse repérée D (échos de réflexion intermédiaires d'amplitudes notables).

L'aspect des spectres de fréquence obtenus sur un analyseur Hewlett Packard correspondants aux quatre états précités et obtenus à l'aide d'un palpeur de 5 MHz et d'un appareil type R7 équipé successivement d'un amplificateur linéaire (type ER 30) puis d'un amplificateur logarithmique (type ER 100) sont consignés sur la planche n° 64.

L'examen des spectres relatifs aux zones S (saine) et A (légère absorption) permet de constater que l'amplitude maximale de l'énergie réfléchie qui correspond à une fréquence d'environ 5,5 MHz dans le premier cas se déplace dans le second cas vers les basses fréquences (3 MHz) (1 division horizontale correspondant à 1 MHz).

Les résultats obtenus au droit des zones douteuses (d) et défectueuses (D1) pour caractéristiques qu'ils soient ne peuvent a priori être explicités.

Sur les spectres obtenus à l'aide de l'amplificateur logarithmique on peut noter que l'absorption relative aux fréquences 3 et 5,5 MHz est de 5 décibels pour la zone S et d'environ 12 décibels pour la zone A (1 division verticale correspond à 10 décibels).

Les quatre zones caractéristiques précitées ont donné lieu à l'issue du contrôle automatique ultérieur de la tôle (Cf. § 1.2.2.1.) à des examens métallographiques dont les résultats consignés sur les planches n° 67 et 68 et analysés au paragraphe 1.2.2.1. permettent d'établir une corrélation satisfaisante avec les oscillogrammes en représentation type A de la planche n° 64.

1.2.1.2. Etalonnage et choix des paramètres d'examen pour le contrôle automatique en immersion

Le matériel utilisé à cet effet a fait l'objet d'une description détaillée au chapitre V.

Notons toutefois qu'en raison des possibilités offertes par le tiroir (SAF 20) d'analyse fréquentielle utilisé (le rapport HF/BF étant respectivement réglé pour les valeurs de 7 et de 2 MHz), il convenait d'utiliser des palpeurs de fréquences élevées.

En conséquence les deux palpeurs à faisceaux d'ondes longitudinales non focalisés ci-après ont été utilisés lors des essais préliminaires à fin de comparaison.

- 1) palpeur n° 113 : fréquence nominale : 5 MHz
diamètre : 10 mm
- 2) palpeur n° 118 : fréquence nominale : 10 MHz
diamètre : 10 mm.

L'étalonnage de la sensibilité d'examen a été effectué pour chacune des épaisseurs considérées (tôles dites neuves) au moyen des blocs B1, B2 et B3 précités.

Les valeurs de h_e (distance du milieu du couplage entre la face de sortie et l'élément piézo-électrique et la surface de la tôle) étant

égales à celles qui ont été adoptées lors des examens conventionnels dits de référence à savoir :

- Bloc B1 (e = 15 mm) : he = 20 mm
- Bloc B2 (e = 40 mm) : he = 30 mm
- Bloc B3 (e = 80 mm) : he = 40 mm.

les réglages suivants étaient effectués :

- Tiroir d'émission réception(ER30): la puissance étant à sa valeur minimale (position 1), l'amplification graduée en décibels est ajustée à une valeur telle que le premier écho de fond obtenu sur le bloc considéré (pièce saine) ait une amplitude égale à celle de l'écran de l'appareil R7 (6 divisions verticales).

- Tiroir d'analyse fréquentielle(SAF 20): Le réglage précédent étant établi, il est procédé à l'équilibrage du galvanomètre indiquant le rapport HF/BF (graduation 0). De la même façon l'amplitude de l'écho de réflexion (écho de fond) lue sur le galvanomètre correspondant est ajustée à la position intermédiaire 0.

Enfin la largeur et la position du créneau de sélection sont fixées de telle sorte que seul le premier écho de fond soit analysé.

Les enregistrements obtenus sur les trois blocs d'étalonnage pour les conditions d'examen définies ci-dessus sont consignés sur les planches n°69 (palpeur de 5 MHz) et n° 70 (palpeur de 10 MHz).

Les résultats obtenus permettent les constatations suivantes :

- 1) le palpeur de 10 MHz présente, comme il était normal de le prévoir en raison de la méthode d'analyse (spectre plus large), une meilleure sensibilité de détection. En conséquence il sera seul utilisé pour les examens ultérieurs.
- 2) le signal enregistré (rapport HF/BF) est plus nettement influencé par les défauts (trous à fond plat) les plus voisins de la face supérieure de la tôle (côté palpeur).
- 3) La sensibilité de détection globale des défauts situés à proximité de chacune des deux faces de chaque bloc est en général inférieure à celle qui est obtenue à l'aide de la méthode conventionnelle et des mêmes palpeurs (Cf. planches n° 18 et 20).

Remarque : Seul a été utilisé pour les essais effectués selon la méthode d'analyse fréquentielle l'enregistrement proportionnel à encre en raison de la sensibilité plus importante de ce procédé et des faibles valeurs du signal de sortie qui résulte d'une variation peu importante du rapport HF/BF.

1.2.2. Examen proprement dit

Ont été réalisés au moyen d'un dispositif d'inspection automatique.

1.2.2.1. Tôle de référence (n° 59)

En raison des caractéristiques particulières de cette tôle (épaisseur, nuance), les étalonnages ont été systématiquement effectués au droit de la zone saine S de celle-ci.

Les résultats obtenus à partir de chacune des faces A et B figurent sur les enregistrements des planches n° 71 et 72 sur lesquelles on peut noter la présence d'une variation du rapport HF/BF au voisinage des zones caractéristiques A (absorption) et D₁ (zone défectueuse). En revanche, aucune perturbation n'est enregistrée au niveau de la zone douteuse d.

Les résultats des examens métallographiques effectués sur des coupes réalisées, d'une part, au droit de chacune de ces 3 zones caractéristiques et d'autre part au niveau de la zone saine S permettent les observations suivantes :

- zone saine S (Cf. planche n° 67) : Les trois macrographies correspondant aux régions superficielles (PS et PI) et centrale (ME) de la tôle permettent de noter la très faible densité d'inclusions en cette zone,
- zone absorbante A (Cf. planche n° 67) : De nombreuses inclusions filiformes allongées affectent principalement la partie centrale de la tôle. En outre, un grand nombre de très petites inclusions disposées en chapelets y est également observé,
- zone douteuse d (Cf. planche n° 68) : La totalité de l'épaisseur du produit comporte un grand nombre d'inclusions dont les caractéristiques sont comparables à celles de la région centrale de la zone A. Toutefois, on note ici la présence d'une inclusion allongée de plus grande longueur,
- zone défectueuse D₁ (Cf. planche n° 68) : On constate un accroissement de la densité d'inclusions en cette zone et la présence à mi-épaisseur d'une inclusion allongée dont la solution de continuité est favorable à une réflexion du faisceau ultrasonore.

1.2.2.2. Tôles dites "nouves"

Un certain nombre de tôles de 15 et de 40 mm d'épaisseur a fait l'objet d'un examen par analyse fréquentielle. Les résultats obtenus sur les tôles repérées 52 II et 5 I d'épaisseurs respectives 15 et 40 mm considérés comme particulièrement représentatifs sont consignés ci-après :

- tôle e = 15 mm (repère 52 II)

Les enregistrements des planches n° 73 et 74 permettent les constatations suivantes :

- a) la zone repérée A7 où une absorption légèrement supérieure à la normale avait été observée lors du contrôle manuel complémentaire (Cf. planche n° 75) est de nouveau mise en évidence mais très faiblement cependant.

b) la zone défectueuse D1 décelée lors des contrôles de référence et complémentaires, bien que détectée une nouvelle fois (Cf. oscillogrammes de la planche n°76), n'apparaît que faiblement sur l'enregistrement relatif à la face A (Cf. planche n°73) et pas du tout lors de l'examen à partir de la face B (Cf. planche n° 74).

c) En revanche l'enregistrement exécuté à partir de la face A met en évidence un certain nombre de zones singulières qui ne correspondent qu'à un état de surface localement défectueux (petites plaques de calamines adhérentes ou légères dépressions dans le métal).

- tôle e = 40 mm (repère 5 I)

Aucune des quatre zones défectueuses (D1 à D4) qui avaient été décelées lors de l'examen conventionnel de référence n'apparaissent sur l'enregistrement de la planche n°77 réalisé à partir de la seule face A examinée de la tôle considérée. Les zones singulières correspondent encore à un état de surface localement défectueux.

A l'issue des examens effectués sur les tôles de 15 et 40 mm d'épaisseur, il apparaît que dans les conditions d'essais la méthode d'analyse fréquentielle ne met que partiellement en évidence les zones défectueuses décelées lors des examens de référence.

1.2.2.3. Tôles issues de constructions endommagées par des ruptures d'arrachement lamellaire

N'ont fait l'objet d'examens systématiques que les tôles repérées B 20 et C 112. Les résultats obtenus sont les suivants :

- tôle e = 20 mm (repérée B 20)

Les enregistrements de la planche n°78 relatifs à chacune des faces A et B de cette tôle permettent de constater :

a) que pour les zones A0 et A1 où une absorption relativement importante de l'énergie acoustique avait été observée lors des contrôles manuels complémentaires (Cf. planches n°79 et 80) seule la zone A1 est de nouveau mise en évidence.

b) que la zone défectueuse D1 vue lors des examens de référence et complémentaires n'est pas enregistrée lors du contrôle par analyse fréquentielle. La planche n°81 montre les oscillogrammes relatifs aux zones caractéristiques A1 et D1.

c) comme précédemment (examen des tôles "neuves") l'ensemble des zones singulières que ces enregistrements mettent en évidence correspondent à des défauts superficiels de la tôle.

- tôle e = 112 mm (repérée C 112)

La comparaison des enregistrements des planches n° 58 et n° 82 correspondant respectivement aux examens de référence selon la méthode conventionnelle et par analyse fréquentielle exécutés à partir de la face A de la tôle permet de constater, compte-tenu de l'état de surface très irrégulier de celle-ci, que l'ensemble des nombreuses zones singulières mises en évidence par la seconde méthode correspondent encore à des défauts superficiels mineurs (calamine adhérente et dépressions).

Les examens métallographiques de la planche n° 60 montrent que compte-tenu de l'épaisseur du produit, l'état inclusionnaire de ce dernier peut être considéré comme relativement satisfaisant au niveau de ces zones singulières.

2 - EXAMEN PAR AIMANTATION -

En raison des propriétés amagnétiques des inclusions non métalliques recherchées, ces examens ont été effectués exclusivement à titre de complément des examens métallographiques.

2.1. Mode opératoire -

Ces examens ont été mis en oeuvre sur un certain nombre d'échantillons dont la tranche avait été préalablement préparée en vue d'une étude métallographique puis revêtue d'une fine couche de peinture cellulosique blanche.

Chaque échantillon a ensuite été disposé entre les mors d'un électro-aimant (chapitre V § 2.2.1) de telle sorte que les lignes de force du champ soient perpendiculaires au plan du laminage donc à celui des inclusions recherchées.

Le champ magnétique étant établi, la liqueur détectrice est alors répandue à la surface de l'échantillon et les résultats observés.

La valeur de l'induction dans le matériau a été vérifiée au moyen d'un témoin d'aimantation (chapitre V § 2.2.3.).

2.2. Résultats obtenus -

2.2.1. Tôles spécialement approvisionnées pour l'étude (dites "neuves")

Les résultats obtenus sont consignés sur les relevés photographiques des spectres des planches n° 83 et 84 annexées.

2.2.2. Tôle de référence n° 59

(Cf. planche n° 85 annexée).

2.2.3. Tôles issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire

(Cf. planche n° 86 annexée).

3 - CONCLUSION -

A la lumière des résultats obtenus notamment lors des examens par ultrasons, il apparaît :

3.1. Que la détection des hétérogénéités (inclusions) ne semble devoir être assurée à l'aide de la méthode conventionnelle et des palpeurs mis en oeuvre qu'à partir d'une certaine longueur de défaut.

La valeur minimale d'une inclusion décelable dépend de l'épaisseur du produit contrôlé ; elle est de l'ordre de 1,5 mm pour des épaisseurs inférieures ou égales à 40 mm et de plusieurs millimètres au-delà (parfois plusieurs dizaines de millimètres pour les tôles très épaisses).

3.2. Le choix d'une fréquence d'examen relativement élevée ($f \geq 5\text{MHz}$) mais cependant compatible avec la structure du matériau à contrôler, ainsi que l'utilisation d'un palpeur à faisceau focalisé dont la distance focale doit cependant être adaptée à l'épaisseur de la tôle, accroissent la probabilité de détection des petits défauts.

3.3. La détection selon la méthode conventionnelle des fines hétérogénéités susceptibles cependant de provoquer l'arrachement lamellaire nécessite, quelles que soient la forme du faisceau ultrasonore et la fréquence mises en oeuvre, une sensibilité d'examen bien supérieure à celle qui est recommandée par les codes, spécifications ou normes en vigueur.

3.4. Des comparaisons résultant des essais effectués successivement au moyen des ondes longitudinales et transversales, il apparaît que l'application de ce dernier mode de vibration au contrôle des produits laminés ne répond pas aux espoirs qu'avait fait naître la détection de petites inclusions affectant la tôle de semelle d'une poutre en I lors du contrôle de la soudure interpénétrée de l'âme avec celle-ci.

3.5. Enfin, à l'issue des résultats obtenus au cours des examens effectués par analyse fréquentielle, il apparaît que cette méthode ne présente qu'une efficacité très limitée dans le cadre d'une utilisation industrielle courante. En effet, les zones défectueuses (à l'exclusion des zones présentant une absorption anormale) mises en évidence lors du contrôle conventionnel (ondes longitudinales) ne sont alors que partiellement décelées.

En outre, la sensibilité excessive que présente l'analyse fréquentielle vis à vis de l'état de surface d'une tôle ne permet pas d'établir, à partir des enregistrements obtenus, une distinction entre les images correspondant respectivement à un état de surface localement médiocre ou à une zone comportant des anomalies susceptibles de favoriser l'initiation de l'arrachement lamellaire.

Il n'est pas exclu cependant de penser que l'exploitation de cette méthode de contrôle particulière puisse fournir des informations intéressantes notamment dans le cadre de techniques avancées où l'utilisation de conditions opératoires idéales (contrôle des tôles après rectification des faces) pourraient être envisagées.

CHAPITRE VII

ESSAIS DESTRUCTIFS

1 - BUTS -

Les essais destructifs effectués sur les "tôles neuves" et les "tôles douteuses" avaient pour objectif principal de définir, de façon aussi précise que possible, toutes les caractéristiques des produits approvisionnés pour l'étude, afin d'être en mesure de les rapprocher des différences éventuelles de comportement observées lors de l'étude non destructive de ces produits. Pour avoir une bonne connaissance de ces caractéristiques les essais et examens effectués font appel :

1°) - aux méthodes traditionnelles (conventionnellement désignées ci-après essais d'identification)

2°) - à des techniques d'essais particulières destinées à apprécier le comportement des différents produits de base disponibles lors de sollicitations dans le sens travers court, et ceci avec ou sans intervention de cycles de soudage.

Bien entendu, dans ce cadre il a été largement fait appel à tous les essais connus et pour la plupart décrits dans le rapport bibliographique. Chaque essai expérimenté a fait l'objet de comparaisons et d'une étude critique plus ou moins approfondie à l'issue de laquelle diverses expériences ont été effectuées afin de compléter l'éventail des essais destructifs et de tenter de combler les lacunes existantes.

2 - ESSAIS D'IDENTIFICATION -

Lors de la commande des tôles destinées à l'étude, il avait été demandé au fournisseur de communiquer les certificats d'analyse chimique sur coulée et de porter sur chaque pièce les indications suivantes :

- a) une lettre désignant globalement la nuance, le mode d'élaboration ainsi que l'état de traitement de chaque tôle,
- b) un flèche indiquant la direction du laminage.

A la livraison des fournitures qui, groupées par lots de 4 ou 5 tôles, étaient accompagnées de fiche d'analyse chimique sur coulée, il a été constaté sur certaines pièces des omissions de lettre de repérage et/ou de la direction du laminage. Les essais d'identification ont donc eu pour objectif complémentaire de lever les incertitudes résultant des omissions.

Les essais entrepris ont été les suivants : essais de traction, essais de résilience, analyses chimiques et examens métallographiques.

2.1. Essais de traction

Ils ont été effectués suivant la norme française A 03-151 et sur des éprouvettes proportionnelles parallélépipédiques.

Prélèvement des éprouvettes

Les éprouvettes ont été prélevées de telle façon que la section de la partie calibrée soit arbitrairement égale à 400 et 450 mm². Les dimensions principales des éprouvettes étant consignées à la figure 1 de la planche 87 annexée, il a été procédé au prélèvement :

- a) d'une éprouvette par lot de 4 ou 5 tôles ayant 15 ou 40 mm d'épaisseur et appartenant à la même nuance et au même état de traitement. Dans ce cas l'usinage est fait de telle façon que la partie calibrée de l'éprouvette intéresse toute l'épaisseur du produit.
- b) de 3 éprouvettes sur chacun des 2 lots de tôles d'épaisseur égale à 80 mm.

L'une des éprouvettes intéresse la zone centrale du produit et les deux autres respectivement chacune des faces et des zones voisines.

En outre, le prélèvement a été fait de telle façon que l'axe longitudinal des éprouvettes de traction soit indifféremment parallèle à la direction du laminage (X) ou à celle du travers long (Y).

Matériel utilisé et conduite des essais

La machine de traction de marque MAB-SKF a une charge maximale de 40 T.

Les essais ont été effectués à la température ambiante. Les valeurs de limite d'élasticité R_e , de résistance maximale à la rupture R et d'allongement A % ont été déterminées.

Résultats obtenus

Les valeurs obtenues pour R_e et R exprimées en N/mm² ainsi que les allongements exprimés en % sont consignées au tableau 2 en annexe.

2.2. Essais de résilience

Ces essais ont été exécutés suivant la norme française NF A-03-156 et sur les tôles ne comportant pas de flèche indicatrice de la direction du laminage.

Prélèvement et caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes

Le repérage et les modes de prélèvement des éprouvettes sont consignés à la figure 2 de la planche 87 en annexe.

Dans un premier stade, les entailles des éprouvettes ont été usinées en V, dans un second, quand les résultats obtenus ne permettent pas de déterminer avec certitude la direction du laminage, il a été procédé à l'usinage d'éprouvettes entaillées en U.

Matériel utilisé et conduite des essais

Les essais ont été effectués sur un mouton Charpy (VOLPERT) de 30 kgm, à 0°C pour les éprouvettes entaillées en V et à la température ambiante pour celles entaillées en U.

Résultats obtenus

Les valeurs de résilience obtenues (valeurs individuelles et moyennes obtenues sur des séries de 3 éprouvettes prélevées dans la même direction) sont consignées au tableau 2 en annexe.

2.3. Analyses chimiques

Les fiches d'analyse chimique sur coulée communiquées lors de la livraison des "tôles neuves" concernent les 5 éléments C, Mn, Si, S et P. L'analyse sur produit concerne 7 éléments qui comprennent en plus des 5 éléments précités, l'azote et l'aluminium.

Les méthodes d'analyse ainsi que les incertitudes en pourcent sur les déterminations sont les suivantes :

C : combustion au four électrique, différence de conductibilité d'une solution de soude, enregistrement de la courbe de combustion ($\pm 0,01$)

S : combustion au four électrique et iodométrie ($\pm 0,002$)

P : titrimétrie du phosphomolybdate d'ammonium ($\pm 0,002$)

N : déplacement par la soude sous forme d'ammoniaque, titrimétrie ($\pm 0,002$)

Si : spectrométrie ($\pm 0,02$)

Mn : spectrométrie ($\pm 0,03$)

Al : spectrométrie ($\pm 0,005$).

Il est à noter que les valeurs correspondant aux analyses par spectrométrie sont la moyenne de 3 déterminations.

Les résultats obtenus consignés au tableau 2 annexé permettent de constater que :

a) les différences entre les valeurs obtenues en analyse sur coulée et celles sur produits peuvent être considérées comme normales.

b) aucune valeur ne sort des fourchettes prévues par la norme française NF A 35-501.

2.4. Examens métallographiques

Sur deux lots de tôles d'épaisseur 40 mm, il a été observé une permutation de marquage de lettre spécifiée à la commande. Pour lever l'indétermination qui en résulte quant à la nature du traitement, il a été effectué, sur deux échantillons repérés 11 et 15 (Cf. tableau 2 annexé) des examens micrographiques à partir de coupes réalisées parallèlement à la direction du laminage. Les coupes ont été dressées, polies mécaniquement puis attaquées au réactif de Sauveur.

L'examen de celles-ci permet de constater (Cf. planche n° 88 annexée) :

a) sur l'échantillon repéré 11, une structure de surchauffe ferrite-perlite à gros grains irréguliers dont l'indice de grosseur est égal à + 5 (état non recuit) ;

b) sur l'échantillon repéré 15, une structure de recuit ferrite-perlite à grains fins alignés dont l'indice de grosseur est égal à + 8 (état recuit).

2.5. Conclusion

Les essais destructifs précités effectués de façon traditionnelle, ont permis de déterminer de façon précise les caractéristiques des produits approvisionnés pour l'étude, de telle façon que les anomalies éventuelles, révélées par les essais (destructifs ou non) destinés à apprécier la tendance à l'arrachement lamellaire, puisse être rapprochée de ces caractéristiques.

N.B. Ces déterminations ont ainsi permis de lever les indéterminations et de remédier aux erreurs de repérage initiales notamment quant au sens de laminage et à l'état structural des produits.

3 - ESSAIS "DE COMPORTEMENT DANS L'ÉPAISSEUR"

3.1. Vue d'ensemble

Dans le but d'apprécier la tendance à l'arrachement lamellaire des produits laminés, de nombreux types d'essais destructifs ont été proposés et expérimentés par divers chercheurs.

L'étude bibliographique effectuée dans le cadre de la présente étude a fait une très large place à ce sujet (Cf. rapport bibliographique Chapitre 5 § 2 pages 30 à 50 (*)), elle a permis de dégager un certain nombre d'idées utiles à l'orientation des travaux et permis de constater notamment que :

1) malgré le grand nombre d'essais étudiés jusqu'à ce jour aucun ne paraît suffisamment au point pour servir de base de référence indiscutable par exemple pour une normalisation. (Le grand nombre d'essais proposé est du reste le signe même qu'aucun ne paraît assez universel).

2) Les essais proposés peuvent se classer en deux grandes familles.

a) essais mécaniques sans intervention du soudage en tant que moyen de produire la sollicitation, sur échantillons prélevés dans le métal à étudier. Les éprouvettes destinées à la détermination des propriétés mécaniques dans le sens de l'épaisseur peuvent toutefois comporter sur chacune de leurs faces une soudure assurant la liaison des pièces mécaniques auxiliaires pour la transmission des efforts. (Le cycle de soudage n'est pas censé intervenir en tant que tel dans le comportement de l'échantillon étudié).

b) essais faisant intervenir un cycle de soudage comme moyen de produire ou favoriser l'apparition de l'arrachement lamellaire.

Il est du reste évident que la frontière est parfois assez mal définie entre les essais où le soudage intervient comme agent sensibilisateur et les essais où son action est considérée comme nulle ou n'est pas prise en compte.

./.

(*) L'étude bibliographique prend du reste en considération des travaux effectués par l'Institut de Soudure et ayant fait l'objet de publication avant le déroulement du contrat CECA/IS n° 6210 55/0/11.

3) Jusqu'à la mise au point par l'Institut de Soudure d'un "essai semi-destructif" aucun essai de ce type n'avait été proposé.

3.2. Orientation des travaux

Les différentes expérimentations effectuées découlent des constatations ci-dessus elles ont notamment pour objet :

- 1°) De dégager les avantages et inconvénients des divers types d'essais proposés
- 2°) D'améliorer, si possible, les procédures de certains essais
- 3°) De compléter l'éventail des essais disponibles
- 4°) De mettre en oeuvre ces essais pour :
 - caractériser les produits de base approvisionnés pour l'étude
 - caractériser des produits prélevés sur des constructions ayant été affectées par des phénomènes d'arrachement lamellaire
 - établir si possible des corrélations entre les résultats qu'ils donnent et ceux obtenus par les examens non destructifs.

3.3. Etude critique des divers essais proposés

Cette étude est basée sur :

- les informations recueillies dans la littérature
- les essais effectués en vue de fonder un jugement à partir de résultats pratiques.

L'étude critique des divers essais proposés se dégage de l'examen des tableaux n°15 et 16 annexés dans lesquels sont comparés d'une part les essais dont la mise au point est antérieure à l'étude et qui font l'objet d'une description dans le rapport bibliographique, et d'autre part les essais mis au point dans le cadre de la présente étude.

3.4. Amélioration de certaines procédures d'essais

L'étude critique des essais proposés a révélé certains inconvénients et imperfections auxquelles il a paru intéressant de tenter d'apporter remède. Ils concernent notamment :

- les essais où n'intervient pas de cycle de soudage
- les essais où le soudage ne devrait intervenir que comme un moyen et non comme un facteur de sensibilisation.

3.4.1. Essais brodeau

N.B. Cet essai est décrit dans le rapport bibliographique au chapitre 5 § 2.3.2.1. pages 32, 33 et 34 ; il est d'autre part illustré par les figures 1 et 2 de la pl. 18 du même rapport.

L'essai "Brodeau" a fait l'objet de nombreuses expériences qui en ont confirmé le grand intérêt ; c'est le seul de tous les essais expérimentés qui ne fait pas intervenir le soudage et qui permette l'essai des zones proche des "peaux" ce qui présente l'avantage de caractériser le produit essayé indépendamment de tout effet incontrôlé résultant de contraintes d'origine thermique, de transformation, de modifications structurales de diffusion d'hydrogène, etc... Réciproquement on peut penser qu'il n'est pas pleinement représentatif d'un comportement où le soudage intervient.

De toute manière, cet essai donne des indications précises sur le comportement d'un matériau sollicité suivant le travers court (Z). Il a cependant l'inconvénient de nécessiter l'usinage de plusieurs éprouvettes onéreuses pour chaque détermination. En effet, pour que les résultats obtenus soient pleinement significatifs, il est indispensable que les faces des parties calibrées soient usinées ou mieux rectifiées avec le plus grand soin car tout marquage peut constituer un effet d'entaille susceptible d'influer fortement sur le comportement de l'éprouvette lorsque celle-ci est sollicitée.

Pour tenter de rendre moins onéreux l'usage de cet essai, à partir du modèle d'origine (type A), différentes variantes (types B et C) ont été expérimentées (*).

La forme et les caractéristiques générales de ces éprouvettes sont respectivement données aux planches 89 et 90.

Le montage utilisé pour les essais sur éprouvettes type B est représenté sur la planche n° 91. Il est utilisé sur des machines classiques d'essais de traction.

L'éprouvette "type B", obtenue par tournage fin est bien moins onéreuse que l'éprouvette "type A". L'éprouvette "C" obtenue par fraisage par retournement au moyen de deux systèmes de fraises jumelées est moins onéreuse encore, mais le centrage des trains de fraise doit être réalisé avec de très grandes précautions, sinon les deux branches ne sont pas de section rigoureusement égale et les résultats obtenus peuvent être entachés d'erreurs.

Finalement, dans le cadre de l'étude générale, c'est l'éprouvette type B qui a été retenue pour définir les caractéristiques dans l'épaisseur des produits étudiés.

3.4.2. Essais de traction sur éprouvettes soudées

Le cas envisagé ici est celui des éprouvettes pour lesquelles le soudage n'intervient que comme un moyen permettant de rapporter les têtes afin de saisir l'échantillon (généralement une "tranche" de tôle) soumis à la traction.

?

./.

(*) Cette expérimentation a fait l'objet d'une communication à l'Institut International de la Soudure "Essais de traction sur éprouvettes Brodeau des produits sidérurgiques laminés" par P. Amiot - A. Brodeau - H. de Leiris et Y. Le Penven
Doc. IX . F 73.18

Les essais de ce type sont très nombreux ; ils ont pour inconvénients communs :

- de faire intervenir de façon le plus souvent mal contrôlée des effets de soudage
- de "consommer" par dilution une partie non négligeable de métal au voisinage des peaux soustrayant ainsi à l'investigation des zones particulièrement intéressantes.

Les essais effectués ici ont eu pour objet de remédier en partie à ces inconvénients.

Ils ont consisté à expérimenter successivement :

- le soudage de goujons au pistolet
- le soudage par friction
- le soudage par faisceaux d'électrons.

a) Soudage de goujons au pistolet

La technique expérimentée consiste soit :

- 1 - à souder sur chaque face un goujon en ayant soin de faire de telle sorte que les deux axes soient en parfaite concordance et à usiner ensuite une éprouvette de traction classique dans l'ensemble ainsi réalisé.
- 2 - à souder un seul goujon sur une face de la tôle et à procéder ensuite à un trépannage partiel au moyen d'une fraise conique creuse travaillant en bout.

Le matériel utilisé ainsi que les opérations d'usinage et une macrographie de soudure sont illustrés à la planche 92.

La première technique (1) présente l'avantage de permettre l'essai dans la quasi totalité de l'épaisseur de la tôle mais a l'inconvénient de nécessiter un positionnement précis et délicat en ce qui concerne la concordance des axes.

La seconde technique (2) ne permet d'apprécier à chaque essai, que le comportement du métal voisin de la face où le goujon est soudé. En revanche, cette technique reprend tout son intérêt pour l'essai semi-destructif (Cf. rapport bibliographique chapitre 5 § 2.3.1.2. et planche 17).

Globalement, ces deux systèmes présentent l'avantage d'être rapide, de permettre un soudage programmé dont le cycle est parfaitement reproductible mais ont l'inconvénient de faire appel à un matériel spécial et de conduire à l'élimination du métal très proche des peaux des tôles (Cf. macrographie de la planche 92.)

b) Soudage par friction

Dans ce cas, l'assemblage de la tige de traction à l'échantillon de tôle à essayer (Cf. fig. 1 planche n° 93 en annexe) a été réalisé au moyen du procédé de soudage par friction.

Cette opération est réalisée au moyen d'une installation appropriée dans laquelle les pièces à assembler sont disposées respectivement l'une dans des mors fixes et l'autre dans des mors animés d'un mouvement rotatif. Ces derniers peuvent en outre, être déplacés parallèlement à leur axe de rotation de façon à amener en contact les surfaces des éléments à assembler. Une poussée longitudinale exercée sur les mors mobiles par l'intermédiaire d'un vérin permet l'échauffement local des pièces au niveau du plan de joint puis le forgeage du métal fondu.

Compte tenu du diamètre de la tige d'amarrage ($\phi = 20$ mm) et de la nature des matériaux assemblés, les paramètres de soudage utilisés ont été les suivants :

- vitesse de rotation des mors mobiles = 750 t/mm
- pression d'accostage (échauffement) = 40 N/mm²
- pression de forgeage = 50 N/mm²
- durée totale du cycle de soudage = 4 s

Comme dans le cas du soudage de goujons l'éprouvette peut être symétrique (soudage d'une prise sur chaque face de la tôle à essayer) ou dissymétrique (soudage sur une seule face).

Ces deux variantes sont illustrées respectivement sur les planches 93 fig. 1 et 94 fig. 1 correspondant à des essais effectués sur une tôle sensible à l'arrachement lamellaire.

Par rapport au soudage de goujons cette technique présente l'avantage de "consommer" moins de métal de base et de permettre ainsi une appréciation intéressante pratiquement les "peaux" de ce métal.

c) Soudage par faisceaux d'électrons

Grâce au soudage par faisceaux d'électrons, il est possible de réaliser des assemblages :

- sans métal d'apport
- comportant une zone affectée par la chaleur très étroite
- avec une zone fondue de largeur minimale
- avec un minimum de déformations.

Ces avantages ont été mis à profit pour réaliser des éprouvettes de traction ou prismatiques à partir de tranches prélevées dans le métal de base auxquelles des têtes d'éprouvettes de traction ont ensuite été soudées.

Après usinage l'essai de traction est effectué normalement.

La forme des éprouvettes est illustrée à la planche 93 fig. 2

3.5. Etude d'essais nouveaux

Cette étude a été orientée suivant deux directions :

a) mise au point d'essais semi-destructifs susceptibles d'être exécutés "in situ" (essais de traction sur implant)

b) étude d'essais mettant en tension biaxées le métal à caractériser (essais d'emboutissage).

3.5.1. Essai de traction sur implants

Cet essai est décrit dans le chapitre 5 du rapport bibliographique au point 2.1.2., il fait par ailleurs l'objet des figures des planches 17 et 27 de ce même rapport et de la planche n° 112 du présent document.

Cet essai présente des avantages importants. Il permet notamment :

- de caractériser de façon qualitative et quantitative la tendance à l'arrachement lamellaire

- de procéder à des essais en divers points d'une construction en cours de réalisation, et ceci au moyen d'un appareillage simple

- d'obtenir rapidement des résultats (temps total de mise en oeuvre inférieur à 1 heure pour des opérateurs entraînés)

- la réparation aisée et sans conséquence ultérieure de la zone affectée par l'essai.

3.5.2. Essais d'emboutissage

La caractéristique essentielle des produits susceptibles d'être affectés par l'arrachement lamellaire étant l'anisotropie il a paru intéressant de procéder à des essais d'emboutissage conduisant à des sollicitations biaxées sur des tranches minces prélevées dans le produit à essayer. Ainsi, toute anisotropie doit se manifester par des ruptures suivant des orientations "privilegiées".

Pour réaliser de tels essais au moyen de machines classiques, il fallait disposer d'éprouvettes d'épaisseur relativement faible. La solution proposée consiste à prélever des tranches d'épaisseur inférieure ou égale à 4 mm et à les souder par faisceau d'électrons à deux rectangles de tôle de même épaisseur, de même nature ou de résistance un peu supérieure, de façon à constituer une éprouvette carrée d'environ 100 mm de côté afin de constituer une éprouvette composite dont la forme est celle d'une éprouvette type "Persoz" classique, la partie à essayer étant soit centrée (éprouvette symétrique) soit excentrée (éprouvette dissymétrique) (Cf. pl. 95).

3.6. Détermination du comportement dans l'épaisseur des matériaux étudiés.

3.6.1. Au moyen de l'essai Brodeau type B

Cet essai a été systématiquement appliqué à des prélèvements faits sur tous les échantillons évoqués dans le présent rapport.

Suivant les épaisseurs en cause les conditions de prélèvement différent ; elles sont définies par les figures 1 (épaisseur 15 mm) 2 (épaisseur 20 et 30 mm) et 3 (épaisseur 40 mm) de la planche 96 et par les figures 4 (épaisseur 80 ou 88 mm) et 5 (épaisseur 112 mm) de la planche 97.

Les résultats obtenus figurent :

1°) dans le tableau 17 annexé

2°) sur des diagrammes en bâton qui permettent notamment des comparaisons directes entre les valeurs :

- des résistances R_m suivant X, Y et Z (Cf. planches n° 98 (tôles dites "neuves" $e = 15$ mm), 99 (tôles "neuves" $e = 40$ mm), 100 (tôles "neuves" $e = 80$ mm) et 101 (tôles "affectées") .

- des allongements $A \%$ suivant les mêmes directions (Cf. planches n° 102 (tôles "neuves" $e = 15$ mm), 103 (tôles "neuves" $e = 40$ mm), 104 (tôles "neuves" $e = 80$ mm), et 105 (tôles "affectées") .

- des strictions latérales selon X, Y et Z (Cf. planches n° 106 (tôles "neuves" $e = 15$ mm), 107 (tôles "neuves" $e = 40$ mm), 108 (tôles "neuves" $e = 80$ mm), 109 (tôles "affectées") .

3°) sur les photographies qui illustrent les différences caractéristiques de comportement des produits essayés :

- pl. 110 Tôles neuves
- pl. 111 Tôles prélevées sur des constructions affectées par l'arrachement lamellaire.

Conclusion :

Les résultats obtenus qui confirment l'intérêt de cet essai permettent cependant de constater :

1°) que l'allongement et plus encore la striction sont des critères beaucoup plus significatifs de la sensibilité d'une tôle à l'arrachement lamellaire que la charge de rupture.

2°) qu'une proportion importante de tôles dont la capacité de déformation ($A \%$ et $Z \%$) est élevée dans la direction de l'épaisseur présente des allongements et des strictions plus élevés dans la direction du travers long (Y) que dans le sens du laminage.

3°) que cet essai fournit simultanément des informations quantitatives et qualitative (aspect des sections rompues) sur le comportement du produit dans la direction de l'épaisseur.

4°) que sa mise en oeuvre est malheureusement onéreuse et longue en raison notamment de la qualité de l'usinage requis pour l'exécution des éprouvettes. Il faut noter cependant que cet inconvénient est relativement limité par la conception de l'éprouvette type B.

3.6.2. Au moyen de l'essai de traction sur implant - Résultats

Comme l'essai Brodeau type B, cet essai mis au point par l'Institut de Soudure a été utilisé de façon systématique pour apprécier le comportement des différents produits expérimentés dans le cadre de la présente étude.

Prélèvement des échantillons

Les échantillons de forme prismatique ont une base carrée d'environ 100 mm de côté et une hauteur égale ou supérieure à 15 mm. Tandis que les échantillons de tôle ayant 15 et 40 mm d'épaisseur sont soumis aux essais sur une zone superficielle, les produits de base ayant 80, 88 et 112 mm ont été essayés en deux niveaux correspondant respectivement aux zones superficielles (éprouvettes repérées A 110-1, C 88-1, C 112-1, 35-1 et 37-1) et centrale (éprouvettes repérées A 110-2, C 88-2, C 112-2, 35-2 et 37-2).

Soudage de l'implant

L'implant utilisé est de forme cylindrique ayant un diamètre nominal de 18 mm. L'extrémité chanfreinée en V est assemblée à la zone à essayer préalablement décalaminée par soudage manuel effectué à l'aide d'électrodes à haute limite d'élasticité.

Usinage de la zone à éprouver

La section du laminé à essayer est dégagée par trépanation au moyen d'un dispositif mécanique jusqu'à la profondeur désirée afin d'éliminer la surépaisseur du cordon de soudure implant-échantillon d'une part et de réaliser une gorge ayant pour l'étude du comportement des couches superficielles une profondeur de 8 mm environ (Cf. fig. 3 et 4 pl. 112 annexée).

Exécution de l'essai

L'éprouvette préalablement usinée est bloquée, par serrage d'un écrou sur un vérin à trou central. L'ensemble est ensuite soumis à un effort de traction au moyen du vérin alimenté par une pompe (Cf. fig. 1, planche 112 annexée). Les valeurs de la pression au cours de l'essai ainsi qu'à la rupture sont lues sur un manomètre préalablement étalonné avec le vérin.

Résultats obtenus et conclusion

Les résultats obtenus sont consignés d'une part au tableau n° 17 et d'autre part sur des diagrammes en bâton permettant les comparaisons avec les résultats des essais Brodeau

1°) Pour les mesures de charge de rupture

Pl. 98 : Tôles neuves épaisseur 15 mm
Pl. 99 : " " " 40 mm
Pl.100 : " " " 80 mm
Pl.101 : Tôles affectées par l'arrachement lamellaire

2°) Pour les mesures de charge de striction

Pl.106 : Tôles neuves épaisseur 15 mm
Pl.107 : " " " 40 mm
Pl.108 : " " " 80 mm
Pl.109 : Tôles affectées par l'arrachement lamellaire

En outre, les photographies des planches 113 et 115 ainsi que les examens métallographiques et par aimantation (Cf. planches n° 114 et 116) effectués au niveau des sections rompues illustrent les aspects les plus caractéristiques obtenus respectivement sur des tôles "neuves" et sur des tôles affectées par l'arrachement lamellaire.

L'ensemble des résultats obtenus montre que :

1°) L'essai de traction sur implant permet de caractériser les tôles du point de vue de leur tendance à l'arrachement lamellaire.

2°) La charge unitaire de rupture ne constitue pas un critère significatif de ce dernier point de vue.

3°) La mesure de la striction donne une information qui est directement en relation avec l'arrachement lamellaire, mais les écarts observés entre tôles "correctes" et tôles "douteuses" sont plus faibles que ceux que l'on peut obtenir sur les éprouvettes Brodeau.

4°) C'est surtout l'aspect de la cassure qui donne les indications les plus sûres, ce qui présente évidemment l'inconvénient de faire intervenir une interprétation présentant un certain caractère subjectif. Cet inconvénient n'est toutefois pas majeur car les aspects très caractéristiques obtenus sur les tôles dont le comportement lors du soudage est mauvais est suffisamment probant pour qu'un expérimentateur averti puisse tirer des conclusions nettes de cet essai. Cependant, en cas de litige il n'apparaît pas simple d'établir de critères à caractère suffisamment objectif pour être indiscutables.

Dans ces conditions, l'intérêt principal de l'essai est surtout de permettre des appréciations précieuses dans le cadre de la conduite d'une construction, par exemple pour sélectionner des matériaux ou pour lever un doute sur les qualités d'un matériau lors de sa mise en oeuvre, en particulier en raison du caractère semi-destructif de l'essai.

3.6.3. Au moyen des essais de traction sur éprouvettes soudées

3.6.3.1. Eprouvettes prismatiques soudées par faisceau d'électrons

Ces essais ont été effectués à partir de deux tranches de 10 mm de large et dont l'épaisseur correspond à celle de la tôle B 20 (issue d'une construction affectée par l'arrachement lamellaire) dans laquelle elles ont été découpées.

Les prélèvements ont été effectués respectivement au droit d'une zone apparemment saine (éprouvettes repérées B1, B2 et B3) et d'une zone défectueuse (éprouvettes repérées P1, P2 et P3) de cette tôle dont les enregistrements correspondants effectués selon la méthode conventionnelle sont consignés à la planche n° 117 annexée).

La réalisation des éprouvettes de traction a été effectuée en deux phases successives :

1) Assemblage des têtes d'éprouvettes (en acier E 36-3) à chacune des peaux des prélèvements au moyen du soudage par faisceau d'électrons.

2) Usinage des barreaux aux formes et dimensions des schémas de la figure 2 de la planche n° 93 annexée.

Les résultats obtenus sont consignés d'une part sur le tableau n° 18 joint en annexe et d'autre part sur la planche n° 118 dont les photographies illustrent l'aspect des sections rompues.

Ils permettent de constater que :

- les valeurs de charges de rupture R_m correspondant à la zone défectueuse (éprouvettes P1, P2 et P3) sont légèrement inférieures à celles obtenues au droit de la zone saine (éprouvettes B1, B2 et B3). Ces résultats mettent en valeur l'influence des hétérogénéités internes sur le comportement d'un matériau dans le sens "travers-court"

- les ruptures affectent les régions superficielles de chaque prélèvement et présentent toutes l'aspect caractéristique d'un arrachement lamellaire. Il est à noter que les zones déclarées saines comportaient un grand nombre de petites inclusions allongées dont la très faible longueur n'en permettait pas la détection lors du contrôle initial par ultrasons effectué selon la méthode conventionnelle.

- l'ensemble des éprouvettes présente des strictions et des allongements apparents très faibles bien que non mesurés en raison de la nature composite des barreaux.

Ces essais bien que longs à mettre en oeuvre et particulièrement onéreux démontrent l'intérêt d'un procédé de soudage dont la faible dilution permet l'étude du comportement des couches superficielles d'un matériau ayant subi un cycle de soudage. Il est à souligner que ce soudage présente en outre l'avantage d'être exécuté dans des conditions telle que d'éventuelles diffusions d'hydrogène ne risquent pas de fausser les résultats.

Enfin, et comme pour l'essai de traction sur éprouvettes Brodeau, la position des ruptures illustre le rôle particulièrement nocif des inclusions de forme allongées situées au voisinage immédiat de chacune des faces d'un produit laminé.

3.6.3.2. Éprouvettes cylindriques soudées par friction

Ces éprouvettes du type dissymétrique (Cf. figure 1 planche 93) ont été réalisées comme indiqué au § 3.4.2.b à partir des échantillons de tôles de 30 et 40 mm ci-après :

- tôle repérée B 30 (e = 30 mm) issue d'une construction affectée par l'arrachement lamellaire : a donné lieu à la réalisation de deux éprouvettes repérées B 30-1 et B 30-2.

- tôle "neuve" repérée 14 (e = 40 mm) et approvisionnée directement en aciérie : a donné lieu à l'exécution d'une éprouvette repérée 14.

Les résultats obtenus sont consignés en annexe d'une part sur le tableau n° 19 et la planche n° 119 dans laquelle ne figurent que les photographies correspondant aux éprouvettes 14 et B 30-1.

Ils permettent de constater :

- l'aspect caractéristiques "en palier" des sections rompues qui dans les deux cas l'ont été par arrachement lamellaire.

- les faibles valeurs des strictions diamétrales qui accompagnent ce type de décohésions.

- la position des ruptures localisées systématiquement à 1 ou 2 mm de la surface de la tôle considérée.

Comme l'essai précédent, et malgré le caractère onéreux de ce type d'éprouvette, le mode de soudage par friction permet d'étudier le comportement des couches superficielles d'un matériau.

3.6.4. Au moyen de l'essai d'emboutissage sur éprouvettes type PERSOZ

Six éprouvettes ont été réalisées comme indiqué au § 3.5.2. à partir d'un même nombre de tranches de 4 mm de large prélevées dans la tôle B 20 de 20 mm d'épaisseur (tôle issue d'une construction affectée par l'arrachement lamellaire).

Les prélèvements ont été effectués au droit de trois zones caractéristiques de la tôle précitée :

- zone saine (éprouvettes repérées BA et BD)
- zone défectueuse (éprouvettes repérées PA et PD)
- zone très défectueuse (éprouvettes repérées MA et MD).

Les tranches de tôle ont été disposées de façon symétrique (éprouvettes repérées BA, PA et MA) ou dissymétrique (éprouvettes repérées BD, PD et MD) lors de la réalisation des éprouvettes de forme carrée de 100 mm de côté (Cf. planche 95 annexée).

Les résultats obtenus sont consignés en annexe d'une part dans le tableau n° 20 et d'autre part sur la planche n° 120 où est représenté l'aspect de chacune des six éprouvettes après essai.

L'examen des résultats obtenus permet les constatations suivantes :

- Les essais effectués à partir des éprouvettes dissymétriques conduisent à l'obtention de valeurs d'efforts et d'indice Persoz inférieurs à ceux qui correspondent aux éprouvettes symétriques.

- Les efforts et indices Persoz obtenus à partir des éprouvettes symétriques diminuent lorsque le degré inclusionnaire augmente :

$$I_{p_{BA}} > I_{p_{PA}} > I_{p_{MA}}$$

- En ce qui concerne les éprouvettes dissymétriques on observe l'inégalité suivante :

$$I_{p_{MD}} > I_{p_{BD}} > I_{p_{PD}}$$

- L'examen des ruptures permet de constater une sensibilité à l'arrachement lamellaire particulièrement accusée au niveau des zones caractérisées comme défectueuses (P) et très défectueuses (M) lors de l'examen par ultrasons.

Cette constatation résulte :

- de l'aspect de rupture en paliers
- de la position superficielle de celles-ci.
- Enfin, l'essai sur éprouvettes dissymétriques est particulièrement sévère vis-à-vis de la zone superficielle disposée au centre de la plaquette.

En conclusion, cet essai qui permet d'apprécier qualitativement et localement le comportement d'un matériau dans la direction de l'épaisseur, fournit dans une certaine mesure une estimation quantitative de la sensibilité à l'arrachement lamellaire. Il ne faut pas cependant mésestimer le coût d'un tel essai.

4 - REMARQUES GENERALES SUR LES TOLES EXPERIMENTEES -

L'ensemble des essais mécaniques effectués sur les différents produits approvisionnés pour cette étude (tôles "neuves") permet de faire un certain nombre de remarques qui sont énoncées ci-après. Ces remarques qui présentent un certain intérêt, doivent cependant être considérées avec réserve car :

- 1°) Même lorsqu'une tendance générale semble se dégager, des contradictions ou exceptions plus ou moins ponctuelles existent.
- 2°) Il est évident que les échantillons approvisionnés ne peuvent être à eux seuls représentatifs d'un mode d'élaboration ou d'un traitement.
- 3°) Ces considérations sont basées sur des résultats d'essais mécaniques qui ne rendent compte que d'une façon très locale du comportement du produit considéré.

Ce point est particulièrement important surtout lorsque la propriété considérée est relative au sens travers court (Z) (Cf. §2.4 Chapitre VIII)

Les résultats obtenus au cours des essais mécaniques d'identification ou de comportement dans l'épaisseur et qui sont consignés aux tableaux n° 2 et 17 annexés ont donc lieu pour comparaison à l'établissement de diagrammes en bâton (Cf. planches n°140 à 146).

Selon le type d'essai considéré les valeurs exprimées suivant les ordonnées en fonction des états de traitement thermique, des nuances, des modes d'élaboration et éventuellement des directions X, Y et Z correspondent respectivement à la charge de rupture R_m (essais de traction sur éprouvettes proportionnelles, sur éprouvettes Brodeau et sur implant), à l'allongement $A\%$ (essais sur éprouvettes proportionnelles et éprouvettes Brodeau) et à la striction diamétrale Z_d (essais de traction sur implants) ou latérale Z_h (essai de traction sur éprouvettes Brodeau).

Compte-tenu des réserves précédemment formulées la comparaison des abaques des planches n°140 à 146 permet de formuler ci-après un certain nombre de remarques :

4.1. Influence de l'état de traitement thermique sur les propriétés R_m , $A\%$ et Z_d ou Z_h

Les comparaisons formulées ci-après, sous la forme d'inégalités ne tiennent pas compte de la nuance du matériau, du mode d'élaboration ainsi que de l'épaisseur des produits.

a) sur la charge de rupture Rm (N/mm²)

a1 : Tôles de 15 mm d'épaisseur

$$R_{mTSi} < R_{mMA1} < R_{mMc} \quad (8)$$

Cette relation s'applique aux essais sur éprouvettes proportionnelles (états recuit et non recuit) et sur éprouvettes Brodeau (état non recuit). Dans le cas des essais Brodeau sur des produits à l'état recuit on obtient :

$$R_{mMc} < R_{mMA1} < R_{mTSi} \quad (9)$$

a2 : Tôles de 40 mm d'épaisseur

- à l'état non recuit (éprouvettes proportionnelles et Brodeau)

$$R_{mMA1} < R_{mMSi} < R_{mTSi} \quad (10)$$

- à l'état recuit (éprouvettes proportionnelles et Brodeau)

$$R_{mMSi} < R_{mMA1} < R_{mTSi} \quad (11)$$

b) sur les allongements A Z (tôle de 40 mm d'épaisseur)

- Eprouvetttes proportionnelles correspondant aux états recuit et non recuit (direction X ou Y)

$$A_{ZTSi} \leq A_{ZMA1} < A_{ZMSi} \quad (12)$$

- Eprouvetttes Brodeau (directions X, Y et Z)

$$A_{ZMSi} < A_{ZTSi} < A_{ZMA1} \quad (\text{état recuit}) \quad (13)$$

et

$$A_{ZTSi} < A_{ZMSi} < A_{ZMA1} \quad (\text{état non recuit}) \quad (14)$$

c) sur les strictions latérales Zh (essais Brodeau) et diamétrales Zd (essai sur implant)

c1 : Tôles de 15 mm d'épaisseur

- Essais sur implant (direction de l'épaisseur Z)

$$Z_d Z_{Mc} < Z_d Z_{TSi} < Z_d Z_{MA1} \quad (\text{état non recuit}) \quad (15)$$

et

$$Z_d Z_{TSi} < Z_d Z_{Mc} < Z_d Z_{MA1} \quad (\text{état recuit}) \quad (16).$$

c2 : Tôle de 40 mm d'épaisseur

- Essais sur implant (direction Z)

$$Z_d Z_{TSi} < Z_d Z_{MA1} < Z_d Z_{MSi} \quad (\text{état non recuit}) \quad (17)$$

et

$$Z_d Z_{MA1} < Z_d Z_{TSi} < Z_d Z_{MSi} \quad (\text{état recuit}) \quad (18).$$

- Essais sur éprouvette Brodeau (directions X, Y, Z)

Quel que soit l'état de traitement thermique (recuit ou non recuit) on observe :

$$Zh\bar{Z}TSi < Zh\bar{Z}MSi < Zh\bar{Z}MAI \quad (19)$$

4.3. Conclusions

Les 19 relations mentionnées ci-dessus correspondent aux tendances les plus caractéristiques qui semblent se dégager des essais effectués. Malheureusement en raison de la signification contradictoire d'un certain nombre d'entre elles, aucune règle systématique et bien définie ne peut être formulée entre le comportement d'un matériau (dans le sens travers court notamment) et chacun des paramètres pris en considération (mode d'élaboration, état de traitement thermique, nuance et épaisseur des produits).

Cette affirmation résulte des constatations ci-après :

1° Les inégalités (1) et (2) indiquent que l'état recuit conduit à l'obtention des charges de rupture R_m les plus faibles lors des essais à partir des éprouvettes proportionnelles et Brodeau selon les directions X et Y. En revanche ce même état lors d'essais Brodeau dans la direction de l'épaisseur (Z) conduit à des valeurs de R_m plus élevées que celles qui sont obtenues à partir de l'état non recuit.

2° De la même façon, les inégalités (3) et (4) illustrent le rôle favorable que joue le recuit vis-à-vis de l'allongement lors d'essais de traction sur éprouvettes proportionnelles selon les directions X ou Y et l'élément défavorable qu'il constitue dans le cas d'essais Brodeau effectués dans la direction de l'épaisseur.

3° Les inégalités (6) et (7) montrent que dans le domaine des strictions latérales Z_h , les valeurs les plus élevées sont obtenues à l'état recuit sur des éprouvettes type Brodeau prélevées dans le sens du travers long (Y). Par contre, dans le sens du laminage (X) et du travers court (Z) c'est l'état non recuit qui apparaît comme le plus favorable.

4° Les relations (8) et (10) montrent que lors des essais de traction réalisés à partir d'éprouvettes proportionnelles prélevées dans des tôles de 15 mm d'épaisseur selon les directions X ou Y, les charges de rupture R_m relatives à de l'acier Martin calmé au Silicium sont supérieures à celles qui correspondent à l'acier Thomas calmé également au Silicium. En revanche un résultat inverse est observé lors d'essais identiques sur des tôles de 40 mm d'épaisseur.

5° Enfin, les inégalités (12) et (13) indiquent qu'en ce qui concerne les valeurs d'allongement obtenues à partir d'éprouvettes proportionnelles prélevées dans des tôles de 40 mm d'épaisseur, l'acier Martin calmé au Silicium conduit à l'obtention des valeurs plus élevées que l'acier Martin calmé à l'Aluminium. Par contre, pour les mêmes épaisseurs, l'acier Martin calmé à l'Aluminium apparaît comme étant le plus favorable lors d'essais sur éprouvettes Brodeau.

La majorité des observations faites se trouvent en bon accord avec ce qui est généralement admis concernant l'influence du procédé d'élaboration, de calage ou du traitement des aciers. Cependant des anomalies sont observées, elles sont la conséquence du caractère plus ou moins représentatif d'une part d'un échantillonnage limité et d'autre part du caractère local des essais mécaniques (notamment dans le sens travers-court).

CHAPITRE VIII

CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DES EXAMENS PAR ULTRASONS ET LE COMPORTEMENT DES PRODUITS LAMINES AUX SOLLICITATIONS EXERCEES DANS LA DIRECTION DE L'ÉPAISSEUR

1 - ETABLIE A PARTIR DES RESULTATS OBTENUS A L'AIDE DES METHODES D'EXAMEN PAR ULTRASONS ET CONDITIONS OPERATOIRES DEFINIES AU CHAPITRE V -

Les résultats obtenus lors des examens par ultrasons effectués selon les méthodes conventionnelles ou d'analyse fréquentielles, ont montré que la détection des hétérogénéités internes susceptibles de favoriser l'arrachement lamellaire, n'était pas systématiquement assuré.

En effet, la comparaison des résultats obtenus lors des examens par ultrasons, et, notamment selon la méthode conventionnelle d'une part, (Cf. fig. 1, planche n° 121), et des essais mécaniques sur éprouvette Brodeau d'autre part, ne permet pas d'établir une relation satisfaisante entre ces deux types d'essais.

Il apparaît en particulier, que les tôles dont les caractéristiques mécaniques dans le sens du travers-court sont les plus faibles (striction et allongements notamment) n'ont en général présenté que peu ou pas d'anomalies réfléchissantes comme en témoignent les enregistrements effectués par brûlage des planches n° 36 et 37 d'une part, et 122 à 124 d'autre part.

Dans ces dernières figurent les valeurs des allongements et des strictions latérales relevées lors des essais de traction effectués sur des éprouvettes Brodeau, type B, prélevées dans la direction de l'épaisseur des produits.

Ces résultats ne permettaient donc pas de porter un jugement de valeur sur le comportement ultérieur du matériau sous l'effet de sollicitations exercées dans la direction de l'épaisseur.

Il convenait alors à partir des informations particulièrement significatives obtenues au moyen des essais mécaniques, d'améliorer les méthodes d'examen par ultrasons, afin de répondre de façon plus satisfaisante à l'un des objectifs principaux de l'étude.

2 - ETABLIE A PARTIR DES RESULTATS OBTENUS AU MOYEN D'UNE METHODE D'EXAMEN PAR ULTRASON PARTICULIEREMENT ADAPTEE -

2.1. Orientation des travaux

Les résultats des essais mécaniques, ainsi que les examens métallographiques effectués à partir de coupes réalisées au niveau des sections rompues, confirmaient le rôle important que jouent les très fines inclusions allongées, non décelées jusqu'alors, dans l'initiation de l'arrachement lamellaire.

La faible surface de ces anomalies, ainsi que la variation très modérée d'impédance acoustique à l'interface d'une inclusion avec la matrice en acier (avant tout processus de décohésion), nécessitaient lors de la mise en oeuvre de la méthode conventionnelle dite "par réflexion", l'utilisation d'une énergie acoustique plus élevée que précédemment au niveau du défaut.

Deux solutions étaient alors envisagées pour parvenir à ce résultat :

- 1) Adoption d'une sensibilité d'examen supérieure à celle utilisée antérieurement.
- 2) Concentration supérieure du faisceau

En raison des perturbations (échos parasites) d'origines diverses, dues en particulier à la cristallisation du métal, qui apparaissent sur l'oscillogramme lorsque la sensibilité d'examen dépasse une certaine valeur, bien inférieure cependant au niveau recherché, la première solution ne peut être retenue. C'est donc dans le sens d'une meilleure focalisation de l'énergie acoustique, qu'une solution fut recherchée.

Les travaux s'orientèrent ainsi vers la mise en oeuvre de faisceaux ultrasonores permettant si possible, une analyse quasi ponctuelle des matériaux.

Une observation effectuée à l'issue des essais mécaniques de traction se révélait alors particulièrement fructueuse quant à la technique d'examen particulière à mettre en oeuvre :

En effet, l'examen après rupture des éprouvettes de traction types Brodeau d'une part, et prismatique d'autre part (Cf. planches n° 110-111 et n° 118) prélevées dans la direction de l'épaisseur et au voisinage de l'une des faces (Cf. planche n° 96) de tôles dont les caractéristiques mécaniques dans le sens du travers-court étaient particulièrement faibles, révélait que les décohésions en paliers, caractéristiques de l'arrachement lamellaire, étaient localisées dans tous les cas, dans les zones superficielles des tôles considérées. L'épaisseur maximale de ces zones est de 5 à 6 mm environ.

Il convenait donc, en fonction des résultats précités, d'orienter et d'adapter la technique d'inspection, de telle sorte que la détection des petites hétérogénéités (inclusions allongées notamment) situées principalement au voisinage de chacune des surfaces, soit assurée sur une profondeur de 5 mm environ.

2.2. Description de la technique d'examen mise en oeuvre

2.2.1. Principe

Le schéma de la figure n° 2 de la planche n° 121 montre le principe général de la méthode d'examen mise en oeuvre sur les tôles de 30 et 40 mm d'épaisseur les plus caractéristiques quant à leur comportement dans le sens travers-court.

L'obtention d'une sensibilité d'examen élevée au niveau des défauts recherchés, était réalisée grâce à l'utilisation d'un palpeur à faisceau focalisé récemment acquis, dont le rayon de courbure de l'élément piezo-électrique est particulièrement adapté aux épaisseurs des produits à contrôler (tôles de 30 et 40 mm notamment), et le diamètre de la section minimale du faisceau inférieur à 4 mm.

A partir de ces éléments, la distance palpeur-tôle était fixée à une valeur telle que le foyer théorique du faisceau dans l'acier, soit contenu dans la couche de matériau inspecté de 5 mm d'épaisseur environ, ou à la limite interne de celle-ci.

Il est important de noter qu'en raison de la présence d'un écho d'entrée important A (Cf. fig. n° 2, planche n° 121) dû à la réflexion de 88 % environ de l'énergie acoustique incidente à l'interface eau-acier, et de la zone d'ombre qui en résulte dans le produit, seule la couche superficielle du matériau située à proximité de la face opposée B peut-être inspectée. Un retournement de la tôle est donc nécessaire à l'issue de chaque examen pour un contrôle complet de celle-ci.

2.2.2. Matériel mis en oeuvre

L'appareillage de base (Métalloradar type R.7 et tiroirs sélecteurs S., cuve d'inspection automatique en immersion totale et enregistreur X - Y), est en tous points, identique à celui qui a été précédemment utilisé pour la méthode conventionnelle, et, qui a fait l'objet d'une description détaillée au § 1.2 du chapitre V.

Le palpeur émetteur-récepteur d'ondes longitudinales à faisceau focalisé, avait pour caractéristiques principales :

- une surface sensible concave de forme hémisphérique et de type mosaïque constituée par l'assemblage en croix de 4 secteurs piezo-électriques en zirconate-titanate de plomb.

- un rayon de courbure de 150 mm et, par conséquent, une distance focale dans l'eau peu différente de cette valeur.

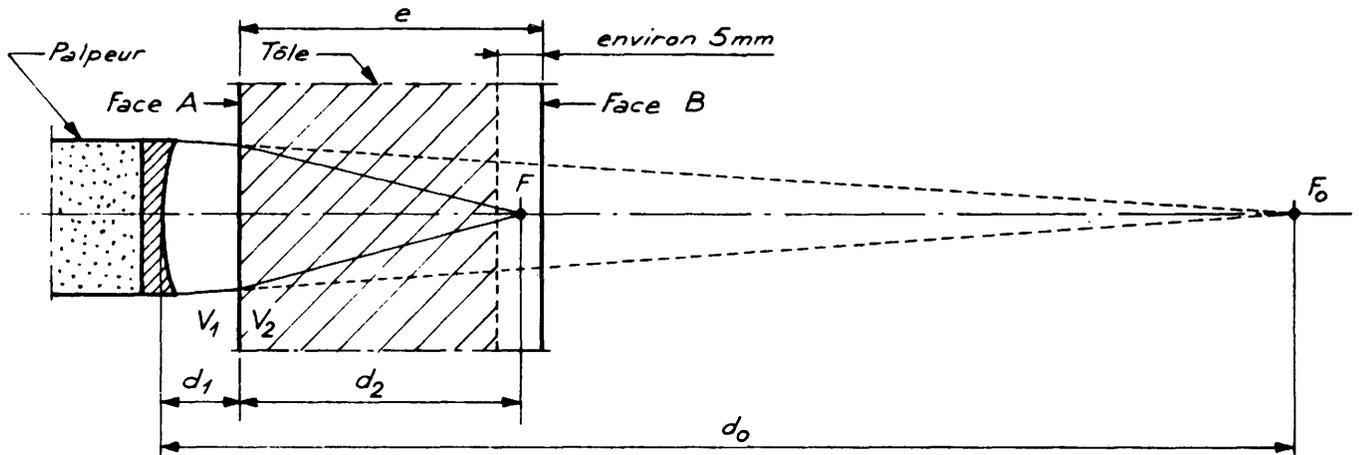
- une fréquence nominale de 10 MHz.

Le profil longitudinal du champ acoustique dans l'eau déterminé au moyen d'un réflecteur circulaire plan de 1 mm de diamètre, est représenté sur la planche n° 125.

Une coupe transversale du faisceau déterminée selon la même méthode à une distance de 150 mm du palpeur, permet d'évaluer à 4 mm environ la dimension maximale de sa section dans la région du foyer.

2.2.3. Détermination des paramètres d'examen

2.2.3.1. Distance palpeur-pièce "d₁"



La distance palpeur-pièce "d₁" (voir figure ci-dessus) doit être telle que le foyer théorique F du faisceau soit situé à 5 mm environ de la face B de la tôle contrôlée. Or d₁ peut être calculé au moyen de l'expression :

$$d_2 = (d_0 - d_1) \frac{V_1}{V_2}$$

dans laquelle :

- d₂ : distance dans l'acier du foyer F à la surface d'entrée du faisceau dans la tôle.
- d₀ : distance focale dans l'eau (prise égale à 150 mm environ)
- V₁ : vitesse des ondes longitudinales dans l'eau (1490 m par s.).
- V₂ : vitesse des ondes longitudinales dans l'acier doux (5850 m par s.).

Le tableau n° 21 suivant, donne les valeurs de d_1 pour des tôles de 30 et 40 mm d'épaisseur.

Tableau n° 21

Epaisseur tôle (mm)	Distance d_1 en mm	
	Calculée	Utilisée
30	50	50
40	10	12,5 (1)

(1) - La distance de 12,5 mm permet de rejeter le deuxième écho d'interface eau-acier au-delà du premier écho de fond dans la tôle.

2.2.3.2. Sensibilité d'examen

Les tôles de 30 et 40 mm d'épaisseur ont été contrôlées avec un même réglage de la sensibilité d'examen, dont les paramètres principaux, établis à l'aide du bloc d'étalonnage E_2 de 40 mm d'épaisseur (Cf. planche n° 14), sont indiqués au tableau n° 22 ci-après.

Tableau n° 22

Référence bloc	Fréquence d'examen (MHz)	Distance palpeur- tôle (mm)	Diamètre du trou de référence (1) (mm)	Etalonnage de la sensibilité d'examen (2)		
				Puissance (graduation)	Amplification (dB)	Valeur du signal de sortie (volts)
B_2 (e=40)	10	12,5	2	4	64	8,5 (3)

nota 1 : trou à fond plat de 2 mm de diamètre et de 5 mm de profondeur.

nota 2 : une tension de sortie de 8,5 volts provoque, en mesure proportionnelle et statique, une déviation latérale du style de l'enregistreur dont l'amplitude est égale à 24,5 mm.

pour une même valeur de la puissance et une amplification de 52 dB, l'amplitude de l'écho obtenu sur le fond plat du trou de 2 mm de diamètre, est égale à la moitié de la hauteur de l'écran de l'appareil. La tension du signal de sortie analogique est, dans ces conditions, de 7,3 volts.

nota 3 : Valeur maximale du signal de sortie.

L'examen sélectif des trous de 5 mm de profondeur et de 2 à 10 mm de diamètre du bloc B₂ d'une part, et d'un bloc de 30 mm d'épaisseur d'autre part, a donné lieu aux enregistrements proportionnels de la planche n° 126.

2.2.3.3. Position de la zone de sélection

L'enregistrement sélectif des défauts situés à proximité de chacune des faces d'une tôle, nécessite un réglage en position et en largeur de la zone de sélection (ou de surbrillance) sur le balayage horizontal de l'écran de l'appareil. Comme l'indique la figure n° 2 de la planche n° 121, ce "créneau" sera disposé le plus près possible du premier écho de fond B₁. Sa largeur e₁, fixée à 5 mm dans le cadre de cette étude, peut toutefois, être définie en fonction de la préparation de soudage qui sera adoptée, ainsi que de la sévérité des contraintes de retrait ou de bridage qui s'exerceront sur la construction envisagée.

2.3. Résultats obtenus

2.3.1. Recherche des conditions optimales de détection des inclusions affectant les zones superficielles d'une tôle sensible à l'arrachement lamellaire (Tôle B 30)

Sur la planche n° 127 figurent les enregistrements effectués sur la tôle B 30, selon la méthode conventionnelle au moyen d'un faisceau non focalisé d'une part, puis d'un faisceau focalisé à faible tache focale d'autre part.

Dans le premier cas (faisceau non focalisé), aucune anomalie n'est décelée par les deux modes d'enregistrement (brûlage et proportionnel).

Dans le second cas (faisceau focalisé), la variation de la largeur du créneau de sélection et les enregistrements proportionnels correspondants, mettent en évidence la répartition des inclusions dans des couches d'épaisseurs respectivement égales à 17, 12 et 5 mm.

Les alignements d'inclusions visibles lors de l'examen des couches de 12 et 5 mm d'épaisseur, sont contenus dans une zone superficielle relativement saine de la tôle E 30.

2.3.2. Recherches des inclusions au voisinage de chacune des faces de tôles dont les caractéristiques mécaniques dans la direction de l'épaisseur sont particulièrement significatives de la plus ou moins grande sensibilité à l'arrachement lamellaire.

2.3.2.1. Tôles présentant de bonnes caractéristiques dans le sens du travers-court.

Les enregistrements proportionnels des planches n° 128 à 132 donnent les résultats obtenus lors des examens réalisés à partir de chacune des faces A et B des tôles n° 11, 10 II et 19 II de 40 mm d'épaisseur.

Sur ces planches, sont consignées les valeurs des allongements et strictions latérales obtenues au cours des essais de traction sur éprouvettes Krodau, type E.

L'ensemble de ces enregistrements montre que les régions superficielles des tôles précitées, ne comportent pratiquement pas d'hétérogénéités réfléchissantes.

La recherche des inclusions au voisinage de la face B de la tôle 10 II (Cf. planche n° 133) a mis quelques alignements d'inclusions éparses en évidence. Cet enregistrement est comparé à celui d'une portion relativement saine de la tôle E 30 dont une autre partie a donné lieu à des allongements et strictions très faibles dans la direction de l'épaisseur.

2.3.2.2. Tôles présentant de très faibles caractéristiques mécaniques dans le sens du "travers-court".

Les planches n° 134 à 137 illustrent les résultats obtenus lors du contrôle des régions superficielles des tôles repérées 5 I et 8 I de 40 mm d'épaisseur.

Les valeurs des allongements et strictions qui y sont consignées ont été obtenues au cours d'essais de traction sur éprouvettes Krodau prélevées dans la direction de l'épaisseur et au droit des joues repérées sur chacune des planches. Ces dernières, comme les enregistrements obtenus permettent de le constater, correspondent à des régions dans le voisinage desquelles de nombreuses distorsions de la trajectoire du style enregistreur sont observées. Une étude métallographique des zones saines (ZS) et défectueuses (ZD) (Cf. planches n° 138 et 139), réalisée à partir de coupes effectuées parallèlement à la direction du laminage (X) permet les constatations suivantes :

- Planche n° 138 : correspond à l'examen de la tôle 5 I au voisinage de la face E.

La zone déclarée saine à l'issue de l'examen par ultrasons, présente quelques petites inclusions éparses de forme nodulaires ou allongées dont la longueur unitaire est inférieure à 0,2 mm. Cet aspect métallographique correspond bien aux faibles distorsions observées au droit de cette zone.

L'examen de la zone défectueuse met en évidence de nombreuses inclusions filiformes et allongées dont la longueur maximale est inférieure ou égale à 0,5 mm.

- Planche n° 139 : correspond à l'examen de la tôle 8I au voisinage de la face B.

De très nombreuses petites inclusions de forme nodulaire sont observées au droit de la zone saine. En revanche, aucune hétérogénéité de forme allongée n'y est décelée.

L'examen de la zone défectueuse met par contre, en évidence, de très fines inclusions allongées et superposées dont la longueur est inférieure ou égale à 0,6 mm environ.

2.4. Conclusion

L'ensemble des résultats précédents permet donc d'établir une corrélation satisfaisante entre les enregistrements obtenus à partir de palpeur dont le faisceau convenablement focalisé, explore un volume proche de la surface des tôles et les caractéristiques mécaniques déterminées dans la direction de l'épaisseur, notamment en ce qui concerne l'allongement et la striction.

Par ailleurs, l'observation des enregistrements a montré que les hétérogénéités responsables des incidents par arrachement, sont souvent groupées dans des zones particulières d'un produit laminé, ce qui rend aléatoire tout jugement de valeur global extrapolé à partir d'essais locaux (mécaniques en particulier).

CHAPITRE IX

CONCLUSION GENERALE

L'étude bibliographique (Cf. rapport IS n° 5 556) ainsi que l'analyse d'un certain nombre de cas industriels récents d'arrachement lamellaire (Cf. rapport IS n° 5 559) ont montré le rôle important que jouent les inclusions allongées et filiformes dans l'initiation et le développement de ce phénomène lorsqu'elles affectent les zones superficielles d'une tôle.

Il convenait alors, et c'était l'objet de la présente étude, de rechercher les moyens susceptibles de mettre ce type particulier d'hétérogénéité en évidence et d'en apprécier les effets éventuels sur le comportement du matériau vis à vis des contraintes appliquées parallèlement à la direction du "travers-court".

En vue d'une exploitation industrielle ultérieure éventuelle, la méthode d'investigation retenue devait ne pas conduire à une altération des produits et par conséquent être non destructive. C'est en raison de leurs propriétés physiques d'une part et de leur remarquable faculté d'adaptation au contrôle des tôles d'autre part, que les ultrasons ont été essentiellement retenus et plusieurs techniques d'application étudiées.

ESSAIS NON DESTRUCTIFS

La présence d'inclusions dans les matériaux laminés provoque lors du contrôle par ultrasons de ceux-ci, des perturbations plus ou moins grandes dans la propagation de l'énergie acoustique. Toutefois, le niveau moyen de celles-ci est généralement faible pour les sensibilités d'examen requises par les normes ou spécifications diverses se rapportant au contrôle des tôles dites fortes ($e \geq 12$ mm).

La détection de ces hétérogénéités internes peut a priori être envisagée sous deux formes différentes mais complémentaires :

- soit en mettant individuellement ou globalement en évidence une ou plusieurs inclusions par l'intermédiaire de l'énergie qu'elles réfléchissent (méthode conventionnelle dont la mise en oeuvre devra cependant être affinée au égard au faible pouvoir réfléchissant des inclusions).

- soit par une appréciation globale de leur présence en mesurant l'absorption de l'énergie acoustique qu'elles provoquent principalement par diffusion. L'évaluation de l'affaiblissement des impulsions réfléchies (ou échos de fond) sur la paroi postérieure de la tôle a été, dans cette étude, effectuée au moyen d'une méthode d'examen originale dite d'analyse fréquentielle.

Les résultats obtenus aux cours des différentes expérimentations effectuées permettent de tirer les conclusions suivantes :

1°) La détection des inclusions de forme allongée peut être assurée à partir d'une longueur unitaire de quelques dixièmes de millimètres, et cela par réflexions d'impulsions d'ondes longitudinales au moyen de la méthode conventionnelle mais sous réserve cependant de l'utilisation simultanée :

a) - d'une sensibilité d'examen relativement élevée (en général très supérieure à celle qui est spécifiée par les normes ou cahiers des charges en vigueur)

b) - de fréquences d'examen supérieures ou égales à 5 MHz.

c) - de faisceaux focalisés émis par des éléments piézo-électriques dont le rayon de courbure (ou celui de la lentille dans le cas d'une focalisation par élément additionnel) et par suite la distance focale sont adaptés à l'épaisseur des produits à contrôler.

d) - d'un dispositif de sélection permettant de ne prendre en considération que les inclusions affectant la région superficielle postérieure de la tôle ; (le contrôle de la zone superficielle antérieure nécessite un retournement du produit à l'issue du premier examen).

e) - d'un système d'enregistrement approprié.

Il apparaît que le mode d'enregistrement proportionnel est plus sensible que le système opérant par brûlage. En effet, bien que l'on observe sur les enregistrements proportionnels des distorsions (qui sont en partie la conséquence de l'inertie de l'équipage mobile), ce système donne des images dont l'interprétation est beaucoup plus sûre car :

- dans le cas du "brûlage" il est nécessaire de définir un seuil de déclenchement du système d'enregistrement (correspondant à un niveau d'énergie réfléchi)

- dans le cas du système proportionnel, chaque anomalie se traduit par une déviation du style qui rend compte de l'énergie réfléchi (*).

2°) La méthode conventionnelle associée à l'appareillage mis en oeuvre lors de l'étude, ne permet pas de définir sur les enregistrements les zones qui présentent une absorption anormale et par suite ne peut déceler les inclusions de forme nodulaires qui pourraient, en forte concentration, favoriser l'arrachement lamellaire.

Il conviendrait toutefois pour ce faire d'étudier ultérieurement les possibilités offertes par les solutions a et b décrites au chapitre V du présent rapport.

3°) L'utilisation des ondes transversales ne présente qu'un intérêt très limité et leur utilisation n'offre aucun avantage pratique compte-tenu des résultats obtenus.

4°) L'analyse fréquentielle ne permet pas, compte tenu du matériel actuellement disponibles, une détection satisfaisante des inclusions dans des conditions normales d'examen.

./.

(*) Par ailleurs, il convient de souligner le fait que l'allure générale des enregistrements ainsi obtenus rend compte, subjectivement, de l'état inclusionnaire des produits sondés.

En effet, cette méthode présente une trop grande sensibilité vis à vis de l'état de surface des tôles dont les irrégularités même légère, donc acceptables, provoquent dans la répartition spectrale de l'énergie réfléchie des variations supérieures à celles que sont susceptibles de créer les inclusions. Toutefois, cette méthode permet dans les meilleures conditions, comme certains enregistrements obtenus l'ont montré, la mise en évidence de zones rendues anormalement absorbantes par suite de la présence d'un nombre élevé de très petites inclusions.

Il n'est pas exclu alors de penser que l'analyse fréquentielle permette d'obtenir des informations intéressantes soit dans des conditions particulières d'examen où la rectification de chacune des faces d'une tôle pourrait être envisagée soit encore sur des produits présentant naturellement un état de surface excellent (tôles en acier inoxydable notamment).

ESSAIS DESTRUCTIFS

Les essais destructifs qui font l'objet de la seconde partie de cette étude ont pour objets essentiels :

- 1°) L'identification des produits étudiés
- 2°) L'étude critique des possibilités offertes par les différents essais pratiqués
- 3°) L'étude de nouveaux essais ou de perfectionnements à apporter aux essais existants
- 4°) D'établir une corrélation entre les résultats donnés par les essais non destructifs et destructifs

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

1) L'identification d'un certain nombre de tôles pour lesquelles, par suite d'une omission dans leur repérage initial, existait une ou plusieurs indéterminations concernant soit le mode d'élaboration, soit l'état de traitement thermique, soit le sens du laminage a été effectuée.

2) L'étude critique des possibilités offertes par les différents types d'essais mis en oeuvre pour l'étude du comportement des tôles dans le sens de l'épaisseur a permis d'effectuer un certain nombre d'observations qui contribuent à mieux faire apprécier les possibilités et limites de chacun d'eux. Ces observations ont ensuite été mises à profit pour améliorer certaines procédures d'essais et pour en mettre au point de nouvelles.

Ainsi qu'il a été précisé au chapitre VII, ces essais peuvent être classés en deux catégories :

- les essais qui ne font pas intervenir le soudage comme moyen de produire la sollicitation dans la direction de l'épaisseur ou qui ne le font éventuellement que pour assurer la liaison entre la partie active de l'éprouvette et les pièces auxiliaires (têtes d'amarrage en particulier).
- les essais dans lesquels on associe volontairement les effets du cycle de soudage aux contraintes d'origine externe pour produire ou favoriser l'arrachement lamellaire.

Les expérimentations effectuées à partir de ces deux types d'essais et selon l'orientation initialement assignée aux travaux (Cf. § 4.3.2. du chapitre VII) permettent de formuler les constatations suivantes :

a) les essais mécaniques et en particulier ceux qui ont été mis au point dans le cadre de la présente étude fournissent une appréciation qualitative doublée pour certains d'entre eux d'une estimation quantitative satisfaisante de la sensibilité d'examen d'un produit à l'arrachement lamellaire.

b) les essais de traction effectués avec ou sans intervention du soudage donnent en général les informations les plus complètes et notamment :

- la charge de rupture R_m
- la limite apparente d'élasticité R_e (pour certains d'entre eux seulement)
- l'allongement $A \%$ (pour certains d'entre eux seulement)
- la striction diamétrale (ZD) ou latérale (Zh) selon la nature de l'éprouvette utilisée.

c) la charge de rupture et la limite apparente d'élasticité ne constituent pas un critère déterminant, l'allongement et la striction (diamétrale ou latérale) qui caractérisent la capacité de déformation d'un matériau sont par contre, lorsqu'ils résultent d'essais effectués dans la direction de l'épaisseur, particulièrement significatifs vis à vis de la sensibilité d'un matériau à l'arrachement lamellaire.

En outre, la comparaison des allongements et des strictions obtenus successivement selon les directions X, Y et Z d'un matériau laminé fournit dans une certaine mesure une estimation relative de cette sensibilité.

d) l'expression graphique des résultats des essais de traction sur éprouvettes Brodeau effectués sur des tôles issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire permet de remarquer que les valeurs d'allongement et de striction latérales les plus élevées s'accompagnent généralement d'une capacité de déformation ($A \%$ et Z) dans le sens du travers long (Y) supérieure à celle qui correspond au sens du laminage (X). Ce phénomène ne présente pas le même caractère systématique pour les tôles dites "neuves".

e) tous les essais dont la mise au point ou la procédure d'application ont été faites ou améliorées au cours de l'étude permettent d'apprécier le comportement des couches superficielles d'une tôle.

Cette caractéristique qui présente un intérêt fondamental dans le contexte de l'étude est réalisée soit par :

- la forme de l'éprouvette (essai Brodeau)
- la mise en oeuvre d'un procédé de soudage à faible dilution (par faisceau d'électrons ou par friction notamment) lors de la réalisation d'éprouvettes composites
- la fixation par soudage d'un goujon sur la peau de la tôle à étudier (cet essai ne peut être mis en oeuvre que sur des tôles dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 15 mm)/

f) contrairement à la majorité des essais existants, l'arrachement d'implant présente l'avantage de n'être que semi-destructif, donc applicable à une construction en cours de réalisation sans dommage pour celle-ci. Il faut noter cependant que la détermination de la striction diamétrale de la section rompue, seul élément permettant ici une appréciation quantitative de la sensibilité à l'arrachement lamellaire, peut dans certains cas être rendue délicate. Des erreurs peuvent en résulter et il convient de toute façon de porter une attention particulière à l'aspect de la zone rompue qui rend compte, certes subjectivement mais qualitativement cependant, de cette sensibilité :

g) la plupart des essais destructifs fournissent, par l'aspect de la cassure une appréciation qualitative de la sensibilité à l'arrachement lamellaire d'un échantillon de matériau. Cette constatation est particulièrement vraie pour les essais de traction et d'emboutissage sollicitant les zones superficielles des produits.

h) Enfin, les résultats fournis par l'ensemble des essais mécaniques (destructifs et semi-destructifs) ne sont représentatifs que de la portion de tôle dans laquelle les éprouvettes ont été prélevées et non de la totalité du produit.

Ce caractère local se trouve en outre accentué par la répartition très hétérogène des inclusions qui a été fréquemment observée lors du contrôle par ultrasons de certaines tôles.

CORRÉLATION ESSAIS NON DESTRUCTIFS/ESSAIS DESTRUCTIFS

L'étude effectuée a permis de montrer qu'il est possible de définir, par des essais non destructifs la sensibilité d'un produit laminé au phénomène d'arrachement lamellaire. Ceci est démontré par l'excellente corrélation qui a été trouvée entre les résultats d'examen ultrasonores et les résultats d'essais Brodeau.

Cependant les examens ultrasonores qui ont pour objet d'établir cette corrélation doivent être faits dans des conditions bien particulières ; il requièrent notamment l'utilisation simultanée d'une fréquence d'examen relativement élevée d'un faisceau acoustique focalisé de petit diamètre au niveau des défauts recherchés et enfin d'une technique d'examen appropriée.

A la lumière des travaux entrepris dans le cadre de cette étude, et sans préjuger des développements qui pourront être présentés ultérieurement il semble donc possible d'affirmer que la méthode de contrôle non destructif proposée fournit des indications utiles sur la présence, la situation dans l'épaisseur et la répartition des inclusions qui sont à l'origine des incidents liés à l'arrachement lamellaire. Ceci est d'autant plus intéressant que c'est la première fois que la mise en oeuvre des ultrasons conduit à une semblable conclusion.

A N N E X E

LISTE DES TABLEAUX ANNEXES

- Tableau n° 1 : Caractéristiques principales des tôles ayant fait l'objet d'une commande en aciérie ("tôles neuves")
- Tableau n° 2 : Résultats obtenus en analyse chimique, en essais de résilience et en essais de traction effectués sur les "tôles neuves"
- Tableau n° 3 : Caractéristiques principales des tôles issues de constructions affectées par l'arrachement lamellaire
- Tableau n° 4 : Résultats des analyses chimiques effectuées sur des prélèvements de tôles issues de constructions soudées affectées par l'arrachement lamellaire
- Tableau n° 5 : Caractéristiques des palpeurs utilisées
- Tableau n° 6 : Caractéristiques des palpeurs utilisées lors des examens complémentaires manuels
- Tableau n° 8 : Valeurs de la distance palpeur-pièce "he" utilisées lors de l'étude de la variation de l'amplitude maximale de l'écho de réflexion obtenu sur des trous à fond plat
- Tableau n° 9 : Paramètres de réglage utilisés lors des essais d'enregistrements "par brûlage" réalisés au moyen des palpeurs de 3,5 et 10 MHz à faisceaux non focalisés et des 3 blocs témoins B1, B2 et B3
- Tableau n° 10 : Paramètres d'étalonnage utilisés lors des essais d'enregistrements "par brûlage" réalisés au moyen du palpeur de 5 MHz focalisant et de 3 blocs témoins B1, B2 et B3
- Tableau n° 11 : Valeurs de la sensibilité (puissance et amplification) et du signal de sortie correspondant utilisées lors des examens par ultrasons effectués selon la méthode conventionnelle
- Tableau n° 13 : Résultats comparatifs obtenus lors de l'examen par ultrasons effectués suivant la méthode conventionnelle sur des tôles de 15 mm d'épaisseur à l'aide de faisceaux focalisés et non focalisés
- Tableau n° 15 : Caractéristiques principales des différents types d'essais mécaniques décrits dans le rapport bibliographique et dont la mise au point est antérieure à l'étude.
- Tableau n° 16 : Caractéristiques principales des essais mécaniques mis au point ou améliorés dans le cadre de l'étude.

Tableau n° 17 : Résultats des essais mécaniques de traction sur implants et sur éprouvettes Brodeau type B

Tableau n° 18 : Essais de traction sur éprouvettes parallélépipédiques soudées par faisceau d'électrons

Tableau n° 19 : Essais de traction sur éprouvettes cylindriques soudées par friction

Tableau n° 20 : Résultats des essais d'emboutissage effectués sur des éprouvettes type PERSOZ

TABLEAU N° 1

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES TOLES AYANT FAIT L'OBJET
D'UNE COMMANDE EN ACIERIE (TOLES "NEUVES")

Epaisseur des tôles (mm)	Nuance de l'acier	Elaboration (1)	Etat (1)	Identification	Nombre de tôles (2)
15	E 24 - I	Thomas calmé au silicium	Non recuit	A	4
	"	"	Recuit	K	4
	E 24 - 2	Martin semi calmé	Non recuit	C	4
40	"	"	Recuit	M	4
	E 24 - 3	Martin calmé à l'aluminium	Non recuit	D	4
	"	"	Recuit	N	5
80	E 26 - I	Thomas calmé au silicium	Non recuit	B	4
	"	"	Recuit	L	4
	E 26 - 2	Martin calmé au silicium	Non recuit	E	4
	"	"	Recuit	O	4
	E 26 - 3	Martin calmé à l'aluminium	Non recuit	G	4
	"	"	Recuit	P	4
80	E 36 - 3	Martin calmé à l'aluminium	Non recuit	H	5
	"	"	Recuit	R	4

(1) et (2) voir Chapitre IV § 1 du rapport

TABLEAU N° 3

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES TOLES ISSUES DE CONSTRUCTIONS
AFFECTEES PAR L'ARRACHEMENT LAMELLAIRE

Repérage de la tôle	Nuance de l'acier	Dimensions de l'échantillon			Origine de la tôle
		Epaisseur (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	
B 20	E 36 - 3	20	400	400	Poutre en caisson
B 30	E 36 - 3	30	400	400	Poutre en caisson
A 110	E 24 (I)	110	250	200	Bride
C 88	E 26 (I)	88	620	300	Bras de poussée
C 112	E 26 (I)	112	670	360	Bras de poussée

(I) Nuances non précisées mais déduites des essais mécaniques et analyses chimiques effectués par l'Institut de soudure.

TABLEAU N° 4

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES EFFECTUEES SUR DES PRELEVEMENTS DE TOLES ISSUS
DE CONSTRUCTIONS SOUDEES AFFECTEES PAR L'ARRACHEMENT LAMELLAIRE

N.B Les indices "s" et "c" indiquent que les analyses ont été, pour les échantillons considérés, exécutées soit dans une zone superficielle (s), soit dans la partie centrale (c).

Repère des prélèvements	RESULTATS EXPRIMES EN %												
	C	Mn (1)	Si (1)	Al (1)	S	P	N	Cr (1)	Ni (1)	Mo (1)	Cu (1)	Ti (1)	Nb (1)
B 20	0,14	1,40	0,37	0,011	0,025	0,027	0,007	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,05	≤ 0,02	≤ 0,05
B 30	0,14	1,30	0,34	0,012	0,025	0,028	0,007	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,05
C 88 s	0,12	0,91	0,27	0,032	0,050	0,027	0,012	0,14	0,14	≤ 0,05	0,32	≤ 0,02	≤ 0,05
C 88 c	0,12	0,93	0,26	0,025	0,047	0,027	0,012	0,13	0,14	≤ 0,05	0,31	≤ 0,02	≤ 0,05
A 110 s	0,16	0,69	0,10	0,055	0,021	0,012	0,009	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,03	≤ 0,02	≤ 0,05
A 110 c	0,15	0,71	0,12	0,051	0,020	0,011	0,009	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,04	≤ 0,02	≤ 0,05
C 112 s	0,13	0,91	0,23	0,030	0,050	0,029	0,012	0,14	0,16	≤ 0,05	0,31	≤ 0,02	≤ 0,05
C 112 c	0,14	0,98	0,25	0,025	0,056	0,030	0,013	0,15	0,17	≤ 0,05	0,32	≤ 0,02	≤ 0,05
Erreurs maxi.	0,002	0,03	0,02	0,005	0,002	0,002	0,002	0,05	0,05		0,02		

(1) Dosages effectués par spectrométrie.

TABLEAU N° 5

Caractéristiques des palpeurs utilisés						
Types	Références	N°	Caractéristiques des éléments piézo - électriques			
			Fréquence (MHz)	Diamètre (mm)	Nature	Rayons de courbure (mm)
Faisceaux	485 A/EL	I7	2	20	Zirconate de titanate de plomb	
non	"	I10	3	15	"	
focalisés	484 A/EL	20	5	20	"	
	"	I13	5	10	"	
	"	I18	10	10	"	
Faisceaux	I207 A/EL	01	2	30	Zirconate de titanate de plomb	150
focalisés	I200 C/EM	04	3	60	"	800
	484 A/EL	49	5	10	"	50
	6020 /EL (★)	I4	10	20	"	150

★ Ce palpeur n'a été approvisionné et mis en oeuvre qu'à un stade avancé de l'étude.

T A B L E A U N° 6

CARACTERISTIQUES DES PALPEURS UTILISES LORS DES EXAMENS COMPLEMENTAIRES MANUELS				
TYPES D'ONDES	REFERENCES PALPEURS	FREQUENCES (MHz)	DIAMETRES (mm)	NATURE ET CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS PIEZO-ELECTRIQUES
Longitudinales	MQ4	4	10	Quartz taille X non protégé
	MB 4F	4	10	Titanate de baryum - protection dure par lamelle de quartz
	SMB 12	12	6	Titanate de baryum non protégé
Transversales	MB 4Y (1)	4	15	Quartz taille Y
	MWB 70 (2)	4	10 x 10	Titanate de baryum

Nota 1 : Ce palpeur comporte un élément piézo-électrique en quartz taille Y qui émet des ondes transversales ou de cisaillement perpendiculairement à la surface du matériau

Nota 2 : L'élément piézo-électrique de ce palpeur est en titanate de baryum de forme carrée.

TABLEAU N° 8

Repères Blocs	Palpeurs			he (mm)												
	f _{MHz}	D _{mm}	l _{o_{mm}}	10	20	30	40	50	60	70	80	100	125	150	1175	200
B1 (e = 15)	3	15	114	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
	5	10	84,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	10	10	169	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x
B2 (e = 40)	3	15	114	12(1)	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
	5	10	84,5	12	x	x	x	x	x	x	x	x				
	10	10	169	12	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x
B3 (e = 80)	3	15	114		22(2)	x	x	x	x	x	x	x	x			
	5	10	84,5		22	x	x	x	x	x	x	x				
	10	10	169		22	x	x	x	x	x	x			x	x	x

(1) et (2) Ces distances représentent pour les épaisseurs de tôles considérées, les valeurs minimales de la distance palpeur-pièce en dessous desquelles au moins deux échos dûs à la réflexion du faisceau ultrasonore à l'interface eau-acier précèdent le premier écho de fond dans le matériau.

TABEAU N° 9

PARAMETRES DE REGLAGE UTILISES LORS DES ESSAIS D'ENREGISTREMENTS
 "PAR BRULAGE" REALISES AU MOYEN DES PALPEURS DE 3, 5 ET 10 MHz
 A FAISCEAUX NON FOCALISES ET DES 3 BLOCS TEMOINS B1, B2 ET B3

REFERENCE BLOC	FREQUENCE D'EXAMEN (MHz)	DISTANCE he (mm)	DIAMETRE DU PLUS PETIT TROU DECELABLE (mm)	VALEUR DU SIGNAL DE SORTIE COR- RESPONDANT (volt)	ETALONNAGE CORRESPONDANT DE LA SENSIBILITE D'EXAMEN	
					PUISSANCE	AMPLIFICATION (dB)
B1 (e = 15)	3	20	4	3,2	1	37
	5	-	3	3,5	1	39
	10	-	3	3,1	1	63
B2 (e = 40)	3	30	3	3	1	42
	5	-	3	4,3	1	50
	10	-	3	2,4	1	67
B3 (e = 80)	3	40	4	3	1	46
	5	-	4	3,7	1	56
	10	-	4	2,7	6	70

TABLEAU N° 10

PARAMETRES D'ETALONNAGE UTILISES LORS DES ESSAIS D'ENREGISTREMENTS "PAR BRULAGE" REALISES AU MOYEN DU PALPEUR DE 5 MHz FOCALISANT

ET DE 3 BLOCS TEMOINS B1, B2 ET B3

REFERENCE DU BLOC	DISTANCE he (mm)	DIAMETRE DU PLUS PETIT TROU DECELA- BLE (mm)	VALEUR DU SIGNAL DE SORTIE COR- RESPONDANT (volts)	ETALONNAGE CORRESPONDANT DE LA SENSIBILITE D'EXAMEN	
				PUISSANCE	AMPLIFICATION (dB)
B1 (e = 15)	15	3	3,5	1	29
B2 (e = 40)	15	6	6,5	1	43
B3 (e = 80)	22	6	3,0	1	47

TABLEAU N° 11

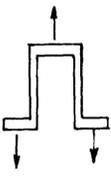
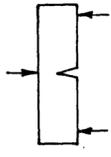
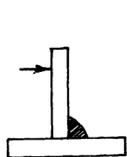
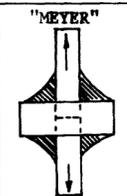
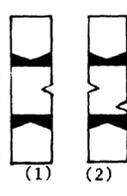
TYPE DE PALPEUR UTILISE	EPAISSEUR A CONTROLER (en mm)	ETALONNAGE DE LA SENSIBILITE			
		DIAMETRE DU TROU DE REFERENCE (en mm)	TENSION DU SIGNAL DE SORTIE CORRESPONDANT (volts)	PUISSANCE (GRADUATION)	AMPLIFICATION (décibels)
faisceau non focalisé (f = 5 MHz)	15 ≤ e ≤ 30	3 (Bloc B1)	3,5	1	39
	40	3	4,3	1	50
	80 ≤ e ≤ 112	4	3,7	1	56
faisceau focalisé (f = 5 MHz)	15	3	3,5	1	29

TABLEAU N° 13

RESULTATS OBTENUS	
<p>Nombre de tôles de 15 mm d'épaisseur examinées à l'aide de 2 palpeurs</p>	<p>palpeur f = 5 MHz, Ø = 10 mm faisceau non focalisé</p>
	<p>palpeur f = 5 MHz, Ø = 10 mm faisceau focalisé</p>
<p>16</p>	<p>Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut</p>
	<p>Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones défectueuses</p>
<p>15</p>	<p>Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut</p>
	<p>Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones défectueuses</p>
<p>1</p>	<p>Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut</p>
	<p>Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones défectueuses</p>
<p>5</p>	<p>Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut</p>
	<p>Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones défectueuses</p>
<p>11</p>	<p>Tôles n'ayant donné lieu à aucun enregistrement de défaut</p>
	<p>Tôles ayant donné lieu à l'enregistrement de 1 ou plusieurs zones défectueuses</p>

TABLEAU N° 15

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES DIFFERENTS TYPES D'ESSAIS MECANQUES
DECRITS DANS LE RAPPORT BIBLIOGRAPHIQUE ET DONT LA MISE AU POINT
EST ANTERIEURE A L'ETUDE

Type d'éprouvette	Nature de l'essai	Désignation et forme de l'éprouvette	Possibilités offertes	Avantages	Inconvénients
EPROUVETTES NON SOUDEES	Traction	"BRODEAU"  type A	- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . A % (allongement) . Z (striction latérale) selon les directions : <ul style="list-style-type: none"> . du laminage (X) . du travers long (Y) . du travers court (Z) - Allure de la rupture	- Permet d'étudier le comportement des zones superficielles d'une tôle - Comparaison possible des valeurs de Rm, A % et Z obtenues dans les directions X, Y et Z - Mise en oeuvre possible sur tôle de faible épaisseur (e > 6 mm)	- Essai destructif - Réalisation délicate et onéreuse de l'éprouvette - Influence non négligeable des stries d'usinage et congés de raccordement sur le comportement de l'éprouvette - Appréciation difficile de A %
	Traction	Prismatique ou cylindrique 	- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . Re (limite d'élasticité) . A % (allongement) . Z (striction diamétrale ou transversale) selon les directions : <ul style="list-style-type: none"> . X . Y . Z - Aspect de la section rompue	- Permet une comparaison des valeurs de Rm, Re, A % et Z obtenues dans les directions X, Y et Z - Réalisation aisée et technique d'essai éprouvée	- Essai destructif - Ne permet pas d'étudier le comportement des zones superficielles des tôles - Ne peut être mis en oeuvre dans le sens du travers court que sur les tôles de forte épaisseur (e > 50 mm)
	Résilience	Prismatique  - entaille en U - " en V	- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . K (U ou V) à différentes températures	- Permet une comparaison des valeurs de résilience obtenues pour une même température et une même forme d'entaille dont le fond est respectivement parallèle aux directions X, Y et Z - Permet d'apprécier l'état de traitement thermique - Réalisation aisée et technique d'essai éprouvée	- Essai destructif - Ne peut être mis en oeuvre dans le sens du travers court (Z) que sur les tôles fortes - Ne permet pas d'étudier le comportement des zones superficielles des tôles
EPROUVETTES SOUDEES	Traction	"FARRAR DOLBY" 	- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) - Tracer de la courbe efforts-déformation - Aspect de la section rompue	- Toute l'épaisseur de la tôle à éprouver peut être affectée par l'essai - Association des contraintes dues au soudage et de l'effort de traction - Possibilité de prélever un certain nombre d'éprouvettes de traction dans un assemblage soudé de ce type - Réalisation de l'éprouvette relativement simple mais longue	
	Traction	"ELLIOTT" 	- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . Re (limite d'élasticité) . A % (allongement) . Z (striction) - Position et aspect de la section rompue - Relation entre Rm, Re, A % et Z et : <ul style="list-style-type: none"> . la teneur en inclusions . la teneur en soufre . le procédé de soudage mis en oeuvre . le nombre de passes 	- L'éprouvette permet l'étude du comportement des zones de liaison et thermiquement affectées du métal de base - L'essai est conventionnel et éprouvé	- L'essai n'est réalisable que sur tôles de moyenne ou forte épaisseur (e > 30 mm) - Les zones du métal de base à étudier ne représentent qu'une faible partie de l'éprouvette - Prélèvement de l'éprouvette de traction assez long et nécessitant le dépôt d'un volume de métal fondu relativement important
	Pliage associant traction et flexion par choc	CLIP-TEST ou TAB TEST 	- Permet l'appréciation de la sensibilité de la tôle à l'arrachement lamellaire définie conventionnellement par le rapport : $\frac{A_M}{A_W + A_M} \times 100 \%$ où A _w : section rompue dans le métal fondu A _M : section rompue dans la zone thermiquement affectée du métal de base	- Eprouvette simple à réaliser	- La forme de l'assemblage conduit, sauf bridage extérieur, à un retrait libre - L'appréciation des valeurs de A _w et A _M peut être difficile
	Traction	"MEYER" 	- Permet la détermination de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) - Aspect de la surface rompue	- D'après sont auteur cet essai permet d'établir une relation entre la valeur de Rm et la sensibilité du produit à l'arrachement lamellaire	- Les zones superficielles du matériau sont affectées par le soudage - La réalisation de l'éprouvette demande un usinage relativement important
EPROUVETTES SOUDEES	Traction		- Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm . Re . A % . Z - Influence de la direction du prélèvement (X, Y ou Z) sur des valeurs précédentes - Influence et appréciation de : <ul style="list-style-type: none"> . teneur en inclusion . teneur en soufre - Etat de traitement thermique	- L'essai présente des possibilités importantes, est conventionnel et éprouvé	- Les zones superficielles du matériau sont affectées par le soudage des têtes d'amarrage - La réalisation de l'éprouvette est assez longue
	Résilience	Prismatique  (1) : à simple entaille (2) : à double entailles décalées ("WATANABE")	- Relation entre les propriétés mécaniques (résilience et déformation) et : <ul style="list-style-type: none"> . la direction du prélèvement (X, Y ou Z) . l'épaisseur de la tôle de base . la température d'essai . l'état de traitement thermique du matériau (normalisation ou relaxation) . la teneur en soufre . la teneur en inclusions . l'écartement séparant la racine des deux entailles (2) - Sensibilité à l'arrachement lamellaire obtenu lors de l'utilisation de l'éprouvette à double entaille par l'expression : $\frac{lcr}{l_0}$	- Permet d'apprécier quantitativement et conventionnellement la sensibilité à l'arrachement lamellaire d'un matériau à l'aide de l'éprouvette à double entaille	- Les zones superficielles du matériau sont affectées par le soudage des extrémités de chaque éprouvette - Eprouvette assez longue à réaliser

Le soudage est volontairement associé à l'essai

Le soudage n'est qu'un agent auxiliaire de liaison

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES ESSAIS MECANIQUES
MIS AU POINT DANS LE CADRE DE L'ETUDE

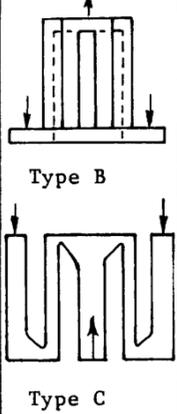
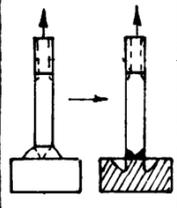
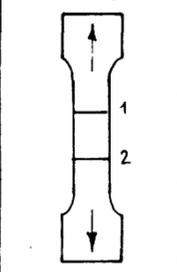
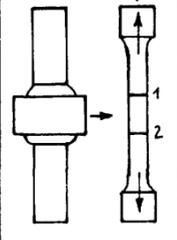
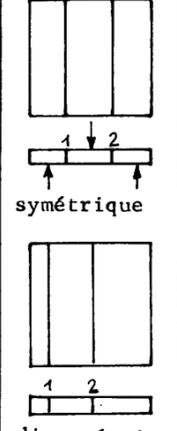
Type d'éprouvette	Nature de l'essai	Désignation et forme de l'éprouvette	Possibilités offertes	Avantages	Inconvénients	
EPROUVETTES NON SOUDEES	Traction	<p>"BRODEAU"</p>  <p>Type B</p> <p>Type C</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . A % (allongement) . Z (striction latérale) selon les directions : <ul style="list-style-type: none"> . du laminage (X) . du travers long (Y) . du travers court (Z) - Allure de la rupture 	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'étudier le comportement des zones superficielles d'une tôle - Comparaison possible des valeurs de Rm, A % et Z relatives aux directions X, Y et Z - Usinage plus facile et plus rapide que pour le type A - Mise en oeuvre possible sur tôle de faible épaisseur ($e \geq 6$ mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Essai destructif - Appréciation difficile de A % - Influence non négligeable des stries d'usinage (tournage ou fraisage) 	
	Le soudage est volontairement associé à l'essai	Traction	<p>Arrachement d'implant</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . Zd (striction diamétrale) - Aspect de la cassure 	<ul style="list-style-type: none"> - Essai semi-destructif rapidement mis en oeuvre - Possibilité d'utiliser cet essai "in situ" - Surface rompue assez importante 	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à caractère partiellement subjectif - Détermination quelquefois imprécise de la striction latérale - Essai applicable qu'aux tôles d'épaisseur supérieure à 15 mm environ
	EPROUVETTES SOUDEES	Le soudage n'est qu'un agent auxiliaire de liaison	Traction	<p>Eprouvette prismatique</p>  <p>N.B: les joints 1 et 2 sont réalisés par faisceau d'électrons</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination possible de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm (charge de rupture) . Re (limite d'élasticité) . A % (allongement) . Z (striction latérale) - Détermination, sur les valeurs précédentes de l'influence de : <ul style="list-style-type: none"> . la direction du prélèvement . la densité d'inclusion . la teneur en soufre . l'état de traitement thermique - Aspect de la cassure 	<ul style="list-style-type: none"> - L'essai présente des possibilités étendues - Le soudage par faisceau d'électron des têtes d'amarrage permet par réduction de la dilution d'étudier la presque totalité de l'épaisseur du produit
Traction			<p>Eprouvette cylindrique</p>  <p>N.B: les joints 1 et 2 ont été réalisés par friction</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination de : <ul style="list-style-type: none"> . Rm . Re . A % . Z (striction diamétrale) - Influence de la direction du prélèvement (X, Y ou Z) sur les valeurs précédentes - Aspect de la cassure 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilités étendues - Réduction de l'épaisseur des zones affectées par l'opération de soudage - Possibilité d'étudier le comportement de la presque totalité de l'épaisseur du matériau de base 	<ul style="list-style-type: none"> - La réalisation de cette éprouvette nécessite une installation de soudage par friction encore peu répandue - Centrage et alignement difficile des 3 éléments constitutifs de l'éprouvette - Usinage assez long
Emboutissage			<p>"PERSOZ"</p>  <p>symétrique</p> <p>dissymétrique</p> <p>N.B: les joints 1 et 2 sont réalisés par faisceau d'électrons</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination de : <ul style="list-style-type: none"> . l'effort F qu'il est nécessaire d'appliquer pour obtenir une déchirure de l'éprouvette . l'indice PERSOZ Ip - Forme et position de la rupture - Relation entre F et : <ul style="list-style-type: none"> . la densité d'inclusions . la teneur en soufre (empreinte Baumann) 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'étudier le comportement de la presque totalité de l'épaisseur du matériau - Réduction de l'épaisseur des zones du métal de base affectées par le soudage - L'éprouvette dissymétrique permet de solliciter essentiellement les régions superficielles d'une tôle - Aspect très caractéristique des ruptures sur tôles sensibles à l'arrachement lamellaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une installation de soudage par faisceau d'électrons - Réalisation de l'éprouvette assez onéreuse

TABLEAU N° 18

ESSAIS DE TRACTION SUR EPROUVETTES PARALLELEPIPEDIQUES SOUDEES PAR FAISCEAU D'ELECTRONS							
Repères		Direction des prélève- ments	Sections des épreuves		Effort F_m (N)	Charge de rupture R_m (N/mm ²)	
			Dimen- sions (mm)	Surfa- ce (mm ²)			
Prélèvements		tôle de base					
B1		B20	Z	10,6x30	318	140 000	440
B2		-	-	11,6x30	348	145 000	417
B3		-	-	11,1x30	333	129 000	387
P1		-	-	10,8x30	324	106 000	358
P2		-	-	10,7x30	321	103 500	322
P3		-	-	10,7x30	321	132 000	411

TABEAU N° 19

ESSAIS DE TRACTION SUR EPROUVETTES CYLINDRIQUES SOUDÉES PAR FRICTION									
Repères		Tôle de base	Direction de la solli- citation	Dimension des éprouvettes			Striction diamètre- $\frac{Do-Du}{Do} \times 100$	Effort (N)	Charge de Rupture (N/mm ²)
Eprouvettes	Diamètre initial Do (mm)			Section initial So (mm ²)	Diamètre après rupture Du (mm)				
14	14		Z	20	314	19,8	1,0	111 000	353
B 30-1	B 30		"	20	314	19,7	1,5	133 500	425
B 30-2 *	"		"	20,5	330	20,3	1,0	97 500	310

* Eprouvette rompue prématurément en raison de la présence d'un collage (manque de fusion) d'une surface de 50 mm² environ au niveau du plan de joint de l'assemblage tôle-embout.

TABLEAU N° 20

Repères		Direction des prélèvements	Efforts Fm (N)	Indices Persoz (IP) (mm)
Prélèvements	tôle de base			
BA	B 20	Z	88,259	7,8
BD	"	"	44,130	3,7
PA	"	"	68,646	6,4
PD	"	"	44,130	3,6
MA	"	"	63,743	5,8
MD	"	"	47,071	4,2

BUREAUX DE VENTE

Les documents publiés par la Commission des Communautés européennes sont vendus par l'Office des publications officielles aux adresses ci-après et au prix indiqué en dernière page de couverture. Lors de la commande, bien indiquer la référence exacte et le titre du document.

BELGIQUE — BELGIË

Moniteur belge — Belgisch Staatsblad
Rue de Louvain, 40-42 — Leuvenseweg 40-42
1000 Bruxelles — 1000 Brussel. — Tél. 512 00 26
CCP 000-2005502-27 — Postrekening 000-2005502-27
Sous-dépôt — Agentschap
Librairie européenne — Europese Boekhandel
Rue de la Loi, 244 — Wetstraat 244
1040 Bruxelles — 1040 Brussel

DANMARK

J.H. Schultz — Boghandel
Montergade 19
1116 København K — Tel. 14 11 95

DEUTSCHLAND (BR)

Verlag Bundesanzeiger
5 Köln 1 - Breite Straße
Postfach 108 006 — Tel. (0221) 21 03 48
(Fernschreiber : Anzeiger Bonn 08 882 595)
Postscheckkonto 834 00 Köln

FRANCE

*Service de vente en France des publications
des Communautés européennes — Journal officiel*
26, rue Desaix — 75 732 Paris - Cedex 15
Tél. (1) 578 61 39 — CCP Paris 23-96

IRELAND

Stationery Office — The Controller
Beggar's Bush — Dublin 4
Tel. 76 54 01

ITALIA

Libreria dello Stato
Piazza G. Verdi 10
00198 Roma — Tel. (6) 85 08
CCP 1/2640
Agenzie
00187 Roma - Via del Tritone
61/A e 61/B
00187 Roma - Via XX Settembre
(Palazzo Ministero
delle finanze)
20121 Milano - Galleria
Vittorio Emanuele 3
80121 Napoli - Via Chiaia 5
50129 Firenze - Via Cavour 46/R
16121 Genova - Via XII Ottobre 172
40125 Bologna - Strada Maggiore 23/A

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

*Office des publications officielles
des Communautés européennes*
Boîte postale 1003 — Luxembourg
Tél. 49 00 81 — CCP 191-90
Compte courant bancaire : BIL 8-109/6003/300

NEDERLAND

Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf
Christoffel Plantijnstraat, s'-Gravenhage
Tel. (070) 81 45 11 — Postgiro 42 53 00

UNITED KINGDOM

H.M. Stationery Office
P.O. Box 569
London S.E. 1 9 N H — Tel. 01-928 6977, ext. 365

UNITED STATES OF AMERICA

European Community Information Service
2100 M Street, N.W. — Suite 707
Washington, D.C. 20 037 — Tel. 296 51 31

SCHWEIZ — SUISSE — SVIZZERA

Librairie Payot
6, rue Grenus — 1211 Genève
CCP 12-236 Genève — Tél. 31 89 50

SVERIGE

Librairie C.E. Fritze
2, Fredsgatan — Stockholm 16
Post Giro 193 — Bank Giro 73/4015

ESPAÑA

Libreria Mundi-Prensa
Castelló 37 — Madrid 1
Tel. 275 46 55

AUTRES PAYS

*Office des publications officielles
des Communautés européennes*
Boîte postale 1003 — Luxembourg
Tél. 49 00 81 — CCP 191-90
Compte courant bancaire : BIL 8-109/6003/300

**Publications technico-économiques de la Commission des Communautés européennes
dans le domaine des « Propriétés d'emploi des aciers »**

Doc. n°	Titre	Langues	Année	Prix
EUR 4626	Soudabilité	F	1972	FB 60,—
EUR 4648	Fatigue et constructions types	D, F	1972	FB 70,—
EUR 4649	Aciers pour emploi à chaud	D, F, I	1972	FB 85,—
EUR 4650	Aciers pour traitements thermiques	D, F	1973	FB 60,—
EUR 4919	Sensibilité à la rupture fragile de l'acier	D, F	1973	FB 50,—
EUR 5128	Ricerche sulla corrosione dell'acciaio al carbonio, a contatto con soluzioni saline calde concentrate	I	1974	FB 150,—
EUR 5132	Zerspanbarkeit der Stähle	D	1974	FB 85,—
EUR 5139	La température, un facteur de dispersion des résultats d'essais de rupture par fluage	F	1974	FB 40,—
EUR 5150	Aptitude à la déformation des assemblages soudés ; conjugaison des effets de forme, de la nuance des aciers et des conditions de soudage	F	1974	FB 60,—
EUR 5151	Studio dell'origine delle perdite anomali nei lamierini magnetici	I	1974	FB 165,—
EUR 5166	Essais pratiques par la méthode des implants	F	1974	FB 100,—
EUR 5179	Das Verhalten von Baustählen höherer Festigkeit nach dem Feuerverzinken bei dynamischer Beanspruchung	D	1974	FB 50,—
EUR 5185	Aciers de constructions métalliques - soudabilité des aciers	F	1974	FB 150,—
EUR 5191	Einfluß der Lichtbogen-Schweiß-Atmosphäre auf die Schweißbarkeit von Stählen mit erhöhter Streckgrenze	D	1974	FB 150,—
EUR 5192 A	Examen critique des critères de soudabilité des aciers à dispersoïdes	F	1974	FB 85,—
EUR 5192 B	Etude des propriétés de la zone affectée par la chaleur de soudage des aciers à dispersoïdes	F	1974	FB 150,—
EUR 5192 C-D	Etude des propriétés du métal fondu	E	1974	FB 70,—
EUR 5192 E	Etude du postchauffage des assemblages soudés en aciers à haute limite d'élasticité	F	1974	FB 100,—
EUR 5237 i	Influenza del trattamento termico sull'estrudibilità di acciai al carbonio e legati	I	1975	FB 240,—
EUR 5245 d	Tiefziehbarkeit von Feinblech	D	1975	FB 230,—
EUR 5249 f	Corrosion atmosphérique des aciers de construction	F	1975	FB 105,—
EUR 5264 i	Studio delle proprietà di tenacità della zone termicamente alterata di acciai trattati	I	1975	FB 350,—

Prix : FB 200,—