

COMMISSION D

COMMUNAL



DE RECHERCHE ACIER CECA



La Commission des Communautés européennes remercie les organismes
qui lui ont aimablement prêté les photos et diagrammes
pour la confection de ce rapport

**« 10 ANNÉES DE RECHERCHE
ACIER CECA »**



Commission des Communautés européennes

10 ANNÉES DE RECHERCHE ACIER CECA

Direction générale
« Science, recherche et développement »

1983

EUR 7904 FR

**Publié par :
COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES**

**Direction générale
Marché de l'information et innovation**

**Bâtiment Jean Monnet
LUXEMBOURG**

AVERTISSEMENT

Ni la Commission des Communautés européennes, ni aucune autre personne agissant au nom de la Commission, n'est responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations ci-après

Cette publication est éditée aussi dans les langues suivantes :

DE ISBN 92-825-3107-4

EN ISBN 92-825-3108-2

IT ISBN 92-825-3110-4

Une fiche bibliographique figure à la fin de l'ouvrage

Luxembourg, Office des publications officielles des Communautés européennes, 1983

ISBN 92-825-3109-0

N° de catalogue : CD-NB-82-002-FR-C

© CECA-CEE-CEEA, Bruxelles • Luxembourg, 1982

Printed in Belgium

Table des matières

1. Introduction	7
2. Exploitation des mines de fer — Cokéfaction — Production de la fonte — Réduction directe	11
Exploitation des mines de fer	11
Production de coke de haut fourneau à partir de pâtes à coke contenant un pourcentage élevé de charbons non cokéfiabiles.....	13
Utilisation de coke moulé au haut fourneau.....	15
Comportement du coke dans le haut fourneau.....	17
Propriétés des constituants du lit de fusion pour des hauts fourneaux de grande taille.....	18
Application de gaz réducteurs dans le haut fourneau.....	19
Comportement du zinc et des métaux alcalins dans le haut fourneau.....	23
Mélanges réfractaires pour rigoles de coulée au haut fourneau	25
Utilisation du gaz de haut fourneau comme combustible en sidérurgie.....	26
Réduction directe.....	28
3. Élaboration de l'acier — Coulée et solidification	31
Automatisation des aciéries à l'oxygène	31
Automatisation des aciéries électriques	34
Propriétés des arcs électriques	35
Procédé de refusion sous laitier électroconducteur	37
Coulée et solidification.....	38
Contrôle métallurgique du processus et améliorations apportées à la coulée continue	41
Produits réfractaires en aciérie.....	44
4. Technique des laminoirs — Traitement thermique	47
Four électrique de réchauffage des brames	47
Contre-flexion des cylindres de laminoirs	49
Procédés de refroidissement dans les laminoirs.....	51
Automatisation des trains à larges bandes à chaud	53
Diminution des fluctuations de largeur des larges bandes à chaud	56
Automatisation des trains tandem à froid.....	58
Réglage de la planéité dans les laminoirs à froid	60
Procédé de décapage électrolytique neutre continu	61

5. Procédés de mesure — Techniques d'analyse	65
Procédés de contrôle par ultrasons.....	65
Méthodes de sondage électromagnétique	71
Méthodes de mesures optiques	73
Contrôle de l'état de surface des bandes laminées à froid	76
Surveillance des installations sidérurgiques.....	77
Techniques d'analyse	78
6. Propriétés d'emploi et techniques d'utilisation	83
Structures marines.....	83
Conduites pour le transport de gaz à grandes distances	85
Tenue au feu des structures en acier	87
Stations européennes d'essais de corrosion.....	90
Tôles en aciers à haute résistance	92
Résistance à la fatigue des constructions soudées.....	94
Soudabilité	96
Emboutissabilité	99
7. Avenir de la recherche dans la Communauté européenne	103
8. Liste des conventions passées avec la CECA et des articles publiés	105

1. Introduction

L'importance que revêtent la recherche et le développement pour l'amélioration et l'expansion des productions et des consommations dans les industries de tous les pays n'a cessé de s'accroître au cours des dernières décennies. En raison de l'accélération des progrès techniques, le développement des industries dépend de plus en plus de nouvelles connaissances scientifiques et de l'intensité des recherches.

Considérant que la recherche était une condition indispensable de l'expansion économique, les signataires du traité instituant la Communauté européenne du charbon et de l'acier, le 18 avril 1951, ont prescrit à la Haute Autorité, par l'article 55, d'encourager la recherche technique et économique intéressant la production et le développement de la consommation du charbon et de l'acier ainsi que la sécurité du travail dans ces industries.

Ainsi, pour la sidérurgie, la sauvegarde et le renforcement de sa capacité concurrentielle étaient possibles grâce à une coordination adéquate des efforts, à une collaboration sur des sujets d'intérêt commun, à une aide financière pour la réalisation de projets de recherche dépassant les moyens nationaux et à une mise à disposition des résultats à l'ensemble des intéressés.

C'est le 31 mars 1955 que la Haute Autorité a décidé d'octroyer les premières aides financières à des projets de recherche technique sidérurgique. Modeste la première année — 240 000 dollars US —, l'effort de la Haute Autorité, puis de la Commission, n'a cessé de croître au fil des années pour atteindre actuellement un niveau annuel de l'ordre de 20 Mio Écus⁽¹⁾. La *figure 1* montre cette évolution pour les 10 dernières années. En dépit de la baisse importante de la production sidérurgique à

partir de 1975, les aides à la recherche n'ont pas subi de variations notables.

Malgré les difficultés qui persistent sur le marché sidérurgique, tous les intéressés ont eu la volonté de maîtriser et d'assurer l'avenir, notamment par une intensification des efforts de recherche.

Depuis la création de la CECA jusque fin 1981, l'aide financière octroyée à la recherche carbo-sidérurgique s'est élevée à 505 Mio Écus. De ce montant, la recherche «acier» a bénéficié d'un soutien financier égal à 200 Mio Écus. Ainsi que le montre la *figure 2*, le programme de recherche n'a cessé de s'élargir tout en subissant une évolution tant pour ce qui concerne la dimension des aides que les objectifs.

Durant la première période quinquennale, les travaux ont été consacrés principalement aux matières premières et aux problèmes de production de fonte et d'acier, avec, pour objectif d'ensemble, l'accroissement de la productivité. Les pressions économiques ont été, comme elles le sont encore aujourd'hui, d'importants stimulants pour la recherche.

Entre 1962 et 1966, l'impact des progrès technologiques sur la production mondiale de l'acier a mis en lumière le besoin d'une automatisation plus poussée des procédés de production, depuis le haut fourneau jusqu'aux laminoirs. Cette automatisation a conduit à améliorer les méthodes de mesure et c'est ainsi qu'un premier effort a été entrepris dans ce domaine. Des recherches sur les propriétés des aciers ont également débuté durant cette période.

⁽¹⁾ Écu = European Currency Unit, soit de l'ordre de: 64 Mio FF — 50 Mio DM — 11.5 Mio UKL.



Figure 1: Production annuelle acier brut et Budget annuel recherche acier

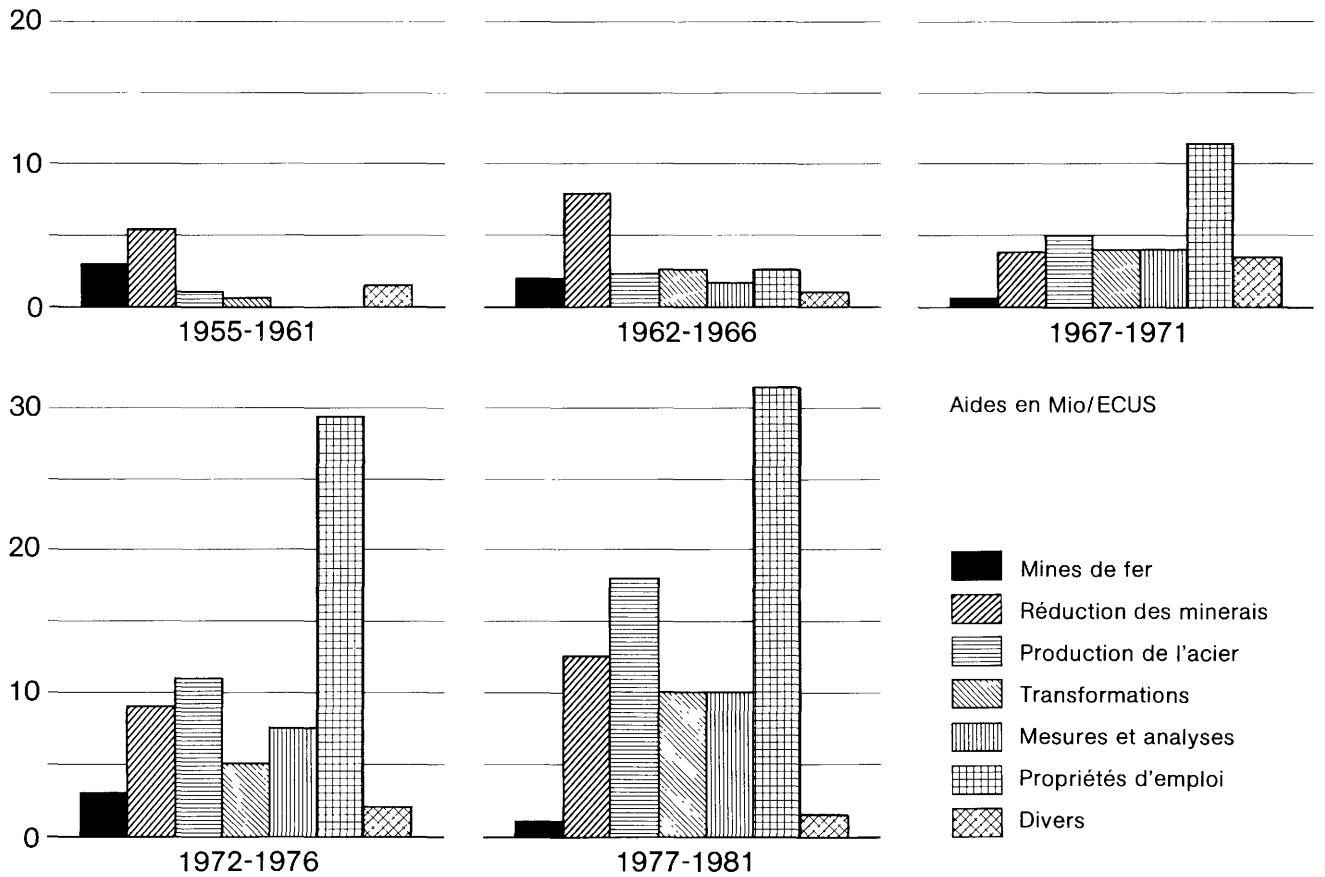


Figure 2: Répartition quinquennale sectorielle des aides en millions d'Écus

La période 1967 à 1976 a connu une extension de l'effort technique antérieur pour pouvoir répondre aux impératifs de la production et à la sophistication des produits. Ainsi, une attention particulière a été consacrée aux remplacements énergétiques dans le haut fourneau. Un important soutien a été accordé aux tentatives visant à optimiser le contrôle des processus. L'application graduelle de la coulée continue a orienté une grande partie des travaux vers une meilleure compréhension des phénomènes en jeu. Dans le domaine des propriétés de l'acier et de son utilisation, l'effort a été amplifié par la mise en œuvre d'importants programmes coordonnés sur des sujets d'intérêt commun tels que la corrosion, la soudabilité, les traitements et le développement des aciers alliés.

Pour la période récente, dominée par la crise de la sidérurgie, un effort plus important a été concentré sur des objectifs visant à la réduction des coûts de production, à l'amélioration de la qualité et des performances des produits et à l'élargissement de la gamme des utilisations de l'acier face à ses matériaux concurrents. Ces objectifs, à court et à moyen termes, ont pour but complémentaire de contribuer aux mesures de restructuration et de modernisation mises en œuvre par l'industrie sidérurgique. A titre d'exemples, on peut citer, pour le premier objectif, les efforts entrepris en vue de la réduction des consommations énergétiques et les études relatives aux énergies de substitution. Pour les deux autres objectifs, il faut retenir, en particulier, le développement de méthodes d'inspection et de contrôle et les importantes recherches sur les propriétés de l'acier en fonction de son utilisation spécifique, tels que : transport de gaz à longue distance, structures marines, construction automobile. Il faut également relever, durant cette période, l'importance croissante des programmes coordonnés, dans lesquels plusieurs contractants mettent en commun leurs expériences pluri-disciplinaires pour l'étude d'un même problème. La *figure 3* montre qu'un tiers du programme de recherche est consacré actuellement à une collaboration de ce type.

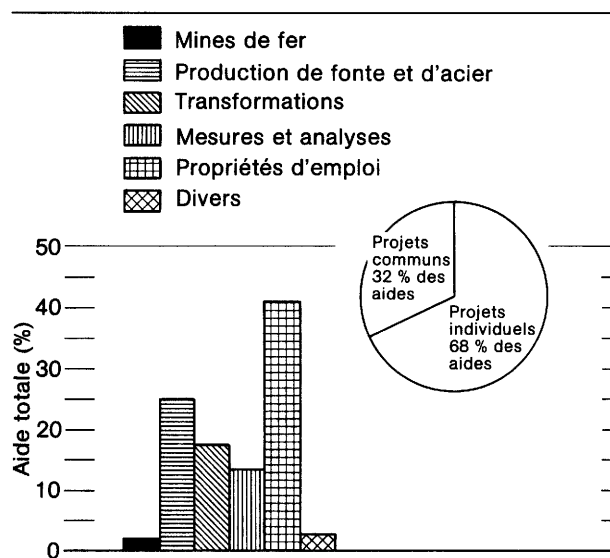
Le rôle du programme de la Commission est de soutenir la recherche et le développement dans des secteurs prioritaires qui sont de la préoccupation commune des producteurs et des utilisateurs. En procédant de cette manière, il permet d'assurer une utilisation rationnelle des ressources financières. Il détermine un canevas d'activités scientifiques et technologiques à partir duquel les organismes de recherche peuvent planifier leurs propres activités à caractère plus spécialisé ou à intérêt commercial plus particulier.

Bien que les aides allouées par la CECA ne représentent qu'une faible fraction du total des dépenses que la sidérurgie consacre à la recherche — 10%

en termes financiers, 8% en personnel des grands centres de recherche — elles exercent un effet catalyseur dont les retombées dépassent l'importance financière des subventions. Ce travail communautaire aboutit à une rationalisation des recherches, évite les duplications de travaux, met en contact permanent les chercheurs, focalise les efforts sur des thèmes prioritaires intéressant la plupart des entreprises, permet à chaque partenaire de valoriser son expérience et d'utiliser plus efficacement ses moyens.

Les résultats des recherches font l'objet de publications in extenso qui sont largement diffusées parmi les intéressés de la Communauté européenne, ainsi que le prescrit d'ailleurs le traité CECA. Certaines recherches sur des thèmes déterminés sont regroupées dans des rapports de synthèse décrivant les travaux effectués et les principaux résultats obtenus. Des congrès annuels permettent aux spécialistes de prendre connaissance des recherches récentes et de confronter leurs expériences. L'information technique est intensifiée grâce à une aide financière aux traductions en langues occidentales des articles sidérurgiques parus dans les langues de l'Europe orientale et de l'Extrême-Orient.

L'objet de la présente publication n'est donc pas de reprendre les informations déjà diffusées, mais de présenter, d'une manière succincte, un certain nombre de résultats de travaux de recherches menés durant la période 1971-1980 et qui ont abouti à une application industrielle ou commerciale. Pendant cette décennie, la Commission a apporté une aide financière voisine de 130 Mio Écus, répartie sur 660 contrats de recherche.



Répartition de l'aide au 1.1.1979
 Nombre total de contrats : 233
 Aide totale (Écus) : 50×10^6

Figure 3 : Répartition de l'aide entre les divers domaines techniques du programme de recherche acier CECA au 1^{er} janvier 1979. Nombre total de contrats : 233, Aide totale (Écus) : 50×10^6

Faire de la recherche, c'est ouvrir des voies nouvelles, prendre des risques, accepter les échecs. L'expérience montre que seule une fraction de l'effort de recherche — 28% des recherches réalisées dans le monde — conduit à un résultat industriel.

La recherche soutenue par la CECA n'échappe pas à cette loi, mais la réussite est une motivation et un stimulant qui ne peut qu'inciter davantage à poursuivre dans une voie permettant d'espérer en l'avenir.

2. Exploitation des mines de fer — Cokéfaction — Production de la fonte — Réduction directe

La consommation d'énergie et le prix de l'énergie spécifiquement utilisée sont les facteurs d'influence prépondérants pour la transformation du minerai de fer en fonte ou en éponge de fer. Dans une usine sidérurgique intégrée, 70% de l'énergie totale consommée pour la fabrication du produit final sont accaparés par la seule production de la fonte; 50% vont au haut fourneau et les 20% restants à la cokéfaction et à la préparation du minerai par l'agglomération.

C'est donc un vaste et important champ d'application des efforts de recherche à consentir à l'intérieur de la CECA. Les encouragements à la recherche pendant les 10 dernières années s'étendent depuis l'exploitation des mines de fer, les techniques d'agglomération, la cokéfaction et la production de la fonte jusqu'à la réduction directe.

Dans la brève description qui suit d'une série d'exemples pris parmi les volumineux travaux de recherches, on a aussi, sciemment, choisi quelques projets, dont les résultats sont prometteurs pour l'avenir, sans que pour autant ils aient déjà fait l'objet d'une application pratique.

Exploitation des mines de fer

L'approvisionnement en minerais de fer de la Communauté européenne dépend en grande partie des importations. Les gisements situés sur le territoire de la Communauté n'offrent, pour la plus grande part, qu'une faible teneur en fer, laquelle demande, pour le traitement de ces minerais, une consom-

tion d'énergie élevée. C'est une des raisons de la tendance en régression de l'extraction des minerais de fer de la Communauté pendant les dix dernières années. D'autres raisons sont à mettre au compte de la crise que subit l'acier ou du désir de prolonger la disponibilité des gisements. C'est ainsi que, par exemple, en Lorraine, l'extraction des minerais de fer a reculé de 48 millions de tonnes en 1970 à 22 millions de tonnes en 1981.

La CECA considère comme son devoir de conserver le plus longtemps possible, par des travaux de recherche appropriés, des raisons fondamentalement économiques pour l'utilisation des réserves européennes de minerais de fer. Depuis 1960, ont été dépensés plus de 10 millions d'UCE pour la prospection, le développement de nouvelles et plus rationnelles méthodes d'abattage et pour la recherche de procédés d'enrichissement. On s'est efforcé et on est arrivé aussi à diminuer la consommation d'énergie pour le traitement au haut fourneau des minerais pauvres en fer, à la suite de recherches étendues sur l'agglomération de tels minerais.

Le développement de méthodes économiques d'abattage est ci-après brièvement illustré à l'aide d'un exemple.

Abattage mécanique de minerai de fer de dureté moyenne

Un programme de recherche exécuté avec l'aide financière de la CECA à la mine de fer de Bülten-

Adenstedt de la SA Peine-Salzgitter avait pour objectif de développer un mineur continu à attaque ponctuelle qui soit susceptible de remplacer économiquement l'abattage classique par foration et tir.

Pour une série d'essais préliminaires, on a choisi une machine prototype⁽¹⁾ du type ponctuel possédant deux têtes de havage tournant perpendiculairement à la direction de l'avance et garnies de pics en métal dur. Cette machine avait un poids de 55 tonnes et une puissance d'attaque de havage de 170 kW.

Au cours des essais, on a apporté des améliorations substantielles à la construction de la machine, entre autres à la table de chargement, en mettant en place deux convoyeurs latéraux à raclettes et en montant sur la machine un transformateur secondaire qui a diminué le poids du câble d'alimentation électrique. La *figure 4* montre la machine améliorée, mise en service en juillet 1973.

Nouvelles têtes de havage

La forte usure des pics que l'on a constatée avec les têtes de havage, mises en service au début des

essais, a pu être très fortement diminuée en mettant en place une nouvelle tête de havage, garnie uniquement de pics ronds. Cette nouvelle conception représentée dans la *figure 5*, s'est révélée comme un progrès substantiel, également au point de vue de la capacité d'abattage de la machine qu'il est possible de réaliser pour la totalité de l'échelle de dureté du minerai.

En utilisation continue, on a obtenu un rendement moyen d'abattage d'environ 300 tonnes par poste. En outre, on a pu démontrer qu'au moyen de dispositions techniques, on pouvait diminuer davantage les temps d'arrêt de la machine existant encore et gagner environ 15% sur le temps net de havage. Avec 140 tonnes par homme et par poste, ce procédé d'abattage est déjà d'environ 40% supérieur à l'abattage par foration et tir. L'augmentation de 15% du temps net de havage peut porter la capacité d'abattage jusqu'à 225-250 tonnes par homme et par poste.

(¹) Machine WAV 170 du Syndicat minier «Eisenhütte Westfalia Lünen».



Figure 4: Mineur continu WAV 170 prototype de juillet 1973

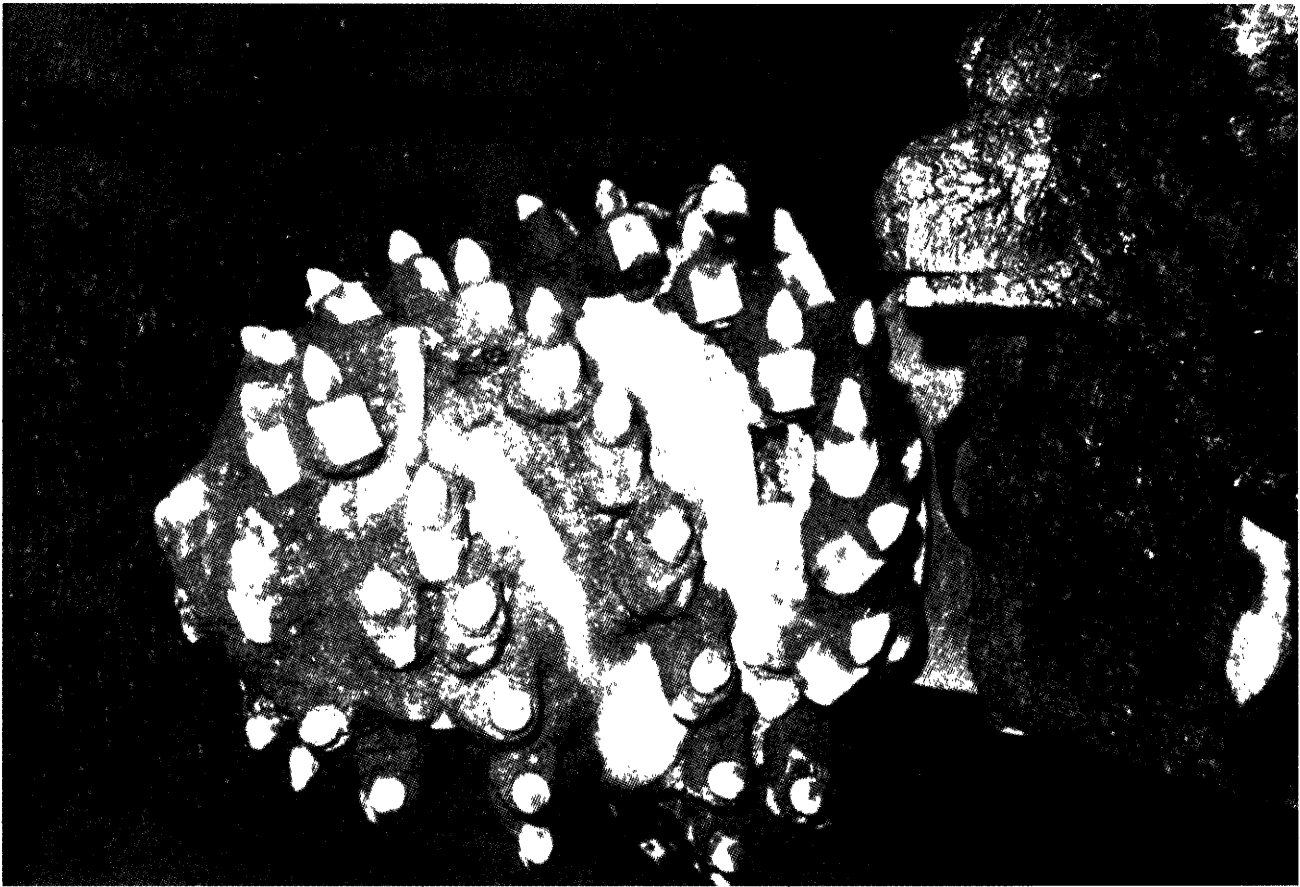


Figure 5: Tête de havage WAV 170 à pics ronds version mars 1974

Production de coke de haut fourneau à partir de pâtes à coke contenant un pourcentage élevé de charbons non cokéfiabiles

Des travaux de développement ont été exécutés sur une grande envergure et depuis de nombreuses années pour élargir les sources de matières premières pour la fabrication de coke de haut fourneau par l'utilisation de charbons peu ou non cokéfiabiles.

Diverses techniques ont été développées, comme par exemple la technique du pilonnage ou le briquetage sans liant pour augmenter la densité de l'enfournement, techniques pratiquées en Lorraine et en Sarre, le précompactage des pâtes humides, le préchauffage des charbons peu cokéfiabiles et d'autres techniques encore. Dans ce complexe, il convient de citer également les techniques du coke moulé.

Sur la base de travaux préliminaires exécutés depuis 1972, le CRM a, dans le cadre d'une recherche CECA, développé une technique qui consiste à mélanger des charbons peu ou non cokéfiabiles, préalablement briquetés à l'aide d'un liant, à une pâte à coke normale. Des méthodes

similaires ont été aussi développées au Japon et utilisées industriellement dans ce pays sur une grande envergure.

Essais en station pilote

Les essais à l'échelle semi-industrielle avaient d'abord pour but d'étudier l'influence du liant, du briquetage et de la composition de la pâte enfournée sur la qualité du coke. La cokéfaction a été conduite dans des fours d'essai par Sidmar et le CRM.

A une pâte à coke à base de 75% de charbon de Winterslag et de 25% de charbon de Beringen on a ajouté des proportions croissantes d'un charbon non cokéfiable. Il s'est avéré que l'on pouvait, avec le plus de certitude, conserver une qualité constante du coke obtenu avec également de hauts pourcentages de charbon non cokéfiable, en ajoutant environ 6% de liant et en effectuant à la suite un briquetage de ce charbon. Un séchage préalable du charbon avant le briquetage apporte des avantages décisifs.

La *figure 6* représente schématiquement ce procédé appelé Bricoke et qui a été développé à partir de ces résultats.

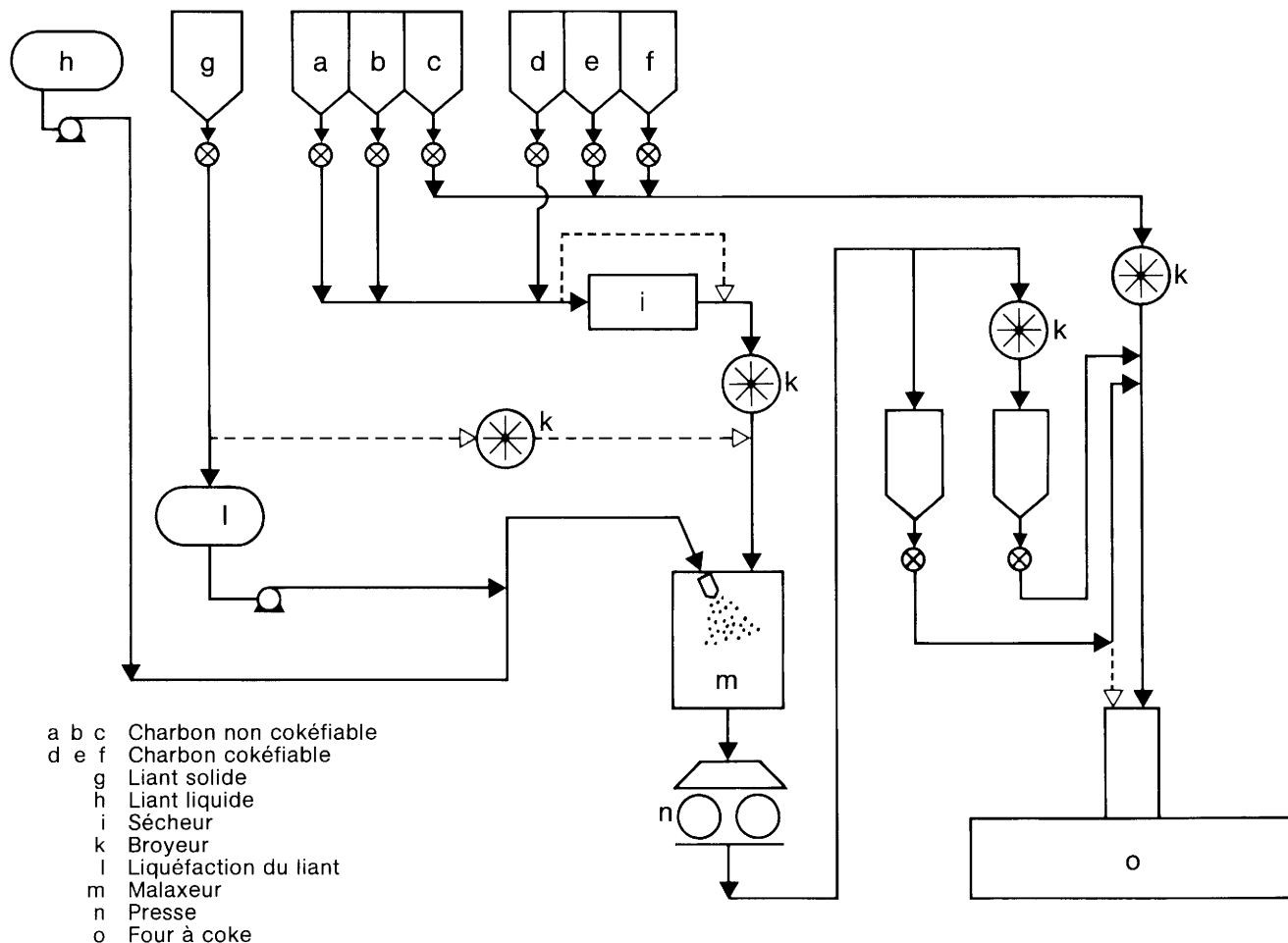


Figure 6: Schéma de principe d'une installation BRICOKE

Essais à échelle industrielle

Dans un essai préliminaire, on a d'abord cokéfié industriellement 2500 tonnes de coke contenant une proportion de 40% de charbon non cokéfiable, et ce tonnage a été chargé dans un petit haut fourneau. La résistance du coke était bonne et on n'a constaté aucune difficulté dans la marche du haut fourneau.

L'essai à l'échelle industrielle qui a suivi a porté sur 25 000 tonnes de coke qui ont été produites à la cokerie de Cockerill-Flémalle à partir d'une pâte contenant deux tiers d'un bon charbon cokéfiable et d'un tiers de briquettes fabriquées à partir d'un charbon non cokéfiable avec 7,5% de brai de houille comme liant.

Dans cet essai industriel, le charbon n'avait pas pu être séché avant briquetage. Par ailleurs, la capacité limitée de l'installation de briquetage a nécessité une mise en stock intermédiaire avec le transport conséquent. Malgré tout, on a obtenu une

excellente qualité de coke. Les résultats de la marche du haut fourneau n° 5 de 8,2 m de diamètre au creuset de la société Cockerill à Seraing, alimenté avec ce coke, ont été entièrement satisfaisants. En comparaison avec la période de référence où le coke enfourné était du coke classique, la quantité du vent soufflé et la production de fonte sont demeurées inchangées, seule la pression du vent a quelque peu augmenté. La consommation de coke a été légèrement moindre.

Les essais industriels ont montré que cette technique procure un coke bien approprié pour le haut fourneau. Par séchage préalable et briquetage d'une proportion de 60%, on peut par ailleurs poser, en principe, que la productivité des fours (à coke) augmentera d'environ 20%. Le procédé Bricoke procure à l'industrie sidérurgique un moyen lourd de promesses pour épuiser toutes les possibilités des offres de charbons à enfourner et pour mieux utiliser les capacités existantes des batteries de fours à coke. Des licences sont accordées aux constructeurs de cokeries.

Utilisation de coke moulé au haut fourneau

Les procédés de coke moulé ont, tout comme les améliorations décrites dans l'exemple précédent apportées à la cokéfaction en cellules, pour mission la plus importante d'élargir la gamme des charbons enfournables au haut fourneau. En outre, il en résulte d'intéressantes perspectives sur :

- un abaissement des coûts d'enfournement,
- une diminution des capitaux à investir et des frais de main-d'œuvre,
- une meilleure souplesse de fonctionnement grâce à de faciles mises en marche et mises à l'arrêt de l'installation de coke moulé marchant en liaison avec l'installation de cokéfaction en fours classiques,
- une diminution des quantités de matières nuisibles produites et des dépenses sensiblement moindres pour assurer le contrôle des nuisances dans l'environnement et pour les éliminer.

La possibilité d'utiliser le coke moulé comme combustible de remplacement dans le haut fourneau a été étudiée depuis bien longtemps à l'aide d'une série d'essais au haut fourneau. Un pas essentiel dans cette direction a été fait grâce à une recherche

che CECA, dans laquelle, pour la première fois, on s'est efforcé d'obtenir une optimisation systématique des propriétés du coke moulé en vue de son enfournement au haut fourneau.

La recherche a été exécutée par l'Arbed en liaison étroite avec l'Eschweiler Bergwerksverein (EBV), le CRM de Liège, les Forges de Thy-Marcinelle et l'Institut pour la technologie chimique et la technique des combustibles de l'Université Technique de Clausthal.

Pour ces essais, on a choisi la technologie Ancit de coke moulé. Ce procédé développé par EBV est appliqué à Alsdorf dans une installation semi-industrielle de 10 t/heure. Le briquetage à chaud à l'aide de deux composants, représenté schématiquement dans la figure 7, se compose des phases élémentaires suivantes :

- décomposition thermique d'un des composants non cokéfiabile,
- chauffage d'un charbon cokéfiabile comme liant jusqu'à la température de plasticité,
- mélange des deux composants et prise du charbon inerte par le charbon cokéfiabile rendu plastique par la chaleur,
- briquetage du mélange à environ 500° C.

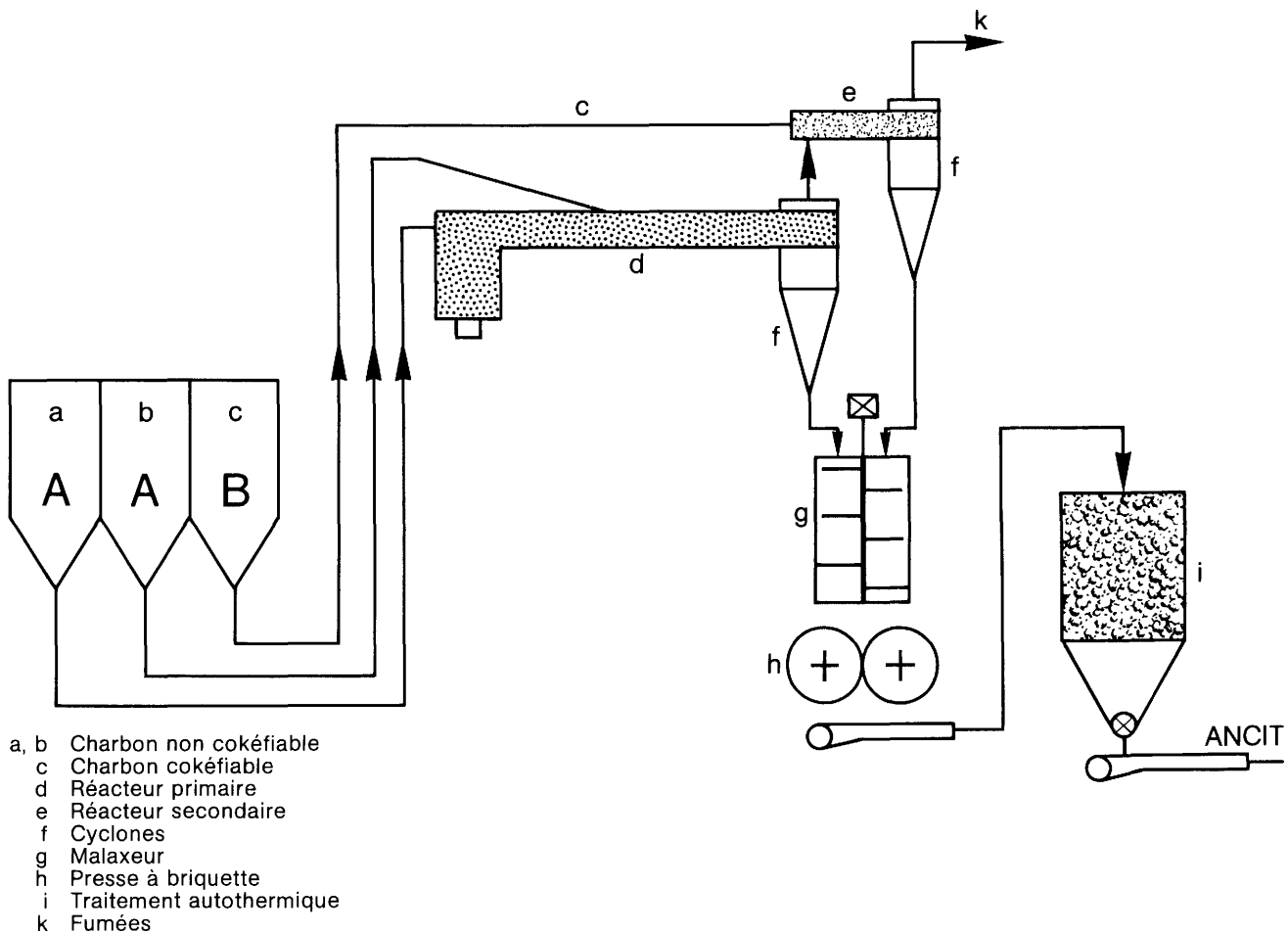


Figure 7: Schéma de principe d'une installation de coke moulé ANCIT

La résistance mécanique exigée pour l'emploi au haut fourneau est obtenue grâce au développement d'un simple durcissement autotherme subséquent.

Les possibilités d'optimisation pour l'enfournement au haut fourneau résident, d'une part, dans le choix de la forme et du volume les plus favorables des boulets et, d'autre part, dans la modification systématique des propriétés des boulets, notamment de la densité en vrac.

Le programme des essais a comporté 4 essais de courte durée de chacun 5 à 6 jours et un essai de longue durée de 4 semaines en enfournant le coke moulé qui avait donné les meilleurs résultats au cours des essais de courte durée. Tous les essais ont été réalisés au haut fourneau n° 2 (5,3 m de diamètre au creuset) des Forges de Thy-Marcinelle, en utilisant des appareillages particuliers de mesure. Environ 16 000 tonnes de coke moulé furent produites en tout pour l'exécution des essais.

Essais de courte durée

Chaque essai a porté sur environ 2 000 tonnes; on a enfourné 4 sortes de coke moulé qui se distinguaient l'une de l'autre aussi bien par le volume (50, 70, 90 cm³) qu'également par la densité en vrac (500 à 625 kg/m³). Les paramètres de marche du haut fourneau qui ont fait l'objet de mesures, comme le débit et la pression du vent chaud, la perméabilité des parties inférieure et supérieure du haut fourneau, etc., ont permis d'établir des relations entre ces paramètres et les propriétés des cokes moulés. Bien qu'en principe, le coke moulé n'est envisagé que comme remplaçant partiel du coke de four, on a augmenté l'enfournement du coke moulé jusqu'à atteindre 100% du combustible solide. De cette façon, on a pu obtenir des renseignements essentiels sur le comportement de la perméabilité du haut fourneau; également les essais effectués à l'Université Technique de Clausthal dans un modèle statique de simulation de la perméabilité ont donné d'intéressantes indications sur cette question.

Les échantillons de coke de four et de coke moulé prélevés au niveau des tuyères à vent ont abouti à des conclusions supplémentaires sur l'abrasion du coke pendant la descente des matières dans le haut fourneau. La *figure 8* montre que le coke moulé a bien résisté pendant la descente; on a constaté qu'il présente certes la même diminution du diamètre moyen des boulets que les morceaux de coke de four, mais que la forme et la résistance à l'écrasement des boulets se retrouvent essentiellement conservées.

A la suite d'un dépouillement critique de tous les résultats, on a déterminé, en considération des

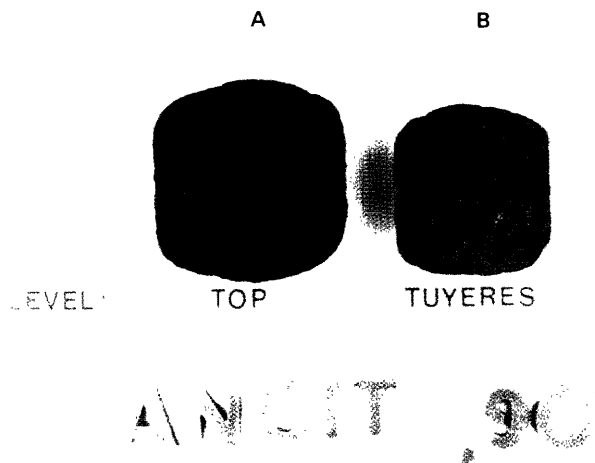


Figure 8 : Comportement du coke moulé (volume: 90 cm³) au cours d'une campagne

- A Coke avant enfournement
- B Échantillon prélevé au niveau des tuyères

conditions données pour le lit de fusion, que le coke moulé de 70 cm³ de volume des boulets était le mieux approprié.

Essai de longue durée

Au cours de cet essai, qui s'est étendu sur 33 jours, on a remplacé jusqu'à 55% sur sec de coke de four par du coke moulé. La marche du fourneau est restée, pendant cette période, très régulière et la qualité de la fonte élaborée n'a pas été dégradée. La perméabilité, aussi bien de la partie inférieure que de la partie supérieure du fourneau, a été un peu plus mauvaise et a amené des pertes de pression plus élevées; la capacité de fusion a légèrement baissé.

La mise au mille totale de combustible, somme du coke de four sur sec, du coke moulé sur sec et de l'huile lourde, n'a pas varié par rapport à celle de la période de référence. Comme conséquence de la teneur en matières volatiles plus élevée du coke moulé, le pouvoir calorifique inférieur du gaz de gueulard a augmenté fortement. Dans le circuit du gaz brut, on n'a décelé aucun dépôt de goudrons.

En résumé, les résultats de l'essai ont été jugés positifs. Ils ont démontré que l'on peut remplacer au moins la moitié du coke classique de four par du coke moulé qui soit, par ses propriétés, approprié au conditionnement du lit de fusion.

Les projets de transposition dans la pratique ne sont pas venus à exécution ou n'ont pas été poursuivis, en raison de la crise qui sévit dans l'industrie sidérurgique pendant ces dernières années. Cependant la technologie qui a été ainsi étudiée de l'emploi du coke moulé reste pleine de promesses à moyen terme. Les recherches ont permis d'établir

les données fondamentales pour permettre de prendre en considération également des installations de coke moulé lors de l'étude des projets d'adaptation future des capacités de cokéfaction.

Comportement du coke dans le haut fourneau

Lors de la descente des matières dans le haut fourneau, le coke subit des modifications substantielles dans sa forme et dans ses propriétés. L'allure du fourneau et sa consommation d'énergie pour la production de la fonte, toutes deux valeurs caractéristiques du fonctionnement, présentant la plus grande importance économique, subissent l'influence de ce phénomène. Au milieu de l'année 1976, la BSC, en collaboration avec la British Carbonisation Research Association et un certain nombre d'usines sidérurgiques européennes, a mis en chantier un très vaste programme de recherches, aidées financièrement par la CECA, pour étudier le comportement du coke dans le haut fourneau.

L'objectif des recherches et les voies pour arriver à des conclusions peuvent être brièvement décrites comme suit:

- comparaison des propriétés chimiques et physiques d'échantillons de coke prélevés au niveau

des tuyères avec les mêmes propriétés d'échantillons prélevés avant le chargement;

- interprétation des mécanismes de dégradation du coke à l'aide d'essais complémentaires en laboratoire;
- transposition des résultats dans la pratique du haut fourneau et définition des exigences optimales de qualité envers le coke pour les différentes méthodes de conduite du haut fourneau qui prédominent en Europe.

Le programme prévoyait des prélèvements d'échantillons sur 44 hauts fourneaux répartis dans 6 pays européens. Au cours des travaux, on a accepté une participation de l'industrie sidérurgique canadienne, ce qui a porté à 47 le nombre de hauts fourneaux participants. Les recherches doivent se terminer à la fin de l'année 1982, mais déjà on dispose de certains résultats intéressants.

Granulométrie du coke

On a étudié en détail les perturbations apportées par la dégradation dimensionnelle du coke à la perméabilité dans la cuve et par suite à une bonne marche du fourneau. La diminution de la granulométrie au cours de la descente du coke dans le fourneau est due, en premier lieu, à la perte de résistance du coke. La *figure 9* montre la relation

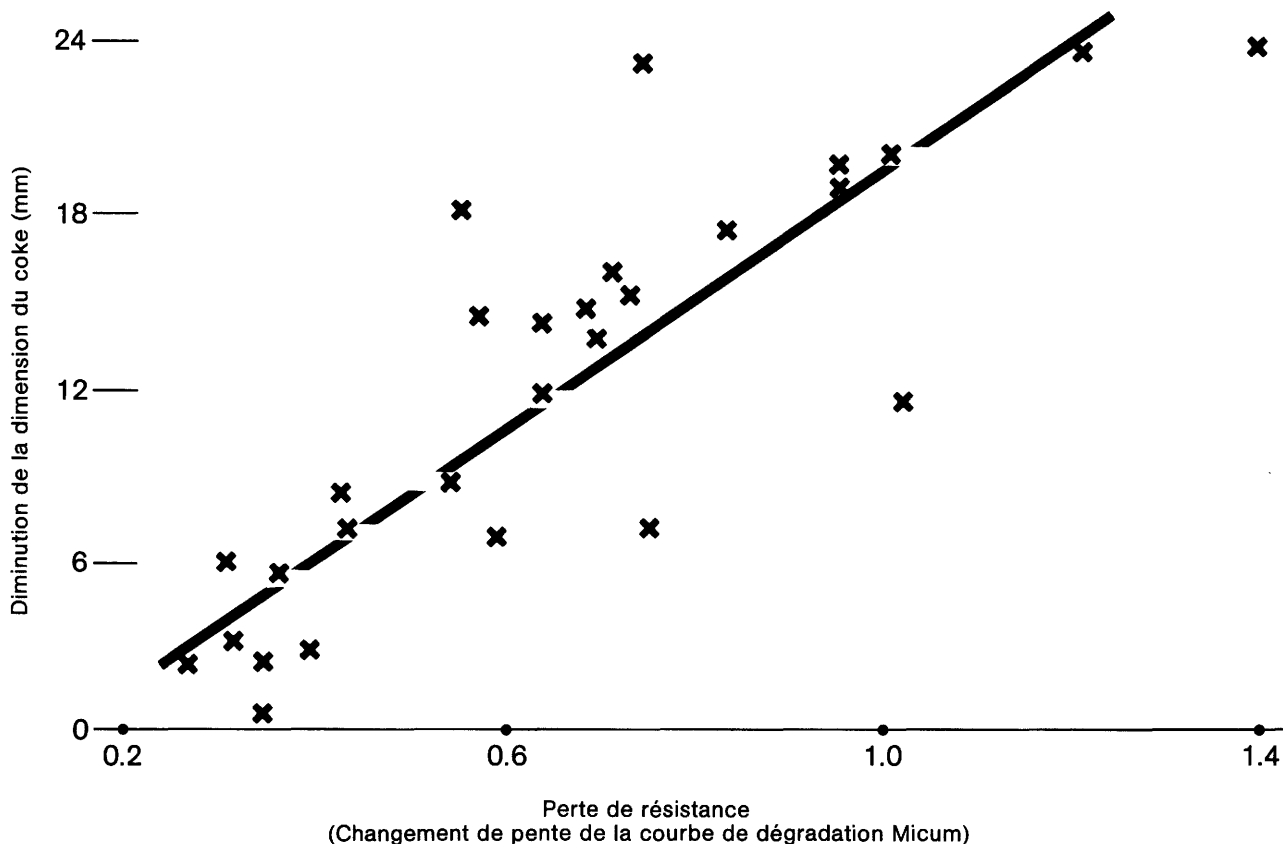


Figure 9: Relation entre la dimension et la résistance des boulets

entre la réduction dimensionnelle depuis le gueulard jusqu'aux tuyères et la perte de résistance. Cette dernière est mise en évidence par le changement de la pente de la courbe de dégradation granulométrique du coke lors de l'essai au tambour Micum. La réactivité du coke vis-à-vis du CO_2 constitue un autre facteur influençant la granulométrie. Le comportement du coke à de hautes températures et l'influence de celles-ci sur la résistance ont également fait l'objet de recherches.

Effet des métaux alcalins

La tentative d'expliquer la dégradation du coke, en l'espèce sa perte de résistance par l'absorption de composés de métaux alcalins n'a pas débouché tout d'abord sur une bonne relation. Des recherches plus précises ont cependant montré que seule intervient, dans l'affaiblissement de la structure du coke, la part des métaux alcalins disponible pour former des composés du type interstitiel avec le carbone du coke. Cette part « libre » montre, d'après la *figure 10*, une très bonne relation avec la perte de résistance. Le mécanisme d'action des métaux alcalins sur la perméabilité du haut fourneau peut ainsi être expliqué.

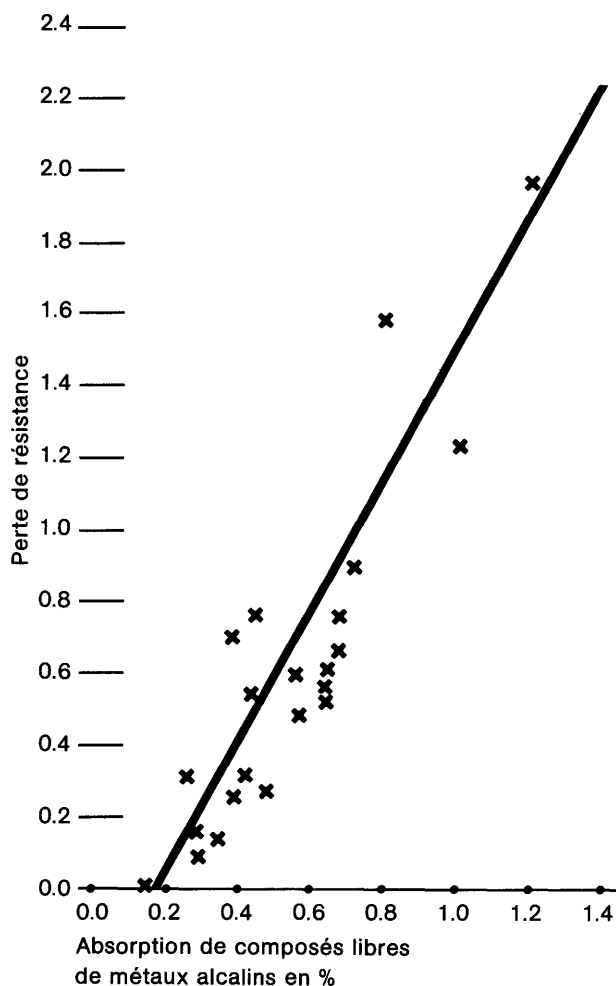


Figure 10: Relation entre l'absorption de composés alcalins par le coke depuis le gueulard jusqu'aux tuyères et la perte de résistance du coke

Conséquences pour la pratique du haut fourneau

Dès à présent, on prend en considération pour la pratique industrielle les résultats importants, tels que l'influence significative des alcalins sur la dégradation du coke.

L'exploitation des caractéristiques de marche des hauts fourneaux dans lesquels les échantillons ont été prélevés doit mener à d'autres connaissances également importantes pour la pratique.

En résumé, on espère des résultats de cette recherche un progrès substantiel dans l'optimisation des coûts de l'ensemble du complexe: choix des pâtes à coke — conditions de la cokéfaction — pratique du haut fourneau.

Propriétés des constituants du lit de fusion pour des hauts fourneaux de grande taille

La conduite du processus dans les hauts fourneaux modernes de grande taille exige un contrôle précis de toutes les matières de l'enfournement et des paramètres de marche. Ce n'est que de cette façon que l'on obtient des valeurs optimales pour la productivité et la consommation d'énergie, comme c'est par exemple le cas de la conduite, au Japon, des hauts fourneaux modernes de grande taille.

Avec l'appui de la CECA, on a étudié, par des essais industriels, comment agissent les propriétés physiques et technologiques des constituants du lit de fusion sur la marche du haut fourneau et les résultats d'exploitation. Ces essais furent exécutés sur le haut fourneau de grande taille n° 5 de l'usine de Tarente de la société Italsider, avec la participation du CSM de Rome.

Optimisation de l'allure du fourneau

A la fin de sa première campagne, le haut fourneau n° 5 aura produit environ 19 millions de tonnes de fonte. Ce résultat correspond à 5 000 tonnes par m^3 de volume intérieur, valeur tout à fait comparable avec les meilleurs résultats européens et japonais. Ce fourneau a bénéficié pendant deux années de modifications programmées systématiquement dans la composition de son lit de fusion. En particulier, la composition de l'aggloméré a été modifiée; le fourneau a été alimenté avec 85% d'aggloméré et 15% de boulettes.

On a pu juger quantitativement l'influence de ces facteurs liés au lit de fusion sur les performances importantes de la marche, telles que le débit du

vent chaud, la température du gaz de gueulard, les pertes thermiques et la consommation d'énergie. Ce faisant, on a pu, en même temps, déterminer les paramètres de conduite qui aboutissent à une allure régulière du fourneau tout en réalisant une haute productivité. Ces paramètres peuvent être mis en relation avec l'optimisation de la consommation d'énergie.

Propriétés du coke

La résistance à l'abrasion s'est révélée comme un facteur d'influence important. L'indice I_{20} de l'IRSID doit se situer au-dessus de 83. Une faible réactivité dans la zone des températures de 1 000 à 1 200 °C est également un facteur favorable. Une telle réactivité amène un abaissement du niveau de la zone de fusion dans le fourneau et une meilleure utilisation des gaz réducteurs.

La réactivité effective du coke est cependant influencée par l'absorption de métaux alcalins. Une augmentation de la teneur en MgO du laitier provoque une élimination plus accentuée des métaux alcalins par le laitier. Ceci semble être une voie pour optimiser la conduite du processus.

Propriétés de l'aggloméré

Les résultats des essais et les expériences acquises à Tarente ont conduit à attribuer aux propriétés de l'aggloméré une influence prépondérante sur les résultats d'exploitation et la marche du fourneau.

La proportion des fines dans l'aggloméré a une influence déterminante sur la productivité et sur la régularité de l'allure du fourneau. La portion des fines en dessous de 5 mm ne doit pas dépasser 1,5%. Chaque pour-cent en plus augmente la mise au mille de coke de 5 kg/tonne de fonte.

Les propriétés de l'aggloméré aux hautes températures sont extrêmement importantes. Elles ont été surveillées continuellement pendant les essais. Une augmentation de la température de ramollissement est accessible en accroissant la basicité, ainsi qu'en additionnant de la magnésie.

Une autre propriété importante de l'aggloméré est sa réductibilité. Elle agit sur l'allure du fourneau et sur la consommation d'énergie. On cherche à obtenir une teneur en FeO autant que possible inférieure à 5%.

Quelques-unes des questions évoquées dans ce contexte continuent à faire actuellement l'objet de recherches dans le cadre d'un vaste programme

exécuté sur le plan communautaire CECA, entre autres sur la réductibilité et le comportement aux hautes températures des composants du lit de fusion en relation avec la perméabilité du fourneau.

Ce complexe de problèmes possède, par ses effets possibles sur la consommation d'énergie dans le procédé du haut fourneau, une signification économique extraordinairement importante.

Application de gaz réducteurs dans le haut fourneau

Indépendamment de tous les efforts déployés pour diminuer la consommation de coke dans le haut fourneau, depuis déjà de nombreuses années, on a recherché et pratiqué la substitution du coke par d'autres combustibles ou matières réductrices. Certes, dans une période où les prix de l'énergie augmentent rapidement, il peut arriver, dans notre cas, que des décalages de prix entre les différentes sources d'énergie conduisent en très peu de temps à des changements radicaux dans la technique du procédé. C'est ainsi que l'injection d'huile lourde par les tuyères à vent a été pratiquée pendant de nombreuses années avec succès et qu'elle a aussi subi des améliorations techniques. En raison des décalages dans les prix de l'énergie, cette technique a cependant, dans un laps de temps très bref, perdu tout intérêt économique.

De nouvelles solutions doivent être trouvées et être prêtes à être appliquées à temps, grâce à une planification prévoyante des recherches.

La recherche CECA des années 70 a également mis d'importants accents sur le domaine de la substitution d'énergie.

L'insufflation de gaz réducteurs chauds au bas de la cuve a été étudiée dans des essais au haut fourneau. L'objectif suivant des recherches a été la production de gaz réducteurs surchauffés en milieu plasmatique et leur insufflation dans le haut fourneau. Dans ces derniers temps, on a encouragé des travaux de développement d'injection de charbon par les tuyères.

Insufflation de gaz réducteurs chauds

Au voisinage du niveau des tuyères à vent, dans ce qu'on appelle les étalages du haut fourneau, règnent les plus hautes températures: environ 2 000 °C. Dans cette zone, non seulement le minerai réduit partiellement est porté à la fusion, mais encore le coke solide s'y trouve gazéifié. L'oxyde

de carbone (CO) ainsi produit effectue environ la moitié du travail de réduction. La réduction des minerais par les gaz commence aux environs de 1 200 °C et se termine pour des températures légèrement supérieures à 500 °C, donc dans une zone du haut fourneau située beaucoup plus haut. La moitié restante du travail de réduction s'effectue par la réaction des minerais en phase liquide avec le carbone solide, ce qui amène une forte consommation thermique dans les étalages.

L'idée de diminuer ou d'empêcher dans une large mesure la part du travail de réduction réalisée par le carbone solide, au moyen d'un apport supplémentaire de gaz réducteurs produits à l'extérieur du haut fourneau avait déjà été appliquée avec succès à une échelle expérimentale. Cependant, il règne encore un manque de clarté sur le degré de pénétration dans toute la section d'un haut fourneau industriel de tels gaz insufflés dans la partie inférieure de la cuve.

C'est la raison pour laquelle, en 1972, on a exécuté un programme de recherches encouragé par la CECA dans un petit haut fourneau industriel. La *figure 11* montre le profil du haut fourneau n° 3 de la société Cockerill à Seraing, lequel a été utilisé par le CRM pour les essais. Ce fourneau a un diamètre au creuset de 4,60 m. Le gaz réducteur a été produit par oxydation catalytique de gaz naturel au moyen de vapeur d'eau. Après refroidissement et lavage pour éliminer le CO₂, le gaz réducteur était amené au haut fourneau et réchauffé jusqu'à 800-1 000°C. L'insufflation s'est faite au moyen de 8 tuyères à gaz placées à la partie inférieure de la cuve.

Les essais ont conduit à avoir en moyenne un taux de remplacement de 0,24 kg de coke (à 85 % sur humide) par m³ de gaz réformé chaud; mais il convient aussi de tenir compte d'une augmentation importante du pouvoir calorifique du gaz de gueulard. L'injection simultanée d'huile lourde par les tuyères à vent possède un effet additionnel. La comparaison avec les calculs théoriques amène à conclure à une bonne pénétration du gaz réformé à l'intérieur du fourneau.

L'utilisation industrielle de ce procédé est déterminée dans une large mesure par les prix de chacune des sources d'énergie. Pour la production de gaz réformé, on peut utiliser le gaz de gueulard comme source de chaleur. La gazéification du lignite ou de houille de qualité inférieure pour la production d'un gaz réducteur utilisable au haut fourneau se trouve dans le domaine des possibilités. Et, précisément, le développement de la gazéification du charbon est poursuivi avec un grand intérêt pendant ces derniers temps par la totalité de l'industrie européenne.

Production de gaz réducteurs surchauffés en milieu plasmatique

Sur la base d'études préliminaires du CRM, il est apparu que l'insufflation de gaz réducteurs surchauffés au-dessus de 2 000°C directement dans les tuyères à vent du haut fourneau était une possibilité de remplacer encore davantage de coke de haut fourneau. Dans ce cas, les exigences imposées à la composition du gaz réducteur sont moins sévères que celles pour la réduction directe ou pour l'insufflation dans la cuve du haut fourneau. La production de gaz réducteur à partir de gaz de cokerie ou de gaz naturel avec recyclage des gaz usés est donc ici absolument envisageable.

Dans ce but, une recherche exécutée par le CRM avec l'aide financière de la CECA, a établi les bases expérimentales nécessaires. On a d'abord recherché la production d'un gaz réducteur chaud en milieu plasmatique. La *figure 12* donne le schéma du four expérimental à plasma. Cette installation se compose de trois chalumeaux à plasma de 35 kW chacun, avec une superposition de courant alternatif triphasé d'une puissance de 280 kW. Dans le four à plasma, on ne dispose que de durées de réaction extrêmement brèves; ceci a été un des plus gros problèmes de la nouvelle technique. Il s'est cependant révélé, lors d'essais avec des mélanges gaz naturel + air et gaz naturel + CO₂, que pour des températures à partir de 2 100°C, les temps de résidence dans le réacteur d'environ 20 ms que l'on pouvait obtenir suffisaient pour réaliser un réformage chimique largement supérieur à 90 %. La conception géométrique et électrique du réacteur, ainsi que la composition du mélange gazeux à l'entrée de l'appareil, déterminent les qualités du gaz réducteur produit. Les conditions de marche les plus avantageuses furent déterminées à l'aide des résultats de vastes séries d'essais.

Haut fourneau expérimental

Pour l'exécution des essais à l'échelle pilote de production de fonte liquide avec insufflation de gaz réducteurs surchauffés, on a construit un petit haut fourneau d'essai. Ce fourneau a un diamètre au creuset de 0,30 m et une hauteur utile de 2,50 m; il ne possède qu'une seule tuyère à vent et est relié à un four à plasma. La capacité journalière est d'environ 3 tonnes de fonte. La *figure 13* donne une coupe longitudinale de ce four.

Les essais à l'échelle pilote conduits avec un enfournement de 100 % d'aggloméré ont donné, pour la période de référence, avec une conduite classique du fourneau, une consommation de coke de 717 kg/t de fonte. Au cours des essais avec pro-

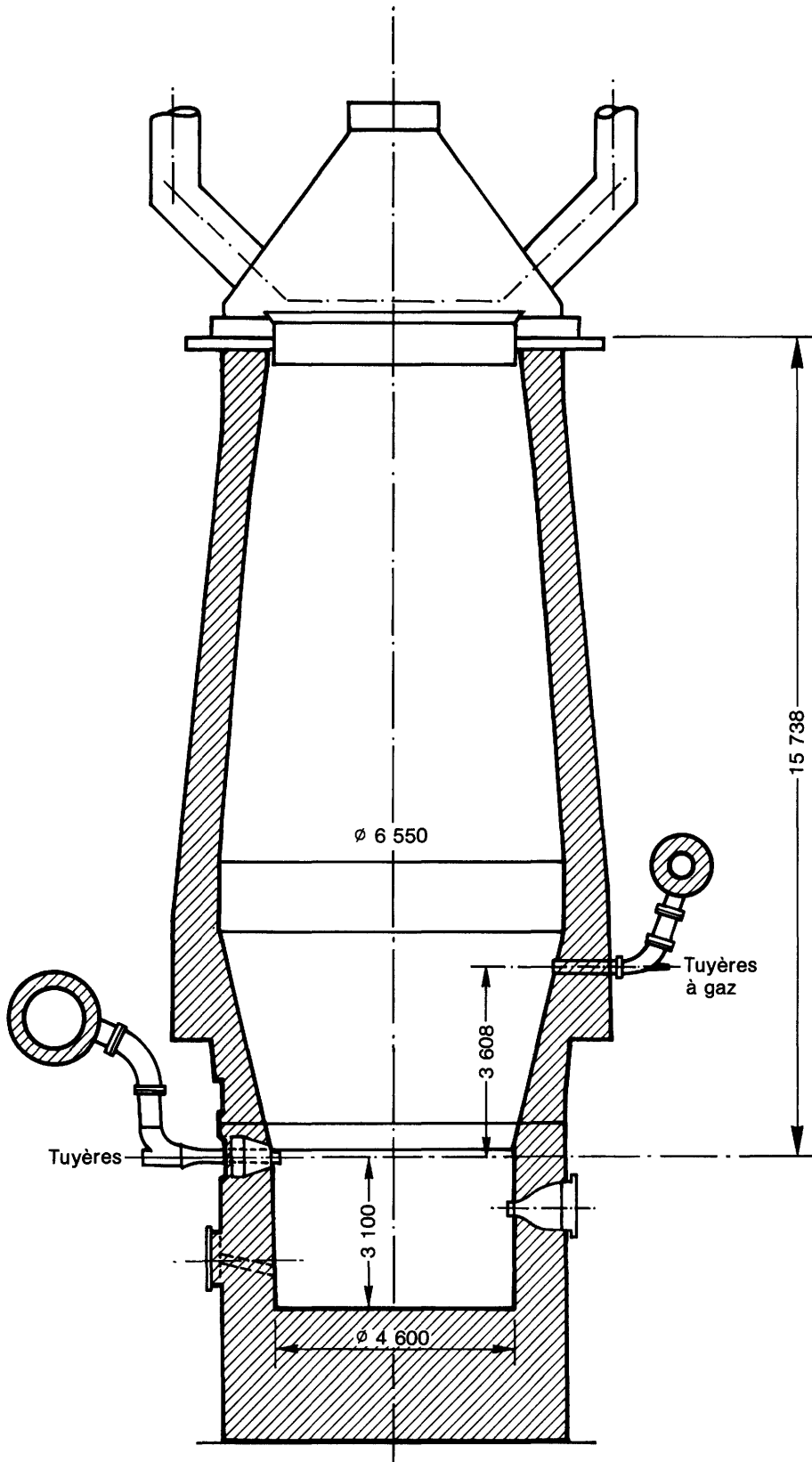


Figure 11: Coupe longitudinale du haut fourneau n° 3

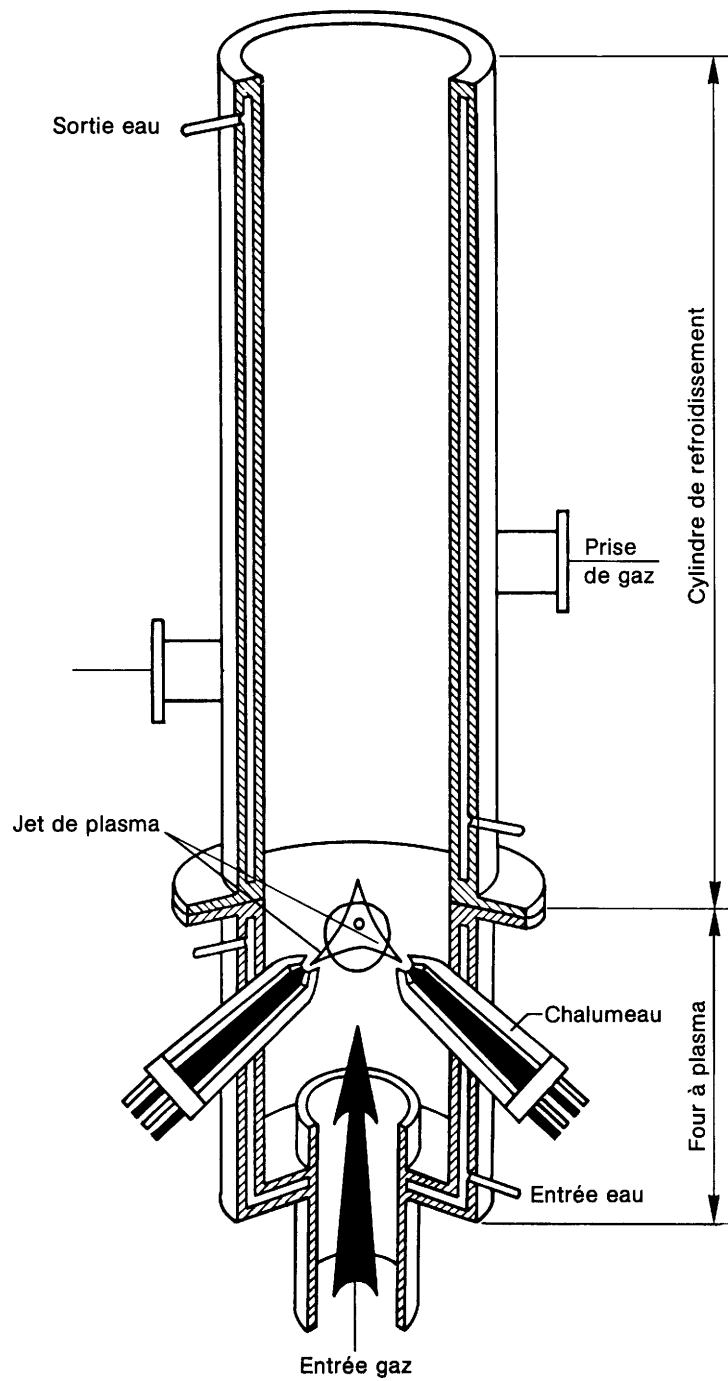


Figure 12: Four expérimental à plasma

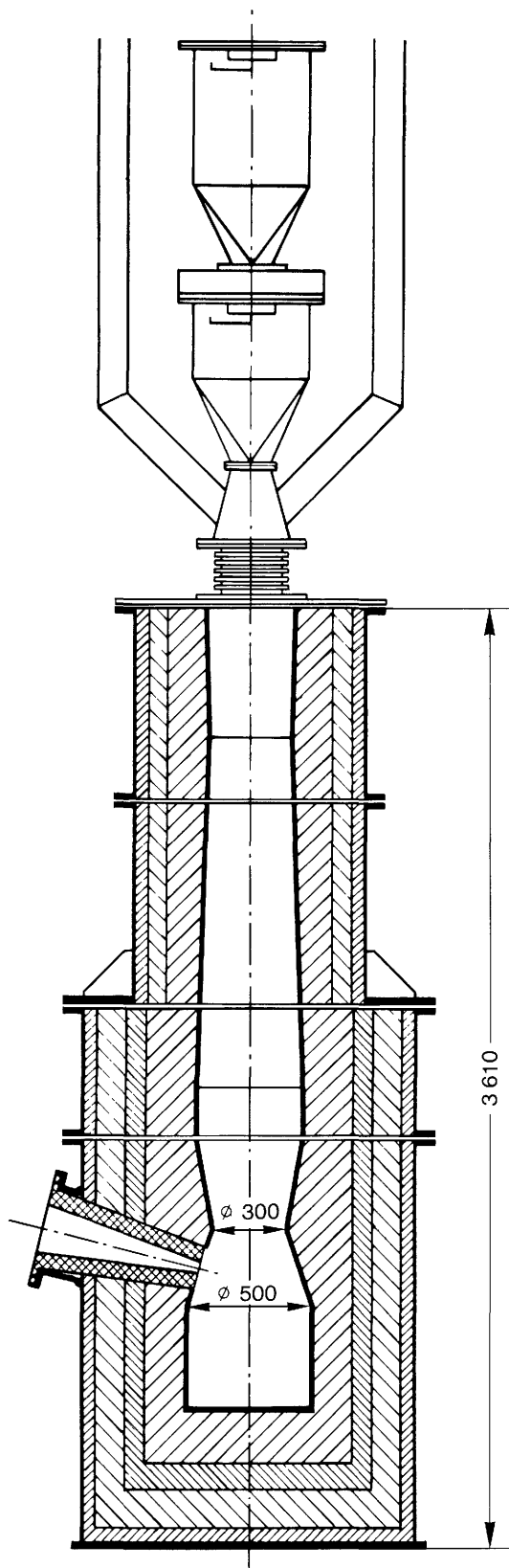


Figure 13: Haut fourneau expérimental

duction de gaz surchauffés, réformés en milieu plasmatisque, on a pu atteindre comme meilleur résultat une mise au mille de coke de 179 kg/t de fonte. Ce chiffre correspond à la substitution d'environ 75% du coke enfourné. La part du coke brûlé au front des tuyères diminue d'environ 380 kg/t de

fonte et la part du coke utilisé pour la réduction directe d'environ 150 kg/t de fonte (90%).

Une mise au mille de 180 kg/t de fonte ne semble pas être la valeur limite absolue du point de vue métallurgique; cependant la technique du haut fourneau ne subit pas de modifications fondamentales. Plus exactement, il en résulte des voies entièrement nouvelles pour une conduite directe de la marche du fourneau; c'est ainsi, par exemple, que la teneur en silicium de la fonte dépend directement de la température facilement réglable du gaz réducteur. Au contraire de la conduite classique du haut fourneau, les interventions de commande se répercutent ici immédiatement et ceci donne de nouvelles possibilités de réglage du procédé.

La nouvelle technique apporte une contribution supplémentaire à la diversification des différentes formes d'énergies utilisables par le haut fourneau. Après achèvement de l'actuel programme de recherches, il restera à faire le pas suivant des essais à l'échelle semi-industrielle. Les investissements relatifs à ces essais sont en cours. L'industrie sidérurgique des pays en dehors de l'Europe montre également un vif intérêt pour cette nouvelle technique.

Comportement du zinc et des métaux alcalins dans le haut fourneau

Plusieurs éléments introduits avec le lit de fusion, comme le zinc ou les métaux alcalins perturbent la marche du haut fourneau. Ils favorisent la formation de garnissage dans le fourneau, attaquent le revêtement réfractaire et augmentent la mise au mille de coke. En outre, circonstance aggravante, le zinc en particulier, mais aussi les métaux alcalins enrichissent leur teneur par recyclage à l'intérieur du haut fourneau et aggravent ainsi leurs effets nuisibles.

Ce problème important, surtout pour les utilisateurs de minerais européens, a conduit la CECA à encourager un programme de recherches sur le comportement du zinc et des métaux alcalins dans le haut fourneau. Ces recherches ont été exécutées par l'Irsid à Maizières-lès-Metz.

Zinc

On a cherché à déterminer exactement les circuits suivis par le zinc à l'intérieur du fourneau, circuits déjà connus dans leur principe et représentés sché-

matiquement dans la *figure 15*. Le zinc est apporté dans le fourneau par les composants du lit de fusion, le coke, les minerais, les agglomérés ou les boulettes. Une proportion importante est normalement contenue dans les agglomérés, puisque ceux-ci recyclent les déchets d'usine, comme les poussières de gueulard, les boues d'aciérie, etc. Dans la zone médiane du fourneau, s'établit un circuit de recirculation du zinc, lequel est commandé par les phénomènes alternés de réduction et d'oxydation, ainsi que par ceux de volatilisation et de condensation.

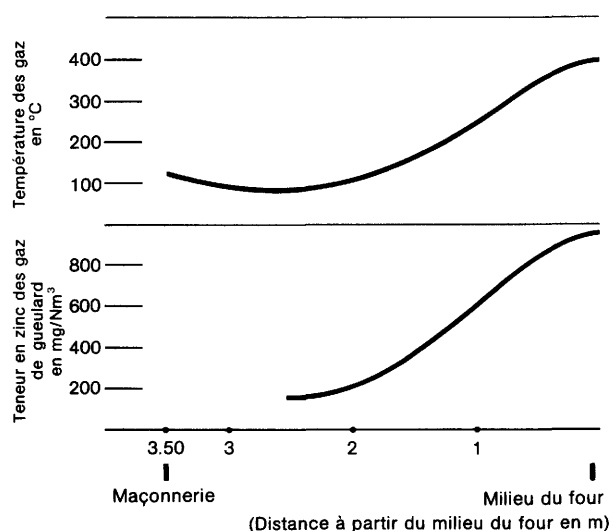


Figure 14: Profil de température au niveau du gueulard et répartition du zinc dans les gaz de gueulard

Un autre circuit se forme dans la partie supérieure du fourneau; il est, en grande partie, déterminé par la fusion, la volatilisation et la condensation du zinc métallique. Ce circuit permanent provoque une accumulation de zinc dans le fourneau. En conséquence, il se forme des garnissages dans le fourneau, et le circuit du zinc descend dans les zones plus basses du fourneau. Ce processus conduit finalement à l'évacuation du zinc par le trou de coulée et d'un autre côté à une augmentation de la teneur en zinc des poussières emportées par le gaz au gueulard.

Des essais sur un modèle de simulation d'un réacteur à contre-courant ont apporté des données complémentaires. C'est ainsi que le cycle oxydation-réduction pour une masse circulante de 25kg de zinc par tonne de fonte nécessite un supplément de mise au mille de coke d'environ 11 kg/tonne de fonte.

Les paramètres de marche du fourneau qui favorisent un accroissement de l'évacuation du zinc au gueulard, ont été établis comme suit:

- températures élevées du gaz de gueulard,
- marche avec une faible contre-pression et
- basse teneur en hydrogène dans le gaz.

Des essais exécutés sur un haut fourneau industriel de 8,60m de diamètre au creuset ont pu confirmer certaines de ces constatations. Comme le montre la *figure 14*, il existe une relation étroite entre la distribution des températures du gaz de gueulard sur une section transversale du fourneau et les différentes teneurs en zinc dans le gaz de gueulard.

Métaux alcalins

On a constaté qu'il s'installe aussi un circuit de recyclage des composés du potassium et du sodium, lequel cependant se situe dans la zone inférieure du fourneau, dans le domaine des températures entre 1 100 et 1 400°C. Les alcalins sont introduits par les minerais, les agglomérés et les cendres du coke. La recherche sur la stabilité, dans les conditions régnant dans le haut fourneau, des composés alcalins ainsi apportés a abouti à un schéma de recirculation représenté, dans une forme simplifiée, par la *figure 15*. Tout comme pour le zinc, les phénomènes d'oxydation et de réduction, de volatilisation et de condensation sont les paramètres du déplacement du circuit de recyclage. D'un autre côté, le laitier liquide présent dans le haut fourneau à ces endroits, joue un rôle important. Ce laitier fait partie du circuit grâce à des phénomènes de rétention.

A l'aide de méthodes de gravimétrie thermique, on a étudié de plus près la capacité des laitiers de haut fourneau à dissoudre l'oxyde de potassium. Ces essais ont apporté une série de connaissances importantes pour la pratique du haut fourneau:

- pour une basicité constante du laitier, une plus grande quantité d'alcalins peut être évacuée hors du fourneau avec le laitier, si une partie de la chaux de ce laitier est remplacée par une quantité équivalente de magnésie. Les propriétés désulfurantes du laitier ne sont pas notablement modifiées par cette substitution;
- un abaissement de la température du laitier agit dans le même sens.

En outre, la recherche a apporté des indications importantes sur l'effet nuisible des alcalins sur la résistance mécanique du coke dans la zone des températures élevées. C'est précisément dans cette zone que la teneur du coke en alcalins peut grimper jusqu'à dix fois sa valeur primitive.

Application à la pratique du haut fourneau

Pour évacuer le zinc hors du haut fourneau, on s'est, dans différents cas, résolu à régler la distribution des températures des gaz au gueulard de telle façon qu'il se crée une pointe de température au centre du fourneau. Les connaissances acquises grâce à cette recherche sur les domaines de tem-

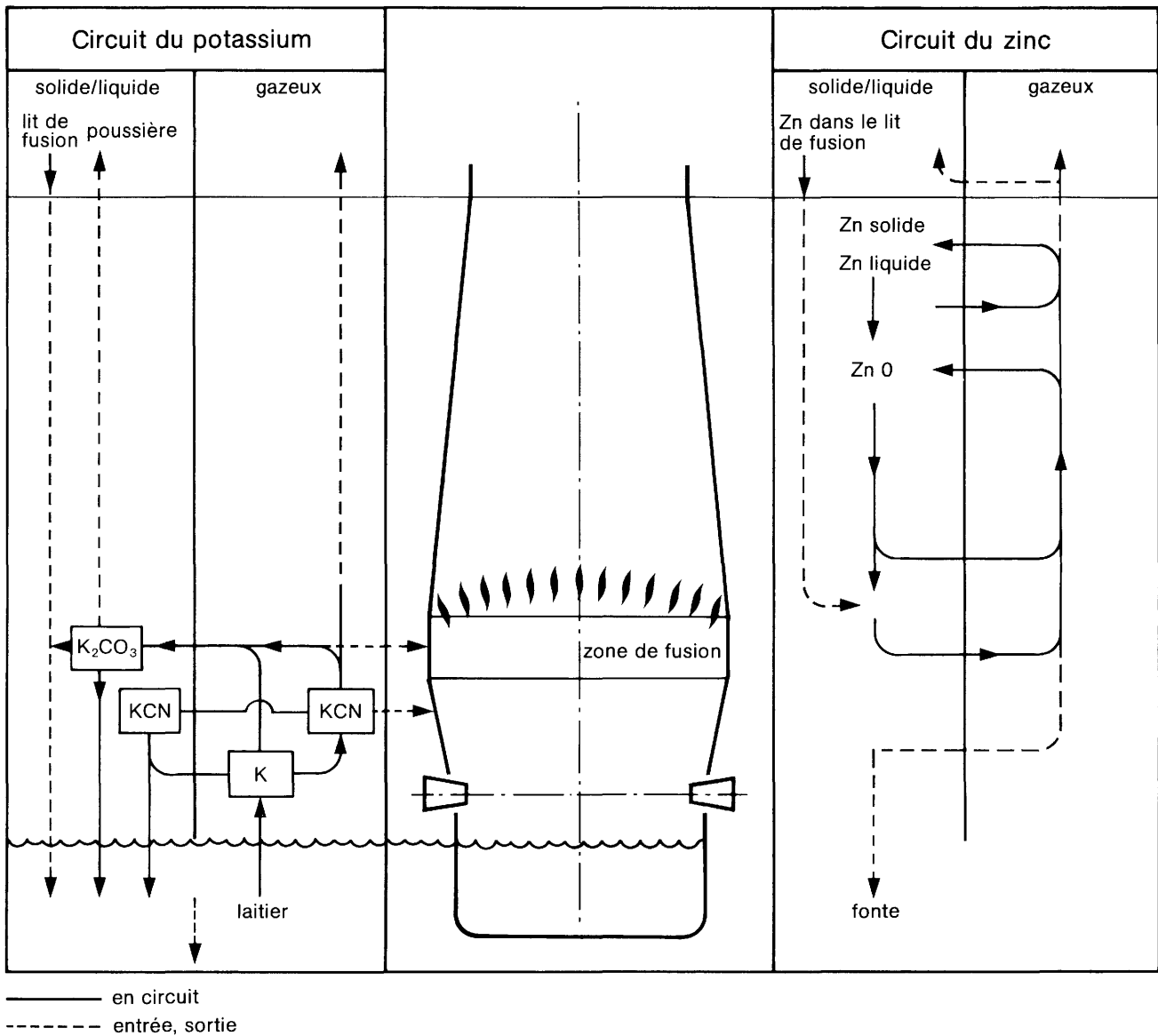


Figure 15: Circuit du zinc et du potassium dans le haut fourneau

pérations efficaces pour l'évacuation du zinc ont été ici mises en pratique.

L'exploitation des résultats industriels a confirmé l'influence bénéfique de la teneur en magnésie du laitier sur l'évacuation du potassium. Dans ces derniers temps, quelques hauts fourneaux sont conduits sciemment dans ce but avec des teneurs plus élevées en magnésie dans le laitier.

Mélanges réfractaires pour rigoles de coulée au haut fourneau

Les développements dans la technique du procédé du haut fourneau ont conduit, dans ces derniers temps, à construire des unités de production toujours plus grandes. Malgré l'automatisation et la

mécanisation de parties essentielles du haut fourneau, comme le chargement au gueulard, les opérations sur le plancher de coulée du haut fourneau sont encore, en général, peu mécanisées. Les travaux au système des rigoles exigent de gros efforts physiques de la part des ouvriers lesquels sont soumis à de fortes sollicitations du fait de la chaleur et de la poussière.

C'est pourquoi, on essaie d'augmenter la durée de vie du revêtement des rigoles de coulée, afin que les réparations ne soient nécessaires qu'à des intervalles de temps plus espacés. Pour cette raison, l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh, avec l'aide de la CECA, a exécuté, dans une installation expérimentale, des recherches sur la durée de vie de différents mélanges réfractaires garnissant les rigoles de coulée du haut fourneau.

Installation expérimentale en circuit fermé

L'installation pilote, représentée par la *figure 16*, est constituée par un circuit fermé, dans lequel une quantité de fonte relativement petite (5t) circule avec un débit massique important (500 à 600t par heure). Dans un four de stockage au gaz, la fonte est soit maintenue en température, soit réchauffée. A l'aide d'une rigole de transport électromagnétique, la fonte est amenée à un niveau plus élevé. Après un changement de direction, la fonte s'écoule parallèlement à la rigole de transport dans une rigole d'essai pour revenir dans le four. Les efforts principaux des travaux portaient sur :

- la recherche de la durée de vie de différentes masses pour rigoles, ainsi que sur des investigations minéralogiques des causes de l'usure;
- les mesures à prendre lors de la construction pour diminuer l'usure dans la zone du point d'impact du jet de fonte sortant du trou de coulée.

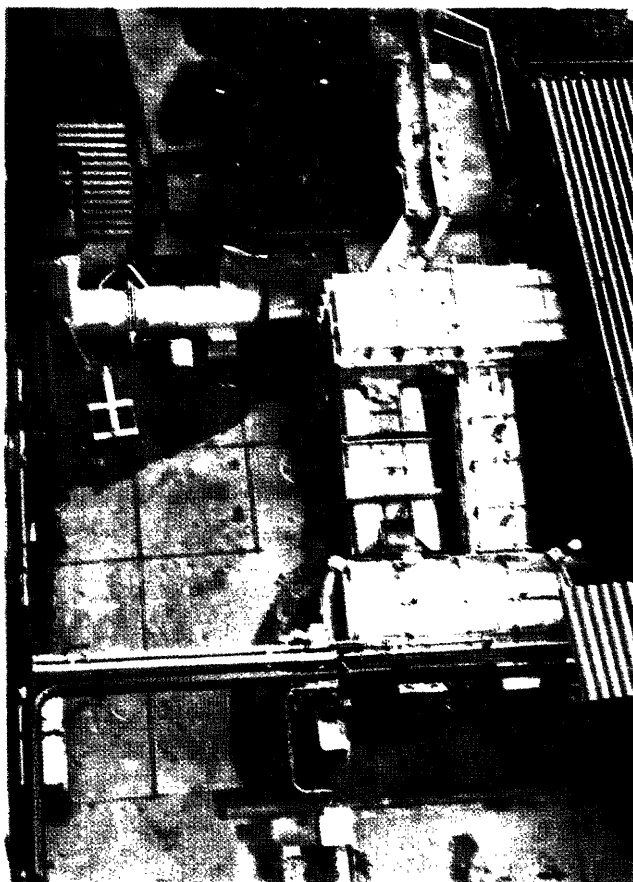


Figure 16: Installation d'essai de masses réfractaires

Dans cette installation pilote, on a essayé sept différentes masses réfractaires pour rigoles. On a utilisé des masses à damer acides et basiques, liées au goudron et aussi des masses contenant des

produits riches en alumine avec des teneurs variables en carbure de silicium (SiC). La *figure 17* donne l'érosion en fonction du débit de la fonte dans la rigole. La plus faible usure constatée avec le pisé n° 7 (masse riche en alumine, avec SiC) est à attribuer à la teneur plus élevée du SiC, qui présente une plus forte conductibilité calorifique et qui ainsi maintient dans des limites la sollicitation thermique.

Sur la base des recherches sur la durée de vie, on a pu donner aux hauts fourneaux des valeurs de référence sur le comportement à l'érosion de certaines masses de rigoles. Après achèvement des essais, on a mis en pratique trois masses de rigoles, qui, encore à l'heure actuelle, sont utilisées avec un très gros succès.

Érosion au point d'impact

La zone principale de l'usure du système de rigoles du haut fourneau est le point d'impact du jet de fonte à la sortie du trou de coulée. En chute libre, la fonte liquide possède, au point d'impact, une énergie cinétique plus grande en comparaison de celle d'un écoulement normal. Ceci a pour conséquence que la masse réfractaire qui se trouve juste en dessous de la chute est fortement attaquée par le jet de la chute.

Par la formation d'une «cuvette de fonte» dans la zone d'impact, la force du jet se trouve amortie. Au cours de plusieurs essais, on a aménagé au point d'impact des bains de différentes profondeurs, et on les a comparés avec les méthodes courantes de construction de rigoles. Avec une profondeur de bain suffisante, on a pu diminuer l'érosion de 60% dans l'installation expérimentale. Dans la pratique, le système de rigoles des hauts fourneaux comporte maintenant exclusivement des rigoles à cuvette. Avec cette technique de mise en œuvre, la résistance à l'érosion des rigoles atteint 100 000 à 300 000 tonnes de fonte. Les formes de rigoles courantes doivent être renouvelées après seulement environ 20 000 à 30 000 tonnes de fonte.

La recherche, proche de la pratique à l'installation pilote a permis de transposer les résultats obtenus en très grande partie et en très peu de temps, sur le haut fourneau industriel.

Utilisation du gaz de haut fourneau comme combustible en sidérurgie

Le gaz de haut fourneau est un sous-produit de la production de fonte. C'est un gaz pauvre avec un faible pouvoir calorifique (environ 1/5 du pouvoir

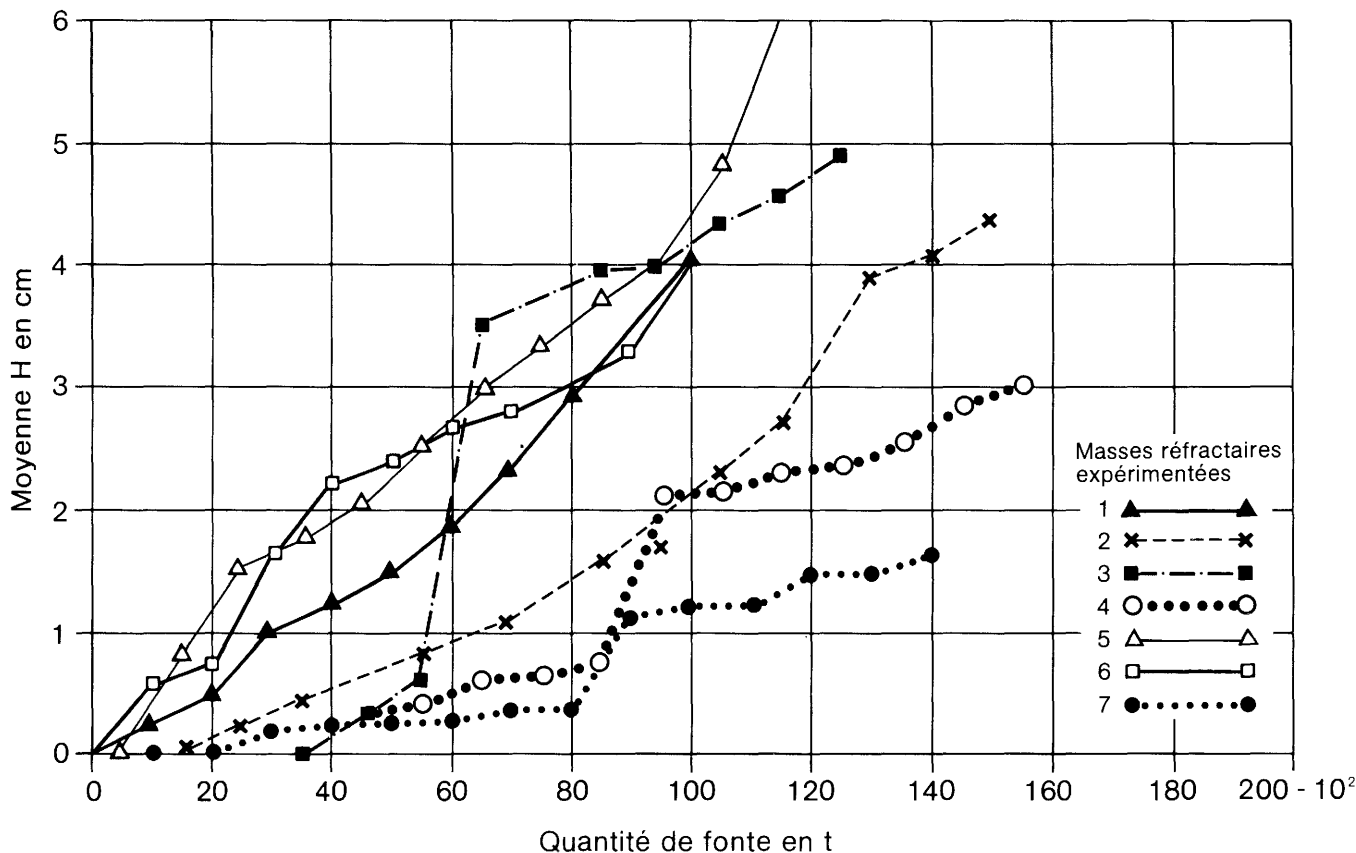


Figure 17: Usure des masses réfractaires pour rigoles de coulée en fonction de la production de fonte

calorifique du gaz de cokerie); il ne possède de ce fait que des possibilités limitées d'emploi. Habituellement, il est utilisé pour des combustions dans le domaine des températures moyennes, comme par exemple la production de vapeur, le chauffage des cowpers, etc., pour lesquelles on doit quelquefois avoir recours à un enrichissement par le gaz naturel et/ou à une addition d'oxygène. Malgré tout, ce gaz a une grande importance économique, si l'on considère qu'en ordre de grandeur, environ un tiers de l'énergie enfournée dans le haut fourneau sous forme de coke se retrouve dans le gaz de haut fourneau.

Dans de nombreuses usines sidérurgiques européennes, se dessine une tendance à une utilisation décroissante du gaz de haut fourneau pour des combustions à basses températures, donc pour la production de vapeur et d'électricité, etc. Lorsqu'il se présente ainsi un excédent de gaz de haut fourneau, il faut trouver les voies et moyens pour pouvoir utiliser ce gaz, autant que possible économiquement également dans des combustions à des températures élevées, comme par exemple dans les fours de laminaires. Dans ce dernier cas, on demande de hautes températures de flammes. Ces températures peuvent être atteintes de différentes manières:

— enrichissement de l'air de combustion ou son remplacement par l'oxygène;

— enrichissement du gaz de haut fourneau à l'aide de gaz naturel, de gaz de cokerie ou de gaz de convertisseur;

— préchauffage du gaz et/ou de l'air de combustion.

L'optimisation de ces différents moyens, en choisissant les combinaisons les plus favorables eu égard aux exigences de chaque combustion particulière, présente un intérêt économique considérable. Dans ce but, la CECA a encouragé une recherche qui a été exécutée par la Fondation internationale sur les flammes à Ijmuiden.

Recherches dans un four pilote

Pour les essais à l'échelle pilote, on a utilisé un four de 2m × 2m × 6,25m de dimensions. Des dispositions particulières ont été prises pour simuler le plus près possible de la réalité la température de la surface et l'effet de refroidissement des produits à réchauffer (brames ou blooms). La combustion a été assurée par un brûleur de 2MW nouvellement développé. En outre, le type de la flamme produite et les conditions aérodynamiques dans le four devaient, autant que possible, être reproductibles indépendamment du mode de fonctionnement, donc de la nature du combustible, de l'enrichissement en oxygène, du préchauffage, etc.

On a attaché une particulière importance à la technique des mesures. En appliquant toutes les considérations techniques sur la combustion, les efforts principaux se sont portés sur une mesure précise de la transmission de chaleur, sur la température et la stabilité des flammes, sur les propriétés de la combustion, ainsi que sur les émissions dans l'environnement, en particulier les gaz de formule NO_x .

En utilisant séparément ou en combinaison l'enrichissement en oxygène, le préchauffage et l'enrichissement du gaz de haut fourneau par le gaz naturel, l'exécution des essais de combustion a donné une masse de résultats. Ceux-ci ont été introduits dans un modèle disponible de simulation de la combustion.

Modèle mathématique de simulation et études de rentabilité

L'exploitation de tous les résultats a amené à améliorer le modèle et a permis ainsi l'extrapolation vers d'autres conditions limites de combustion. De cette façon, les données obtenues peuvent être directement appliquées à toutes les situations techniques et économiques qui se présentent dans l'industrie. En principe, la température théorique de la flamme s'est révélée comme la plus importante variable particulière pour les propriétés de transmission de chaleur et peut être ainsi utilisée avec une bonne approximation comme grandeur d'orientation.

Un exemple d'une étude de rentabilité menée à partir de cette base est illustré par la *figure 18*. Celle-ci montre les économies obtenues sur les coûts en fonction de l'enrichissement du gaz de haut fourneau par le gaz naturel pour différents rapports de prix oxygène/gaz naturel et gaz de haut fourneau/gaz naturel, ainsi que pour différentes conditions de préchauffage. Pour des raisons de technique énergétique, l'enrichissement par le gaz naturel ne doit pas dépasser 10%; ceci correspond à une valeur de 0,55 pour le rapport thermique gaz naturel/combustible utilisé. Les diagrammes montrent que l'enrichissement par l'oxygène est économiquement plus favorable que l'enrichissement par le gaz naturel, lorsque par exemple, on part, dans les conditions posées ici en principe, d'un rapport de prix oxygène/gaz naturel de 0,3 et gaz de haut fourneau/gaz naturel de 0,1. L'économie ainsi réalisée peut atteindre entre 30 et 60% par rapport à l'enrichissement au gaz naturel.

Cependant, il faut constater qu'en principe l'utilisation du gaz de haut fourneau pour des combustions à faibles températures présente encore toujours la meilleure rentabilité. Dans ce cadre rentrent, par exemple, aussi les zones de préchauffage dans les fours à brames modernes. L'utilisation du gaz de haut fourneau pour des combustions à hautes tem-

pératures ne doit être pratiquée que lorsque toutes ces différentes possibilités auront été épuisées.

Les résultats de cette recherche seront utilisés dans une très large mesure par l'industrie. Ils sont à l'heure présente particulièrement d'actualité, alors que l'industrie sidérurgique est constamment confrontée avec des conversions de technique thermique, lesquelles doivent être prévues, afin que l'on puisse tenir compte des changements rapides des prix de l'énergie.

Réduction directe

Le développement des procédés de réduction directe est suivi avec attention par la sidérurgie européenne. Bien plus, des impulsions importantes pour la recherche de nouvelles technologies dans ce domaine sont venues de l'Europe pendant les 20 dernières années. Le procédé Purofer, développé à Oberhausen, en est un exemple. De même, des recherches sur les procédés de réduction en phase liquide ont été encouragées.

La production mondiale d'éponges de fer a atteint en 1980, 7,13 millions de tonnes, c'est-à-dire moins de 2% de la production mondiale de fonte. La source d'énergie utilisée est presque exclusivement le gaz naturel; c'est pourquoi les pays ayant un excédent en gaz naturel bon marché possèdent un extraordinaire avantage de localisation. Ces pays participeront certainement, dans les prochaines années, à l'augmentation des capacités de production d'éponges de fer d'une façon importante. Pour les conditions européennes, se pose plutôt la question de savoir si des réducteurs solides bon marché peuvent être utilisables pour la réduction directe. Cette réflexion a poussé la CECA à promouvoir un essai industriel communautaire sur la réduction directe à l'aide du lignite rhénan.

Fabrication d'éponges de fer au four tournant à l'aide de lignite

A cette recherche participaient les entreprises suivantes: la SA Mannesmann à Düsseldorf, la SA des Lignite Rhénans à Cologne, la SA Rhénano-westphalienne d'Électricité à Essen, la Sàrl Lurgi — Chimie et Techniques sidérurgiques à Francfort, ainsi que la SA des Aciers Fins Piratini à Porto Alegre au Brésil et la Sàrl des Tubes de Bous en Sarre.

Au cours d'essais antérieurs à l'échelle pilote, le lignite, hautement réactif, s'était déjà avéré comme particulièrement adapté pour la réduction directe au four tournant. Cependant, on sait bien que les résultats d'essais en laboratoire ou à l'échelle pilote ne sont pas, à coup sûr, transposables à une installation industrielle de production.

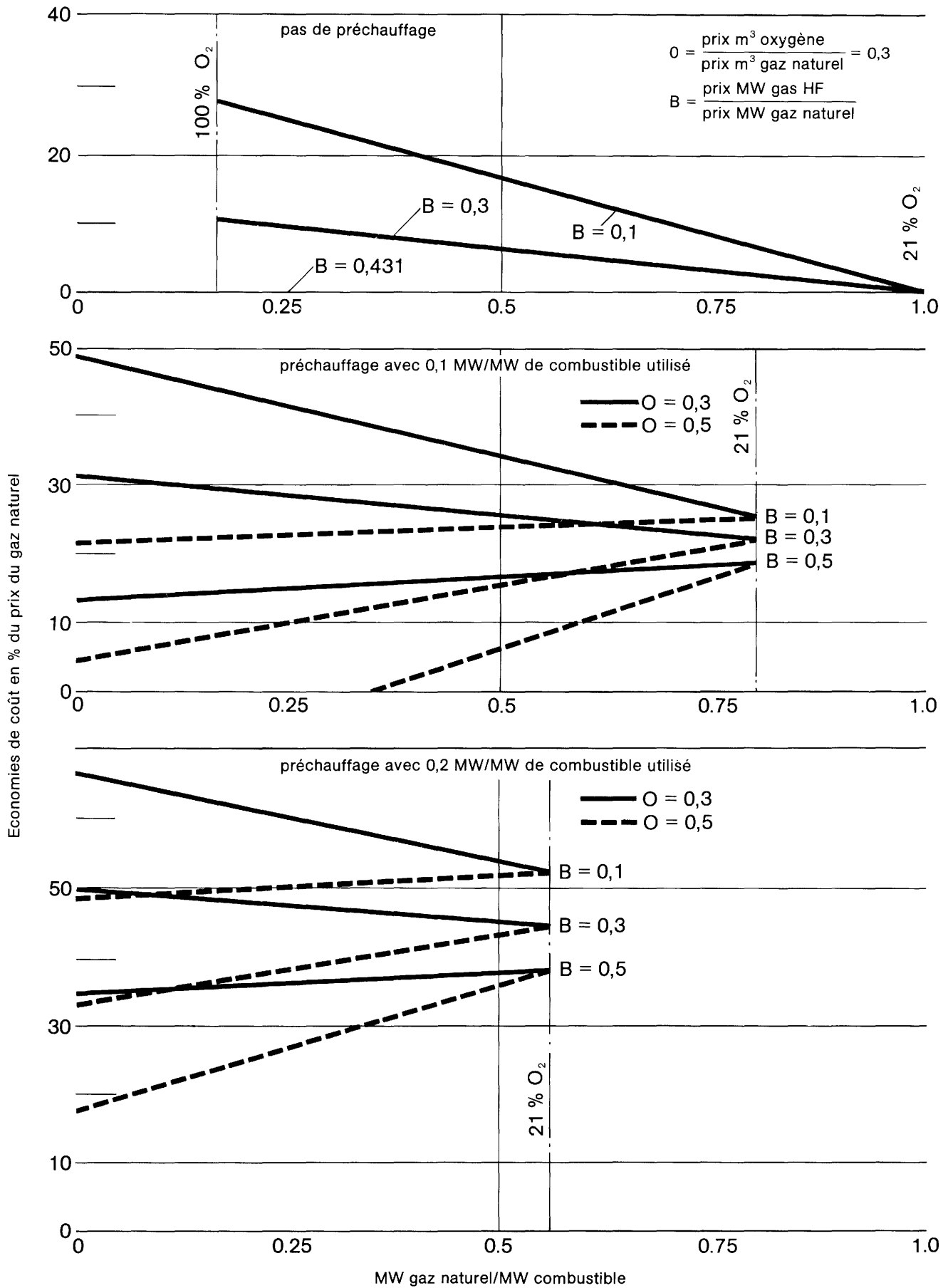


Figure 18: Influence de l'apport d'oxygène, du préchauffage et de l'enrichissement en gaz naturel sur les économies de coût

Pour un essai à grande échelle, s'est proposée l'installation SL/RN de la SA des Aciers Fins Piratini de Porto Alegre dans le sud du Brésil. On a pu ainsi utiliser les grandes distances de transport pour une recherche approfondie sur le comportement au transport aussi bien des briquettes de lignite que des éponges de fer. Ces dernières ont été traitées, pour la transformation en acier, dans un four électrique à arc à haute puissance de 60 tonnes de l'usine des Tubes de Bous en Sarre.

L'installation de four tournant des Aciers Fins Piratini a une capacité annuelle de 65 000 tonnes d'éponges de fer. Le four même a une longueur de 50m et un diamètre de manteau de 3,60m. La *figure 19* donne le schéma de circulation des matières de cette installation SL/RN. Pour ne pas modifier trop profondément les conditions de production, on a conservé, pour l'essai avec les briquettes de lignite, la même charge minérale constituée par les boulettes d'Itabira habituellement enfournées et présentant une teneur en fer d'à peine 66 %.

L'essai de trois semaines a montré qu'avec le lignite rhénan, on pouvait atteindre aussi bien la production maximum qu'une consommation rentable

de combustible. Cependant environ la moitié de l'énergie enfournée se retrouve sous forme de chaleur sensible et latente dans les fumées du four. C'est pourquoi, la récupération de la chaleur perdue est, pour le four tournant, décisive sur le plan de la rentabilité énergétique. Elle a, pour le choix du lieu d'implantation d'une installation sur la base du lignite, une particulière importance.

En tout, on a produit environ 2 800 tonnes d'éponges de fer avec un degré moyen de métallisation de 95%. Environ 1 000 tonnes de celles-ci ont été fondues dans un four à arc de l'usine à Tubes de Bous en Sarre au cours d'un programme d'essais différenciés. Ces essais ont montré que l'éponge de fer est bien appropriée pour l'enfournement au four électrique. La capacité de fusion a correspondu en moyenne à celle du four de Bous alimenté en ferrailles. Le transport de l'éponge de fer n'a pas amené de dégradations notables dans sa qualité; la réoxydation est restée en dessous de la limite décelable.

En résumé, cet essai industriel a fourni de bonnes bases pour estimer la rentabilité d'une installation de réduction directe en four tournant, marchant avec un combustible solide disponible en Europe.

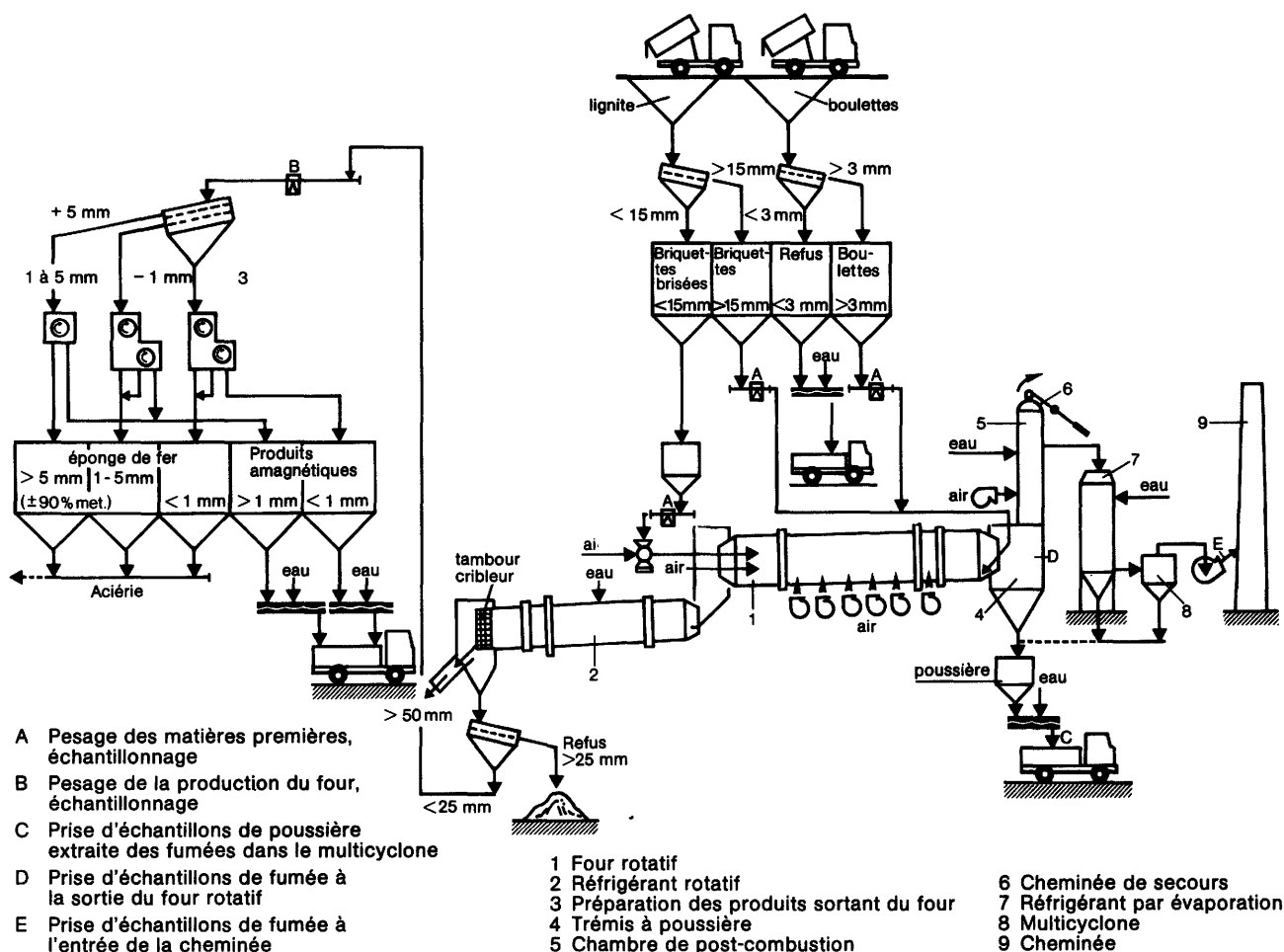


Figure 19: Schéma de principe de l'installation SL/RN Aços Finos Piratini, Brésil

3. Élaboration de l'acier — Coulée et solidification

Dans le développement de nouveaux procédés d'élaboration et de coulée de l'acier, la sidérurgie européenne a, de tout temps, joué, sur le plan mondial, un rôle de premier ordre. Par contre, l'utilisation pratique industrielle des nouvelles techniques s'est souvent introduite tardivement.

Consciente de cette réalité, la recherche CECA a pris comme un de ses centres de gravité l'automatisation des procédés d'élaboration de l'acier. Les systèmes de conduite des processus élaborés à partir des travaux de développement ont trouvé de multiples applications dans les aciéries à l'oxygène et dans les aciéries électriques.

Comme exemple pour l'activité générale de recherche dans le domaine de la production de l'acier, les pages suivantes donneront un aperçu sur les travaux de recherche concernant les propriétés des arcs électriques, le développement du procédé de refusion sous laitier électroconducteur et les matériaux réfractaires.

A partir de 1970, la CECA a encouragé aussi bien des recherches fondamentales sur la coulée et la solidification de l'acier que des travaux de recherche qui leur sont étroitement liés sur le développement de la coulée continue. Plusieurs programmes, étalés dans le temps sur des projets individuels, ont conduit à des résultats utilisables directement dans la pratique industrielle.

Automatisation des aciéries à l'oxygène

Le but final de chaque automatisation est la conduite du processus par ordinateur. D'autres

tâches des calculateurs dans les aciéries consistent dans la collecte générale des données pour le calcul des enfournements, les bilans matières et les consommations, l'édition de rapports et l'analyse de ces données.

Le développement rapide des calculateurs de processus dans les années 60 a permis, dans de nombreuses aciéries européennes, des travaux de développement pour la conduite des procédés. Une importante impulsion dans ce sens a été donnée par la CECA avec l'établissement d'un programme de recherches qui a été exécuté par l'Arbed à Luxembourg pendant les années de 1971 à 1974.

Déjà, lors de la construction de l'aciérie LDAC de l'Arbed à Esch-Belval, mise en service en 1967, on avait prévu l'emploi d'un ordinateur de processus et avancé en conséquence l'instrumentation nécessaire. D'autres travaux préliminaires ont consisté dans le développement des sondes de prélèvement des fumées et d'appareils acoustiques de mesure.

Nouveaux systèmes de mesure

L'établissement d'un modèle mathématique de conduite du processus nécessite au préalable une collecte autant que possible précise et reproductible des phénomènes métallurgiques pendant la période de soufflage. Pour la collecte des phénomènes dans la phase gazeuse, on a utilisé un spectromètre de masse, lequel permet d'analyser en même temps 6 composants du gaz avec un retard minimum. La mesure, combinée avec cette analyse, des débits de fumées et d'oxygène permet d'inventorier les deux réactions qui se déroulent dans le

convertisseur et qui sont capitales pour la conduite du processus :

- la vitesse de décarburation, en ce qui concerne les réactions en phase gazeuse;
- la vitesse d'oxydation de la scorie, en ce qui concerne l'ensemble des réactions de scorification.

La technologie mise au point de mesures acoustiques s'est avérée particulièrement bien appropriée pour le procédé LDAC, aux fins de déterminer sans retard l'état physique de la scorie. Le bruit mesuré près du bec du convertisseur à l'aide d'un appareil de mesure sonore est produit par la sortie du jet d'oxygène hors de la lance; son intensité diminue par la présence de scorie mousseuse dans le convertisseur. Par l'emploi de bandes de fréquences prééglées et de chaînes filtrantes sélectives, on parvient à étouffer les bruits parasites et à obtenir la plus grande dynamique possible des signaux sonores.

Fonctions du calculateur de processus

La figure 20 montre les variations des grandeurs mesurées et des grandeurs de réglage. La collecte automatique des données est conditionnée de

manière à être la plus complète possible pour maintenir dans les limites les plus étroites aussi bien les charges du personnel de conduite que les sources d'erreurs. Cette collecte s'étend depuis l'entrée du mélangeur jusqu'à l'évacuation des lingots.

Les données particulièrement nécessaires pour la conduite du processus par calculateur sont relevées automatiquement toutes les 3 secondes. A partir de ces données, on peut calculer en continu la vitesse de décarburation du bain, ainsi que la vitesse d'oxydation de la scorie.

Outre la conduite du processus, ont été développées pour le système de calcul les fonctions suivantes :

- Calcul des enfournements: le modèle mathématique contient en mémoires de base des valeurs de récurrence, des types de bilans matières et des modes statistiques d'adaptation qui permettent le calcul préalable des quantités à enfourner de fonte, de ferrailles, d'autres matières refroidissantes, de chaux, d'oxygène, etc.
- Conduite technique de l'aciérie: les données mises en mémoire sur des disques magnétiques constituent pour le personnel de l'aciérie une possibilité commode pour faire les rapports.

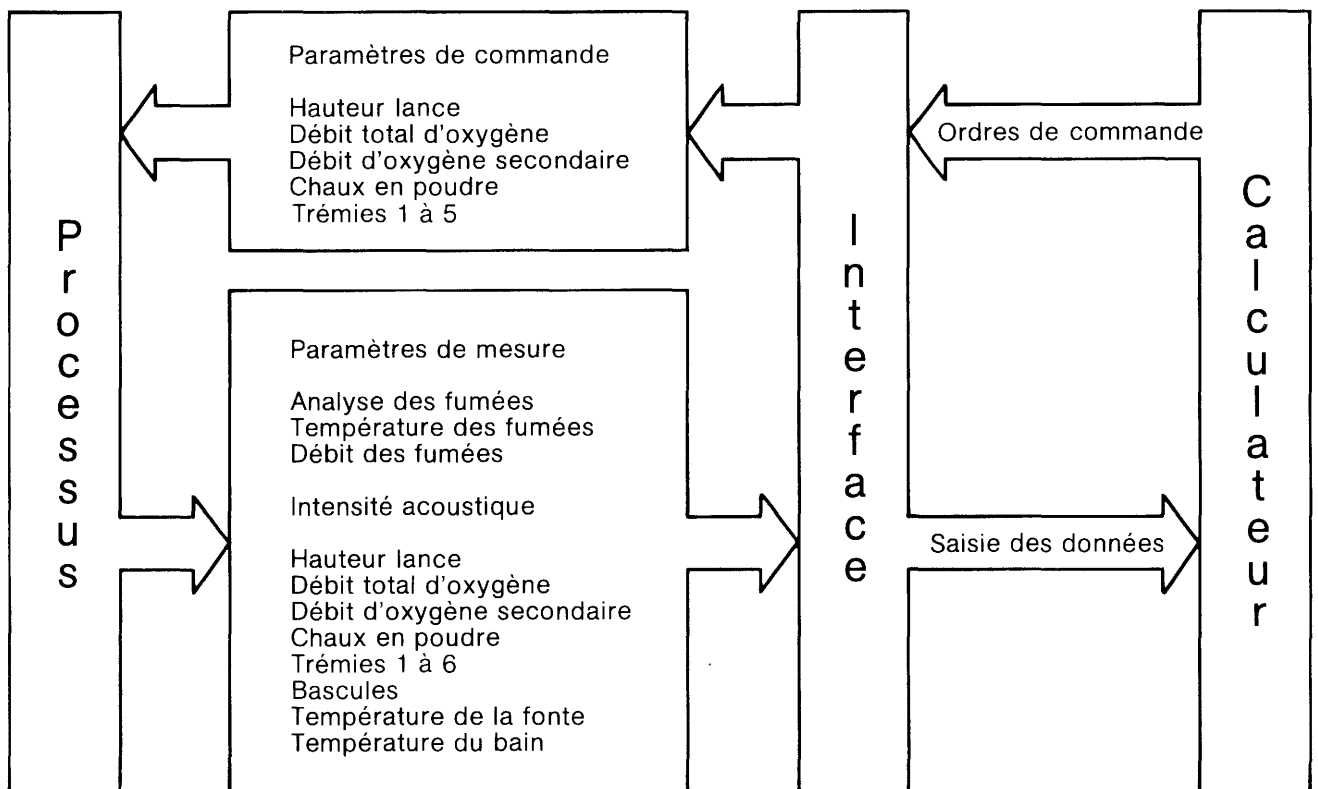


Figure 20: Influence des paramètres de mesure et de commande

- Banque de données: l'utilisateur possède à disposition, en dialoguant avec des appareils de visualisation des données, une série de possibilités d'exploitation de ces données.

- Dispersion amoindrie des températures de fin de soufflage.
- Conduite plus simple et plus claire pour le poste de commande du convertisseur.

Conduite du processus par ordinateur

Dans le cadre du programme CECA qui s'est terminé en 1974, on a pu développer une conduite semi-automatique du processus des deux phases de l'affinage dans le procédé LDAC, en les subdivisant en huit périodes caractéristiques de soufflage. Le choix de la période était réservé par priorité au contremaître de soufflage qui disposait, comme base pour sa décision, de la courbe de la vitesse de décarburation du bain, de la vitesse d'oxydation de la scorie et de la mesure acoustique. Au cours d'une période, toutes les valeurs de consigne concernant la hauteur de la lance, le débit d'oxygène, etc., avaient été programmées par le calculateur et contrôlées en vue d'observer ces consignes. Cette méthode a apporté, dans la marche, des améliorations décisives et des diminutions des coûts (figure 21):

- Augmentation de 0,4% du rendement métallique (5% environ de diminution des pertes en fer), provoquée entre autres par une diminution

Développements conséquents

Il était facile à concevoir d'utiliser les installations techniques et le système d'ordinateurs de l'aciérie d'Esch-Belval pour d'autres recherches. A la suite du premier programme, on a donc, pendant les années 1975-1978, effectué un programme communautaire CECA en vue d'utiliser différentes conceptions de l'automatisation des aciéries mises au point par l'Irsid, le CRM, Hoogovens et l'Arbed.

Les travaux menés par l'Irsid ont comporté la détermination de la teneur en carbone du bain à la fin de la deuxième phase de soufflage du procédé LDAC, ainsi que la détermination des quantités de fumées par des mesures à l'aide de l'argon. Il s'est révélé que le modèle dynamique Caldyn développé par l'Irsid pour la conduite des aciéries LD pouvait également être utilisé par le procédé LDAC. A la suite d'essais de simulation, il a pu aussi être mis en œuvre «on line» avec succès.

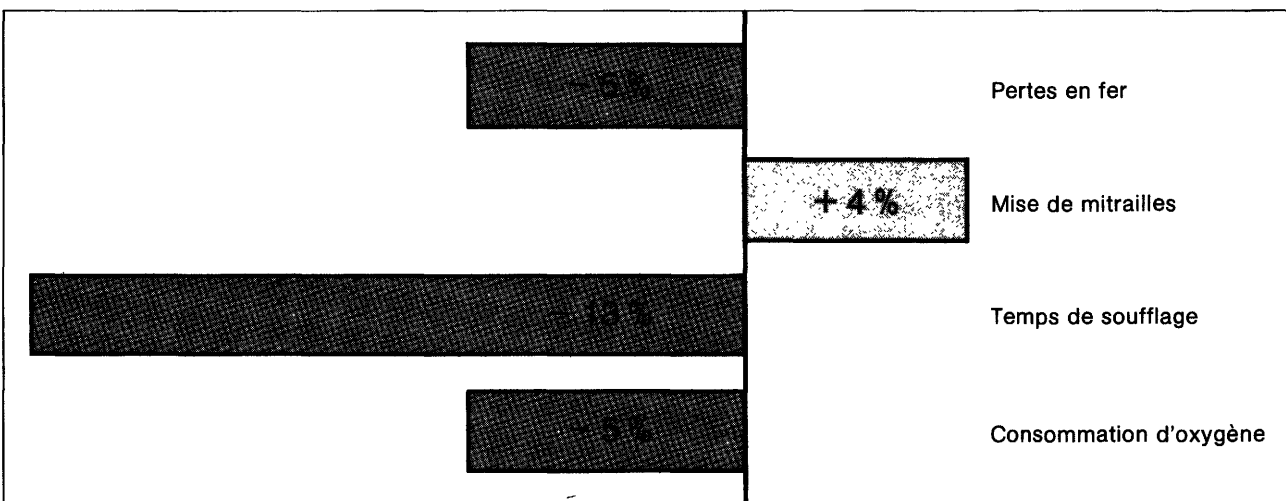


Figure 21: Amélioration due à une conduite du processus semi-automatique

de 1% de la teneur en fer de la scorie et par moins de débordements mousseux lors du soufflage.

- Augmentation de 4% de la mise au mille de ferrailles.
- Diminution de 13% du temps de soufflage.
- Diminution de 5% de la consommation spécifique d'oxygène.

Les travaux de recherches du CRM ont apporté de nouvelles connaissances sur les réactions secondaires importantes pour la détermination optimale des réactions principales pendant la première phase de soufflage. Dans le cadre des recherches exécutées par Hoogovens, il a été établi que la connaissance du facteur de postcombustion des gaz dans le convertisseur conduisait à une dispersion légèrement moindre des températures finales.

Après 1978, le développement ne s'est pas arrêté. Entre-temps, plusieurs aciéries se sont équipées avec le système d'ordinateurs. Le développement ultérieur mené personnellement par l'Arbed a conduit à un système de réglage à rétroaction avec lequel le processus du soufflage se déroule sans intervention du contremaître de soufflage. Les rapides progrès dans les techniques d'exploitation électronique des données ont, de leur côté, apporté de nouvelles possibilités et permis des installations plus économiques.

Automatisation des aciéries électriques

Alors que l'automatisation des aciéries à soufflage à l'oxygène s'est attaquée au problème le plus important, à savoir saisir le déroulement métallurgique du processus, pour les aciéries électriques, les points d'impact et aussi les possibilités de diminution des coûts par l'automatisation se trouvent dans

westfalen, a mis au point un tel système et l'a essayé en l'utilisant industriellement. Les résultats de cette recherche, évoqués brièvement ci-après, sont d'un grand intérêt économique.

Fonctions du calculateur du processus

Au centre de l'automatisation, se place la commande du four à arc, dont la structure est indiquée par la *figure 22*. Le calculateur suit le déroulement du chargement avec la fusion des paniers successifs, l'affinage final et les réparations, afin de réaliser un cadre pour toutes les autres fonctions. Les variations des signaux importants du processus et les informations du calculateur sont répercutées dans le poste de commande sur un moniteur TV, par lequel également différents dialogues peuvent s'établir entre le fondeur et le calculateur. De cette façon, se rédige un compte rendu chronologique détaillé qui permet d'avoir une vision approfondie sur le processus. En outre, les caractéristiques de l'état de la charge les plus importantes, soit mesurées, soit calculées, sont indiquées en permanence

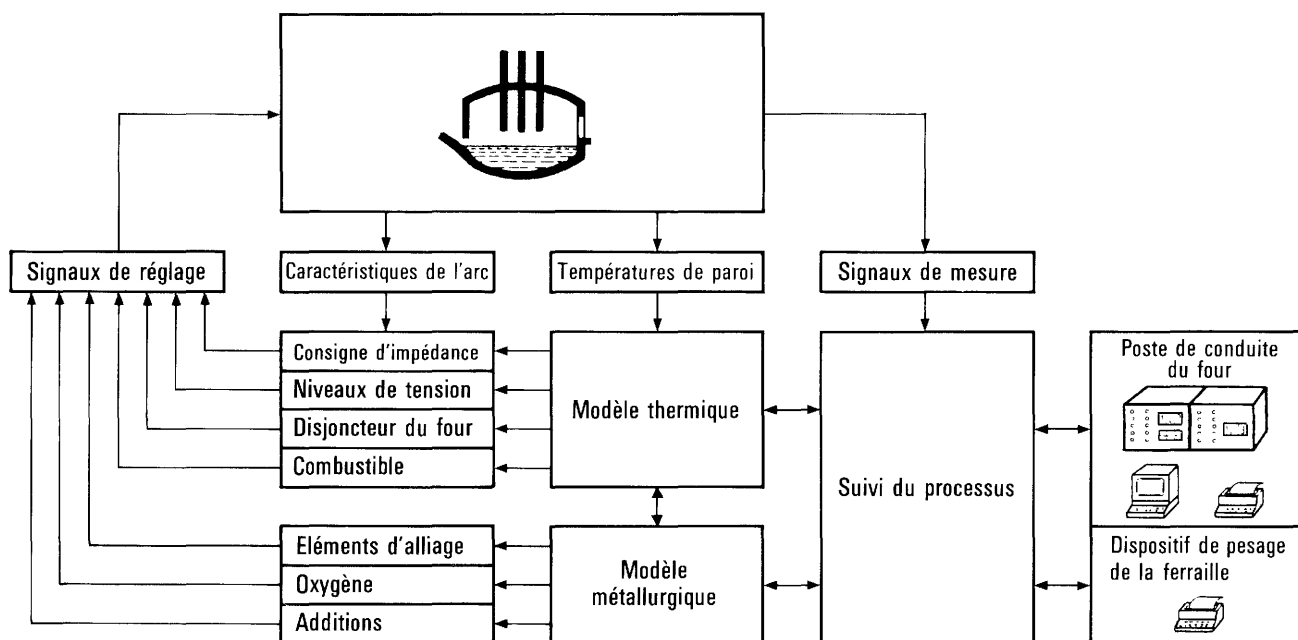


Figure 22: Structure de la commande du four à arc

la diminution des temps de coulée à coulée, dans l'économie de l'énergie électrique et dans un abaissement de la consommation d'électrodes et de produits réfractaires.

La tâche de développer un système d'automatisation approprié aux aciéries électriques a été supportée par l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh qui, avec une aide financière de la CECA et en étroite collaboration avec la SA Krupp-Sud-

sur un pupitre de commande qui comporte en plus différents boutons-poussoirs fonctionnels pour engager les dialogues et pour enclencher ou déclencher les fonctions de commande.

Calcul des enfournements

Le calcul des enfournements consiste à composer une coulée de poids défini d'avance et de compo-

tion chimique fixée au préalable, à partir des possibilités dans les différentes qualités de ferrailles et de matériaux d'alliage, afin que les coûts des matières enfournées soient les plus faibles possible.

Avec les données d'un premier enfournement, lesquelles sont enregistrées lors du remplissage du panier sur la bascule à ferrailles, commence le calcul de la composition chimique instantanée et des quantités nécessaires d'oxygène de soufflage et de matières d'addition. A chaque nouvelle composition qui est communiquée par le calculateur du laboratoire, on détermine les additions de ferro-alliages qui conduisent à la composition chimique à obtenir avec les coûts minima. Les additions de ferro-alliages sont réparties pour être ajoutées soit dans le four, soit dans la poche de coulée. La température de coulée est alors déterminée pour que l'acier liquide sortant du trou de coulée soit refroidi juste à la température prescrite, par l'ajout des additions dans la poche. Les natures et les poids des ferro-alliages et des matériaux d'addition sont délivrés par une installation automatique de chargement.

État thermique du four

Cet état thermique est calculé à partir des matières enfournées, de l'apport d'énergie et des pertes en énergie. Le bilan énergétique tient compte, en dehors de l'énergie électrique fournie, également de l'apport d'énergie du brûleur et de l'oxygène soufflé, ainsi que des pertes par les fumées et l'eau de refroidissement. La puissance absorbée par le four est conduite en fonction de son état thermique, en ce sens que les paliers des tensions et les consignes d'impédance, ainsi que les débits de combustible sont déterminés lors de la fusion des paniers individuels, selon des diagrammes de marche et que le disjoncteur du four est déclenché lorsqu'est atteint l'état désiré de la coulée. Le contrôle de la température des parois intervient par des corrections, dans la conduite de la puissance demandée et diminue celle-ci pendant la phase d'affinage. Pour un réglage des grandeurs électriques de l'arc, on peut utiliser les consignes d'impédance comme grandeurs à obtenir. Après la période de fusion, la température du bain est calculée en continu, corrigée par des mesures plausibles de température et amenée à la température de coulée.

Utilisation industrielle

Avec la commande du four à arc, se trouve pratiquée, suivant une reproduction constante, une méthode de travail déterminée à l'avance. De cette manière, les temps de coulée à coulée sont dimi-

nués, et la consommation d'énergie électrique, de ferro-alliages, d'électrodes et de produits réfractaires est amoindrie de telle manière que les coûts d'élaboration de l'acier au four électrique baissent de manière sensible. Par ailleurs, cette commande fournit aux personnels du four et de direction une meilleure information et rend leur travail plus aisé. Ces avantages ont incité à introduire cette commande dans plusieurs fours électriques à arc.

A la commande des fours à arc individuels, vient se superposer une commande de la consommation d'énergie de l'ensemble de l'usine. Cette méthode qui utilise le contrôle des périodes de forte charge électrique permet de garantir que, d'un côté, la consommation d'énergie maximalisée a priori ne sera pas dépassée et que, d'un autre côté, les possibilités de consommation seront le plus possible utilisées au maximum.

Dans une aciérie électrique comportant quatre fours à arc, dans laquelle cette commande de la consommation globale d'énergie a été introduite, on a pu de cette manière, augmenter d'environ 10% l'énergie disponible pour la fusion dans les fours pendant les périodes de forte charge électrique. Ceci a amené une diminution des coûts spécifiques d'énergie, étant donné que la part des dépenses relatives à la puissance installée reste constante, quand l'utilisation de l'énergie programmée se trouve améliorée.

Propriétés des arcs électriques

Dans les 20 dernières années, la proportion de la production d'acier électrique dans les pays de la CECA a augmenté lentement, mais constamment. A côté de l'appui apporté aux différents développements proches de la pratique, comme la commande du processus à l'aide d'ordinateurs, il est apparu judicieux d'encourager aussi des travaux de recherche fondamentale sur les propriétés et le mode d'action des arcs électriques.

Par rapport à la méthode d'exploitation classique des fours à arc, beaucoup de choses ont, en réalité, changé pendant ces dernières années: des puissances électriques sensiblement plus élevées et par conséquent une productivité très fortement accrue, des facteurs d'exploitation comme la technique du refroidissement à l'eau des parois du four, introduite par les Japonais, l'utilisation de brûleurs oxygène/fuel pendant la phase de fusion; ces nouvelles techniques ont apporté de nouvelles possibilités de réglage et d'optimisation.

Une recherche fondamentale sur l'usure des électrodes et le degré d'utilisation de la chaleur a été exécutée par la BSC.

Transmission de la chaleur

Dans un four de 20 t, on a observé les manifestations lumineuses physiques et les mouvements des arcs électriques à l'aide d'une caméra à grande vitesse. Les arcs prennent racine de préférence sur les bords des électrodes, sous un angle d'environ 45°.

On est parvenu, à l'aide de méthodes spéciales de mesures du rayonnement et de la convection, à dresser le bilan énergétique de la transmission calorifique. Celui-ci est représenté schématiquement par la *figure 23*. Dans l'exemple cité, 72 % de la puissance développée par l'arc électrique sont transmis directement ou indirectement au bain. Des bilans d'énergie semblables ont pu être établis pour une série de combinaisons intensité-tension du courant. Les rendements établis ainsi se situaient entre 60 et 76 %; il en est résulté une longueur optimale de l'arc de 126 mm pour obtenir le rendement le plus élevé.

Consommation d'électrodes

Les plus importants paramètres de l'usure des électrodes sont l'érosion par l'arc électrique, l'oxydation

de la surface des électrodes par l'atmosphère du four et la formation de fissures dans la tête des électrodes. L'observation précise de l'évolution de l'état des têtes d'électrodes dans des fours en service industriel à l'aide de caméras automatiques, ainsi que des recherches sur un four d'essai ont apporté des résultats intéressants. La vitesse d'érosion est proportionnelle au carré des intensités du courant. Les différences relativement importantes dans l'usure entre diverses coulées ont pu être bien expliquées par les volumes de l'oxygène introduit.

L'établissement d'un modèle mathématique de simulation des sollicitations thermiques qui se développent dans les électrodes, conjugué avec des mesures du comportement à la chaleur du graphite pour des températures allant jusqu'à 2 000 °C, ont permis d'établir les bases pour un modèle d'ensemble sur la formation des fissures. Les exigences, nécessaires à formuler à l'encontre des propriétés des matériaux entrant dans la fabrication des électrodes, peuvent être maintenant mieux émises en quantités.

Utilisation pratique des résultats

Le choix scrupuleux de la tension de l'arc électrique pour chaque phase, en particulier pour la phase de

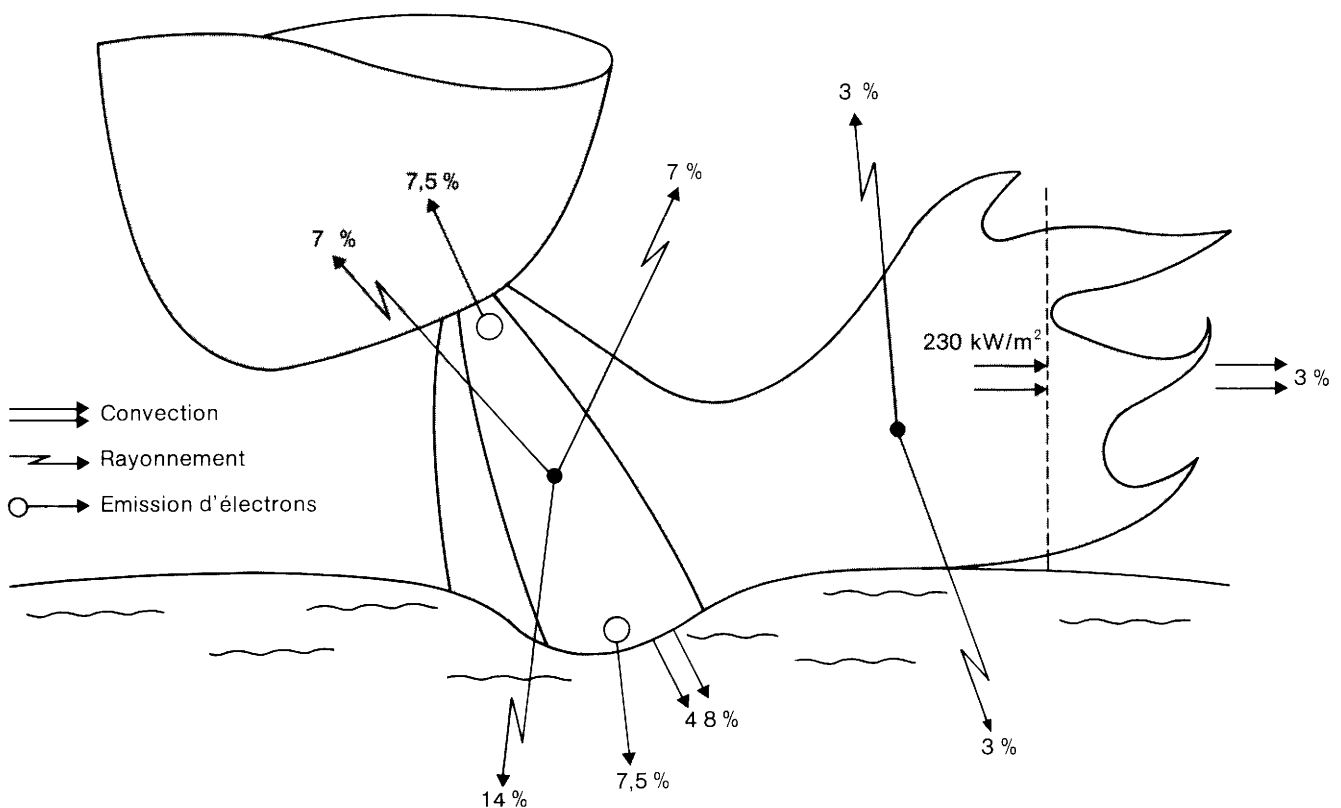


Figure 23: Bilan énergétique d'un arc (70kA, 143V)

fusion, conduit à une meilleure utilisation de l'énergie. L'action conjuguée de plusieurs facteurs, comme le refroidissement par eau des parois et aussi le contrôle par ordinateur du processus, permet de maîtriser les phénomènes de fusion dans la pratique industrielle, avec une haute tension et une basse intensité du courant. On a pu atteindre des diminutions de plus de 30% de la consommation d'électrodes.

Les bris d'électrodes ont pu être diminués en appropriant les qualités des électrodes au mode de conduite de chaque four particulier. Des exigences adéquates sur les qualités ont amélioré les propriétés et la régularité des fournitures d'électrodes.

Procédé de refusion sous laitier électroconducteur

Pour la fabrication de produits d'acier de hautes qualités, en particulier pour les pièces de forge, il s'est avéré judicieux d'utiliser la voie de la refusion. Dans ce cadre, le procédé de refusion sous laitier électroconducteur⁽¹⁾ a conquis, depuis plusieurs années, une solide position. La *figure 24* donne le schéma de principe d'une installation de ce procédé de refusion. Au moyen de réactions d'échanges entre le métal et le laitier, on obtient un affinage très poussé du métal, et la commande du déroule-

ment de la solidification diminue les ségrégations macro- et microscopiques dans le lingot.

En considération de l'importance grandissante de ce procédé, également ces dernières années dans le domaine des très grosses pièces de forge, la CECA a encouragé quelques recherches fondamentales sur le comportement de nouvelles compositions de laitier et sur l'extension des connaissances sur les mécanismes de la propagation de la fusion.

Nouvelles sortes de laitier

A ce programme ont participé la British Steel Corporation (BSC) et le Max-Planck-Institut (MPI) pour la recherche sidérurgique à Düsseldorf. L'objectif des recherches était d'essayer des laitiers exempts de fluor. A l'heure actuelle, on utilise couramment des laitiers contenant du fluor, en raison de leur bonne conductivité électrique et de leurs propriétés métallurgiques. Des améliorations sur la conception électrique des installations permettent cependant de bénéficier d'une plus grande flexibilité dans le choix de la composition des laitiers et conduisent à suivre de nouvelles voies pour éviter, même avec l'emploi de laitiers fluorés, des émissions de nuisances dans l'environnement.

Les recherches menées par le MPI ont montré qu'il existe des laitiers absolument exempts de spath-fluor qui possèdent un bon comportement en service et donnent de bons résultats métallurgiques avec une surface de bonne qualité des lingots refondus. Un avantage supplémentaire réside dans la consommation d'énergie, dans certains cas, fortement moindre. Quelques-uns de ces résultats sont représentés dans la *figure 25*. En particulier, des laitiers riches en silicates permettent d'obtenir les plus faibles teneurs en aluminium, ce qui est très important pour certaines nuances d'acier. Par contre, ces laitiers à haute teneur en silicates présentent l'inconvénient d'aboutir à une teneur en oxygène inéluctablement plus élevée et autorisent à peine une désulfuration.

Dans les laboratoires de la BSC, on a testé des laitiers en règle générale exempts de fluor et à base de chaux et d'alumine. Leur utilisation dans les installations de refusion électroslag paraît possible. La consommation d'énergie diminue; cependant les conditions de marche des installations présentent moins de possibilités d'adaptation. Par des additions de magnésie, on peut améliorer les propriétés désulfurantes de tels laitiers.

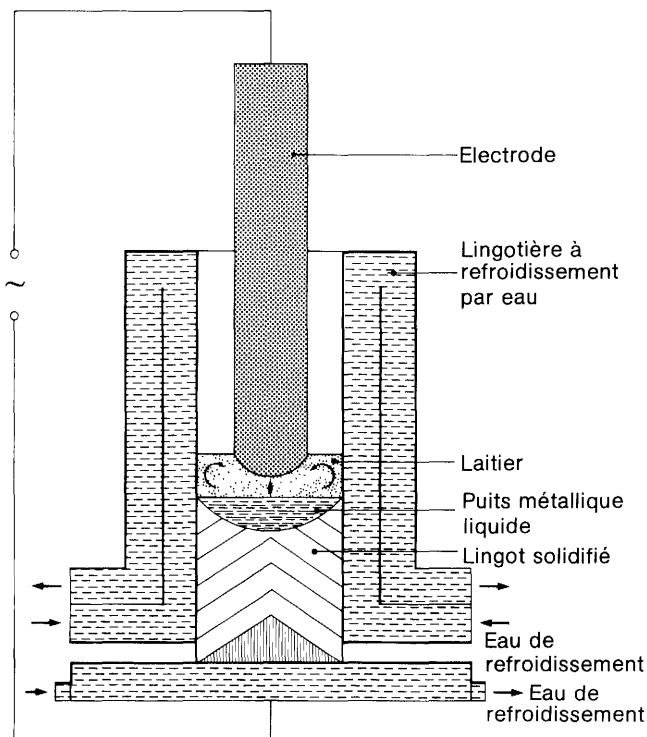


Figure 24: Schéma de principe d'une installation de refusion sous laitier électroconducteur

(¹) En bref: refusion électroslag.

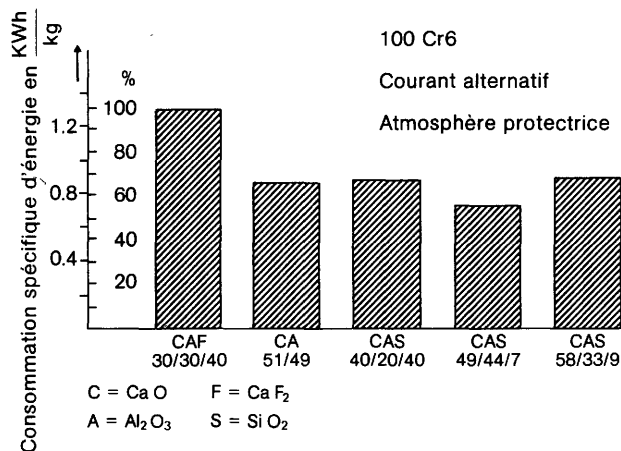


Figure 25: Consommation d'énergie de laitiers de composition différente

Mécanismes de la propagation de la fusion

Cette partie des recherches a été exécutée par la MPI. Les investigations avaient pour objectif d'établir des modèles mathématiques avec lesquels on pouvait introduire dans un ordinateur les principaux paramètres du procédé de la refusion électroslag.

Un premier modèle partiel décrit les mécanismes de transfert de chaleur et de propagation de la fusion de l'électrode. En même temps, à l'aide du calcul de la distribution des températures, on détermine le profil du front de fusion de l'électrode, ainsi que sa profondeur d'immersion dans le laitier. Comme le montre la figure 26, ces mesures ont démontré les excellentes possibilités d'appliquer ce modèle.

Le deuxième modèle partiel comprend les champs électromagnétiques et les distributions qui s'en déduisent des courants de circulation et des températures. Le courant électrique, qui est conduit au moyen du laitier, produit tout d'abord la chaleur nécessaire au processus et aussi, d'un autre côté, les forces qui provoquent dans le laitier un fort courant tourbillonnaire. Il s'est avéré que, pour une forte surchauffe, peut se créer, par l'action des forces thermiques, un deuxième tourbillon à peu près de la même puissance. On a établi des modèles qui permettent le calcul de ces phénomènes.

On a donc, en tout, mis au point deux éléments fondamentaux en vue d'établir un modèle global du procédé de refusion électroslag; ces éléments permettent d'obtenir de nouvelles connaissances sur l'interdépendance compliquée des paramètres physiques du procédé, laquelle est cependant de la

plus haute importance à connaître, pour arriver à un mode optimal de marche. Pour ce faire, on a établi des diagrammes applicables en règle générale et des formules d'approximation. Ces résultats trouvent, entre autres, leur application pour la commande du processus dans les installations de refusion sous laitier électroconducteur.

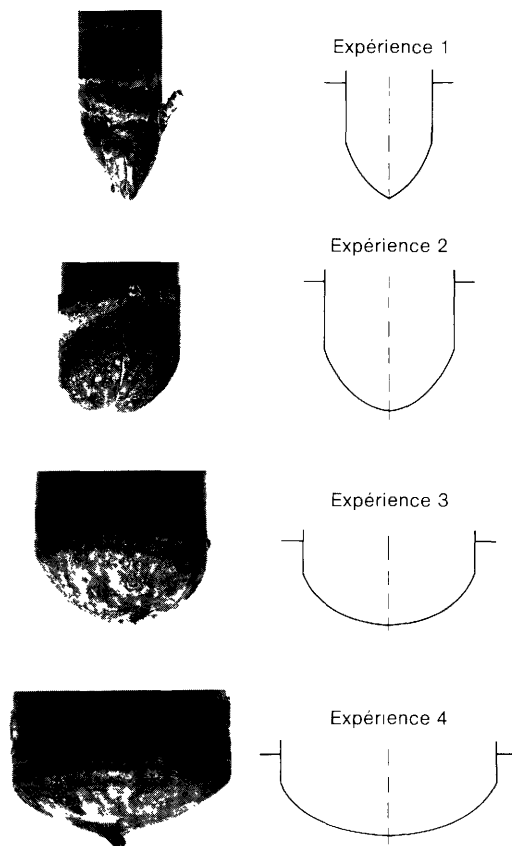


Figure 26: Profils d'usure mesurés et calculés

Coulée et solidification

Les phénomènes qui se déroulent pendant la coulée et la solidification présentent une grande importance pour la rentabilité de l'élaboration du métal et pour les propriétés d'emploi des aciers.

A l'initiative et avec l'aide financière de la CECA, des usines et des instituts de recherche européens ont entamé, en 1969, des travaux communautaires traitant de ce domaine. A l'intérieur de la Communauté européenne, il est apparu souhaitable et judicieux de coordonner les recherches en cours ou prévues à ce sujet, afin de combler le plus complètement possible les lacunes de nos connaissances et d'attribuer à l'optimum les moyens mis en œuvre, en évitant les doubles emplois.

Après achèvement d'un premier programme qui concernait, avant tout, les bases de la solidification, les travaux de recherches furent poursuivis à partir de 1973 avec un deuxième programme, orienté davantage vers les applications pratiques. En 1978,

on a décidé de continuer ces travaux avec un troisième programme, lequel est presque entièrement consacré aux problèmes de la coulée continue.

Précisément, dans une période au cours de laquelle, en raison des difficultés rencontrées par la sidérurgie européenne, de nombreux projets ont dû, à la suite des changements de priorité, être ajournés au profit de la solution de problèmes d'exploitation qui se sont présentés à court terme, il est apparu évident que les recherches sur la solidification n'avaient en rien perdu de leur actualité. Ces recherches créent les conditions préalables sur le plan métallurgique et la technique du processus, en vue d'élaborer des produits aux qualités régulières et de valeur élevée qui puissent se maintenir dans la concurrence internationale.

Bases théoriques

De nombreux projets de recherche du premier programme étaient consacrés, en grande partie, à la thermodynamique et à la cinétique des changements de phase, ainsi qu'aux transferts de chaleur et de matières.

Les équilibres de la désoxydation dans le fer liquide ont été interprétés à nouveau et de manière approfondie, des points de désaccord ont été éliminés et des lacunes comblées.

Dans des coulées réalisées en laboratoire, on a étudié le déroulement de la désoxydation par précipitation. Des cellules électrochimiques pour déterminer la concentration en oxygène se sont, pour ces travaux, révélées utiles et même indispensables. C'est pourquoi, dans un deuxième programme de recherches, ces méthodes de mesures ont été étudiées encore plus à fond en ce qui concerne leur précision, leur fiabilité, leur reproductibilité et également pour le domaine des mesures des plus faibles activités de l'oxygène. Ces méthodes de mesure ont, depuis lors, trouvé leur application industrielle pour déterminer l'activité de l'oxygène dans le convertisseur et en poche.

En outre, par ce deuxième programme, on a acquis de nouvelles connaissances sur les conditions de la naissance et de la morphologie des inclusions d'oxydes. Le déroulement de leur croissance et la suite de leurs phases sont représentés schématiquement dans la *figure 27*. Dans un modèle théorique, on a calculé l'agglutination des particules liquides et solides d'oxydes dans les bains d'acier, en prenant en compte les mécanismes de précipitation et de mélange des phases.

En s'appuyant sur des modèles de solidification, les travaux de recherche ont abouti au calcul théorique

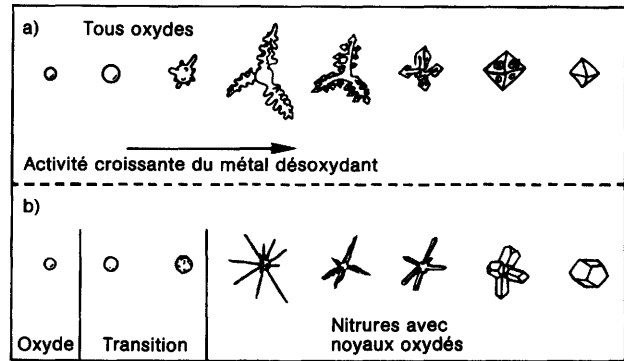


Figure 27: Représentation schématique des formes de croissance et de la succession des phases des inclusions oxydées

- a) pour des teneurs initiales en oxygène élevées
- b) pour des teneurs initiales en oxygène basses

de la microségrégation et à l'établissement d'un modèle de sédimentation pour le calcul de la ségrégation macroscopique lors de la coulée en lingots. Tous ces travaux théoriques ont un caractère d'orientation. Ils apportent aussi une contribution à la solution des problèmes individuels qui sont également traités par les différents programmes, comme les problèmes relatifs à la cristallisation et l'affinement du grain, la germination et la croissance des dendrites.

Coulée en lingots

Les points thématiques importants ont été, dans le cas présent, des recherches proches de la pratique sur «la conductivité thermique et la solidification» ainsi que sur «les structures et les ségrégations». Malgré le développement rapide de la coulée continue, ces travaux ont conservé toute leur valeur. Pour de nombreux produits, particulièrement les gros lingots, la coulée en lingots ne peut pas être remplacée par la coulée continue; par ailleurs de nombreux résultats de recherches sur les lingots sont, au moins partiellement, transposables à la coulée continue.

Les travaux de recherches ont apporté des bases plus précises sur l'élimination de la surchauffe au début de la solidification, sur les quantités de chaleur évacuées par les parois de la lingotière, la plaque de fond et le masselottage et sur les transferts de chaleur après la formation de l'intervalle de retrait. Dans le deuxième programme, on en a déduit les modèles théoriques conséquents sur la solidification de la couche marginale et la formation de l'intervalle de retrait. Comme nouveaux sujets de recherche intéressants, au même titre, la coulée en lingots et la coulée continue, on a retenu les mécanismes de la formation des criques superficielles et la sensibilité à la fissuration des aciers aux hautes températures.

Les travaux sur la solidification des aciers effervescents ont apporté un aperçu remarquable sur la formation des soufflures de gaz, ainsi que sur la localisation et la configuration des soufflures de peau pour différents teneurs en carbone. La solidification des aciers calmes a été étudiée en ce qui concerne les structures, les ségrégations et le degré de propreté aussi bien sur des gros lingots de forge que sur des lingots de dimensions normales. A la fin du deuxième programme, on est parvenu à réaliser un progrès considérable pour approcher un « modèle de solidification » capable d'englober tous les aspects partiels de cette solidification. Des modèles partiels judicieux apportent des solutions satisfaisantes aux problèmes posés dans la pratique.

Coulée continue

Les recherches communautaires sur les données de base pour la technique du procédé et sur les fondements métallurgiques de la coulée continue sont, en premier lieu, réservées à un troisième programme qui n'est pas encore entièrement terminé. Par les deux programmes actuellement achevés, on a pu apporter des éclaircissements importants pour la solution des problèmes particuliers de la coulée continue des billettes. C'est ainsi qu'on a pu étudier à fond le transfert thermique dans la lingotière et dans la zone de refroidissement secondaire. Les

températures de la surface du brin de coulée ont été mesurées en continu, et les coefficients caractéristiques du transfert de chaleur ont été déterminés pour les différentes zones de refroidissement. La connaissance de ces données a permis d'établir et d'utiliser industriellement des modèles mathématiques pour calculer d'avance et pour optimiser la capacité de coulée des installations de coulée continue. La *figure 28* montre une telle exploitation.

Dans un projet thématique mené à bonne fin, on a étudié, en commençant par les principes fondamentaux, le mode d'action des poudres de coulée utilisées dans la coulée continue. Les exigences formulées à l'encontre des poudres de coulée ont été précisées, aux fins d'éviter la réoxydation de la phase métallique liquide, d'absorber les inclusions non métalliques, de calorifuger la surface du bain et de lubrifier l'intervalle entre lingotière et brin de coulée. On a également proposé les propriétés caractéristiques à soumettre à des essais, comme le comportement à la fusion, la viscosité, la conductibilité thermique, la tension superficielle entre métal et laitier et l'activité de l'alumine.

Dans le premier programme, on a enfin commencé à développer et à utiliser industriellement le brassage électromagnétique dans la coulée continue. Par brassage au moyen d'un champ magnétique tournant dans la zone de refroidissement secondaire d'une installation de coulée continue pour bil-

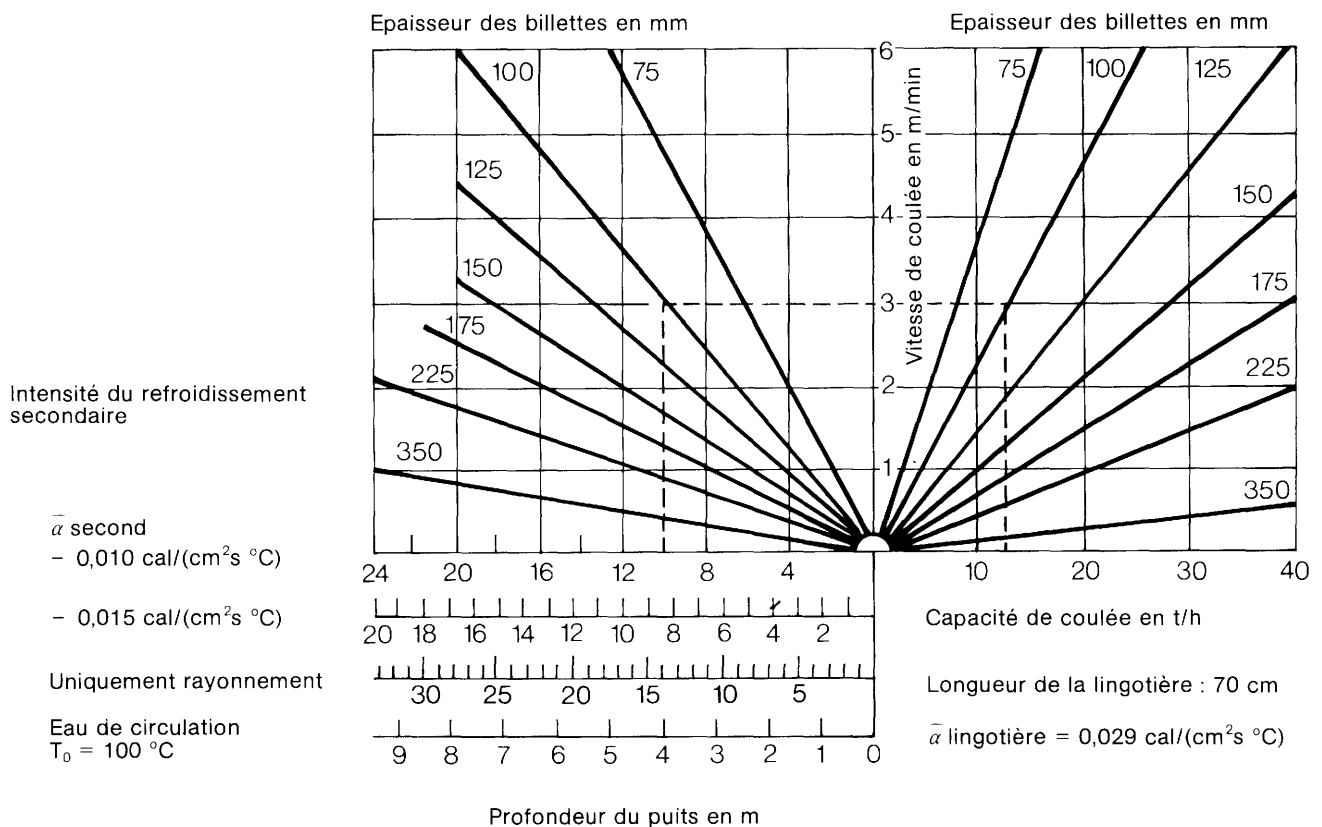


Figure 28 : Influence de l'intensité du refroidissement secondaire et des dimensions des billettes sur la capacité et la vitesse de coulée de machines de coulée continue de billettes pour une profondeur de puits donnée

lettes, on a influencé favorablement les structures de solidification et les ségrégations dans l'axe du brin de coulée. L'engagement, couronné de succès, dans cette voie a incité, dans le deuxième programme, à construire et à essayer, dans des installations de coulée continue pour brames, des rouleaux d'appui à brasseur incorporé. Différents champs électromagnétiques pour créer des courants de circulation dans le puits liquide du brin de coulée, ont été essayés pour leur efficacité métallurgique. Pour la première fois, on a mis en œuvre, sur une installation pour billettes, une lingotière à champ glissant provoquant un brassage vertical, dans le but d'améliorer les qualités de surface du brin de coulée. La *figure 29* montre schématiquement le mode d'action de cette lingotière. Dans la pratique industrielle de la coulée continue, les procédés de brassage gagnent continuellement en importance.

dans la Communauté, l'utilisation de la coulée continue, qui ne représente actuellement que 30% de la production d'acier brut, n'arrivera en 1983 qu'à 45%; au Japon, à l'heure actuelle, déjà 52% de l'acier brut est coulé d'après ce procédé. C'est pourquoi, 17% environ de la totalité des coûts d'investissements placent, en ce moment, les dépenses pour la construction de nouvelles installations de coulée continue en tête du programme d'investissements de la sidérurgie européenne.

La recherche acier CECA participe activement, dans ce domaine, aux améliorations métallurgiques et technologiques du procédé de coulée continue. Il convient de citer brièvement deux exemples: la commande métallurgique du processus et un procédé pour augmenter la productivité des installations en ajoutant des poudres métalliques dans la lingotière.

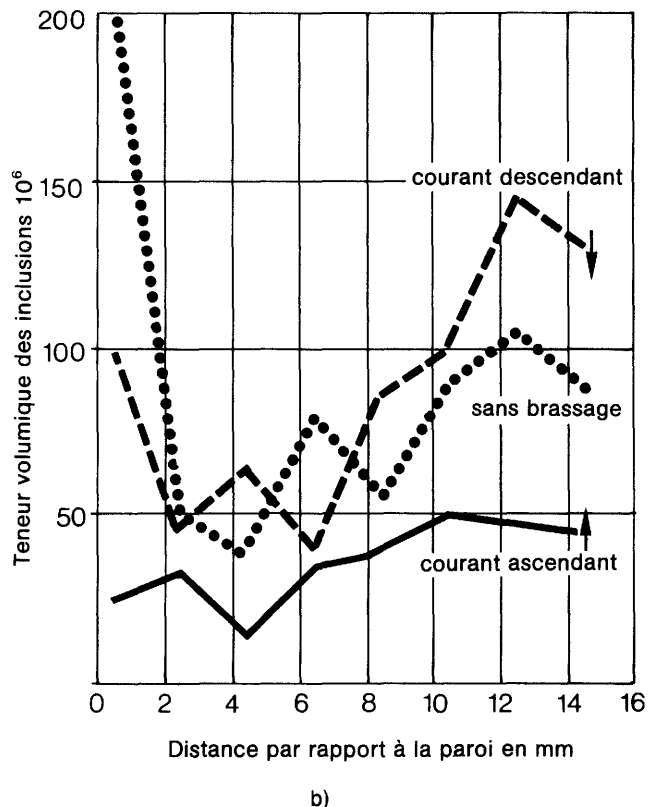
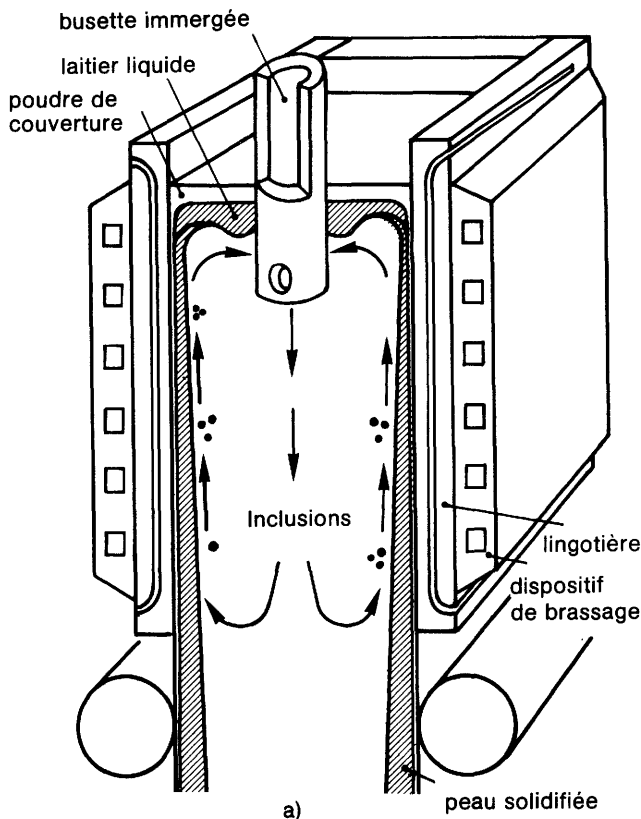


Figure 29: a) Schéma du brassage à champ magnétique glissant dans une lingotière

b) Influence de la direction d'écoulement pendant le brassage électromagnétique dans la lingotière sur la teneur en inclusions lors de la coulée continue de billettes avec busette immergée

Contrôle métallurgique du processus et améliorations apportées à la coulée continue

La transition vers le procédé de coulée continue qui économise les coûts et l'énergie a débuté en Europe plus tardivement qu'au Japon. Alors que

Commande automatique du refroidissement du brin de coulée

Dans le cadre d'un programme de recherches encouragé par la CECA, le CRM de Liège a développé un système de refroidissement qui commande le refroidissement du brin de coulée après sa sortie de la lingotière. L'objectif final est l'obten-

tion exacte d'une évolution programmée de la température superficielle (profil de refroidissement) sur toute la longueur de la ligne de pulvérisation équipée de pulvérisateurs d'eau. La *figure 30* donne trois exemples de profils de refroidissement à atteindre, le choix d'un profil particulier dépendant de la nuance de l'acier coulé.

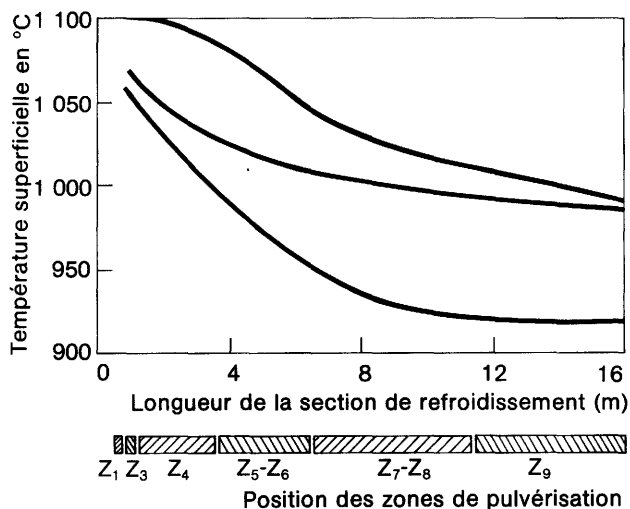


Figure 30: Exemples de profils de refroidissement préétablis

L'ensemble de la ligne de refroidissement est divisé en 9 zones de pulvérisation; le débit d'eau afférent à chacune des zones est commandé en fonction du temps de séjour de la brame dans la zone en cause. La *figure 31* explique cette méthode. On voit comment les variations de la vitesse d'extraction du brin de coulée agissent sur la commande des débits d'eau concernant chaque zone. Plus une zone est éloignée de la lingotière, plus l'intervention de commande est décalée dans le temps et plus elle dure longtemps. Le programme du calculateur a été établi sur la base de nombreux calculs de technique thermique et sur les résultats de recherches en laboratoire pour comprendre les transferts de chaleur qui se présentent dans les phénomènes de refroidissement.

Comme il s'agit d'un modèle de commande à boucle ouverte, donc sans rétroaction, on doit lui adjoindre un contrôle efficace et régulier des pulvérisateurs de la ligne de refroidissement. La mise en œuvre industrielle de ce système de commande dans une installation pour brames de l'aciérie de la société métallurgique Hainaut-Sambre a montré que cette conception était d'emblée applicable. Cette mise à l'épreuve a apporté des résultats remarquables. Le calculateur commande automatiquement les vannes de réglage du débit de l'eau de refroidissement. Même au démarrage d'une séquence de coulée ou pendant les changements de répartiteur ou encore pendant certaines perturbations, aucune intervention humaine n'est indis-

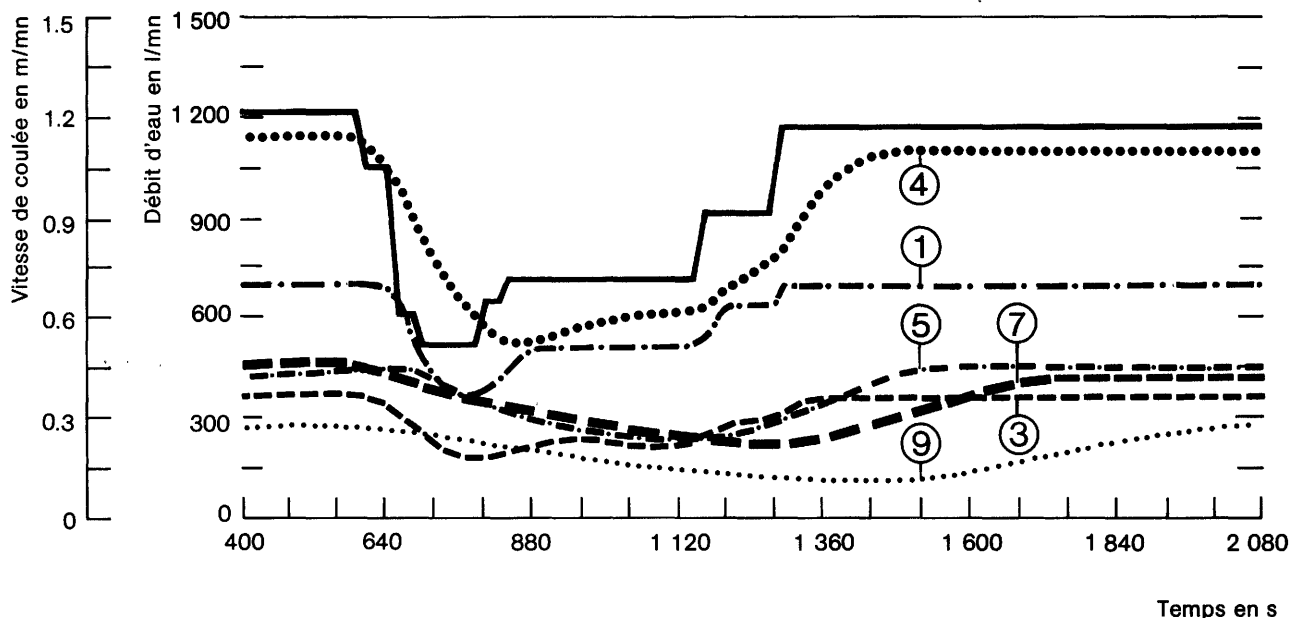


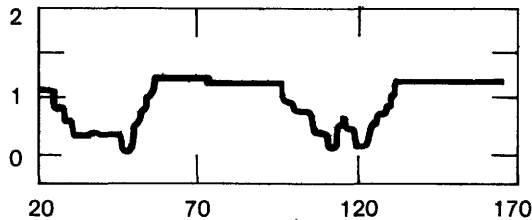
Figure 31: Influence de la vitesse de coulée sur la commande du refroidissement des zones de pulvérisation

pensable. La température de la surface des brames peut être maintenue dans d'étroites limites. La *figure 32* montre la comparaison avec un système de commande usuel, lequel règle le débit de l'eau proportionnellement à la vitesse d'extraction. Les fluctuations de la température de la surface sont considérablement moindres avec le nouveau système. Ceci a naturellement une influence favorable sur les qualités de surface des produits.

CECA, exécutée par le CSM de Rome, a permis le développement d'une nouvelle technologie de refroidissement, laquelle consiste à introduire dans la lingotière du métal sous forme pulvérulente.

Normalement, dans les installations de coulée continue, la coulée se fait avec une certaine surchauffe, c'est-à-dire à une température qui se trouve légèrement au-dessus de la température de

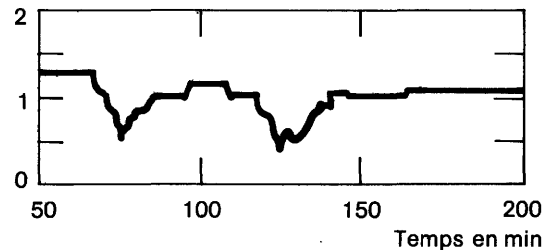
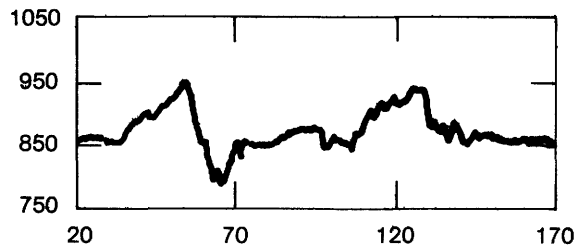
Vitesse de coulée en m/min



Commande proportionnelle standard



Température superficielle °C



Nouveau système de commande

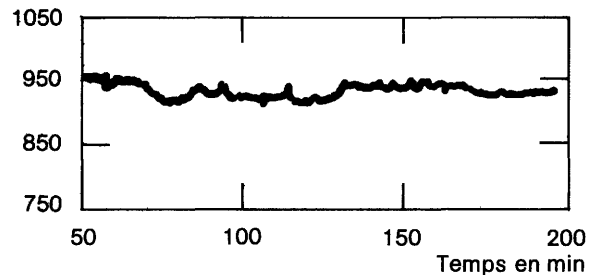


Figure 32: Températures superficielles du brin pour deux systèmes différents de commande du refroidissement

L'utilisation industrielle de ce nouveau système de commande fait de rapides progrès. Pendant ces dernières années, deux installations ont été mises en service, d'autres sont en préparation.

Addition de poudres métalliques dans la lingotière de coulée continue

La productivité des installations de coulée continue est déterminée en premier lieu par la vitesse d'extraction. Si on veut augmenter cette productivité, il faut accélérer la solidification du brin. Le processus de cette solidification détermine l'épaisseur de la peau solidifiée du brin à la sortie de la lingotière et la longueur du puits liquide à l'intérieur de ce brin. Avec pour objectif d'accélérer la progression de la solidification, dans le brin, une recherche

solidification de l'acier. En ajoutant de la poudre métallique dans le bain, on arrive à une rapide élimination de la surchauffe (*figure 33*). Après des essais pour déterminer la granulométrie la plus avantageuse de la poudre métallique et trouver l'influence de la composition chimique, ainsi que celle de la teneur en inclusions, on a construit un dispositif pour ajouter la poudre métallique dans le jet de coulée, lorsque l'on coule sans busette immergée. Ce dispositif est représenté schématiquement dans la *figure 34*. La poudre, logée dans une trémie d'alimentation, est amenée au moyen d'un distributeur à vis, à une tuyère de mélange et de là au moyen d'un gaz porteur inerte, elle est insufflée à l'aide d'une lance dans le jet de coulée. Le dispositif a été mis en œuvre dans une installation industrielle de coulée continue de Terni où sont coulées des billettes carrées de 140 mm de côté, avec une

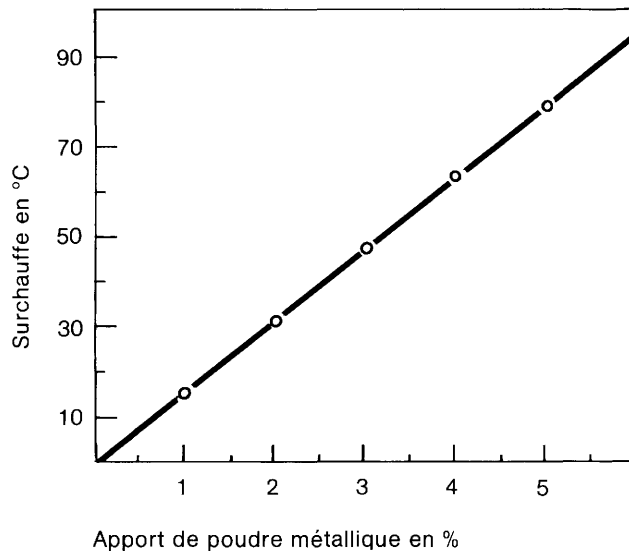


Figure 33: Influence de l'apport de poudre métallique sur la diminution de la surchauffe

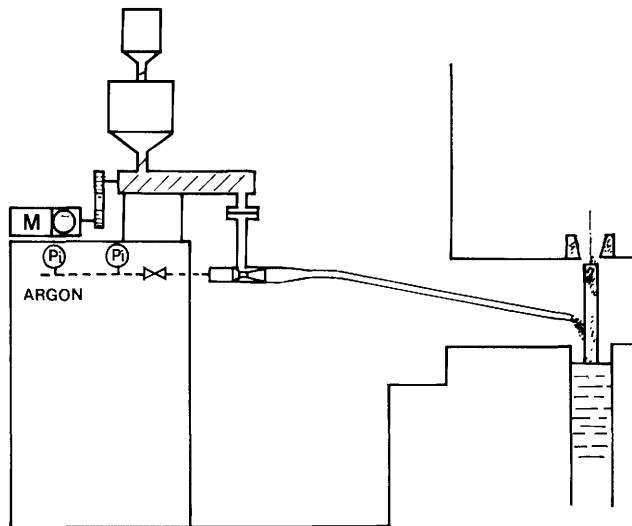


Figure 34: Schéma du système d'injection

vitesse d'extraction de 2 m par minute; le rayon de courbure est de 5 m. Les résultats des essais ont permis d'arriver à des conclusions intéressantes:

- une addition d'environ 1,5% de poudre métallique semble être la plus favorable; la médiane granulométrique se situe aux environs de 0,4 mm;
- la vitesse d'extraction peut être augmentée de 40 à 50 %;
- la structure de solidification des billettes est influencée favorablement: les ségrégations macroscopiques et la porosité axiale sont diminuées; la zone centrale équiaxe solidifiée est aggrandie;
- l'amélioration de l'homogénéité aboutit à de meilleures propriétés mécaniques du produit.

Des problèmes existent encore du fait de l'accroissement des inclusions oxydées dans le produit;

elles proviennent de l'oxygène introduit avec la poudre métallique. Des essais complémentaires sont actuellement en cours sur l'utilisation de ce nouveau procédé pour la coulée avec busette immergée.

Produits réfractaires en aciérie

Tant au point de vue économique que sur le plan technique, la poursuite du développement des produits réfractaires présente une grande importance pour l'industrie sidérurgique. En particulier, dans le domaine de l'aciérie, les matériaux réfractaires constituent non seulement un facteur considérable des coûts, mais en outre, les améliorations apportées dans les techniques des procédés exigent des solutions nouvelles aux problèmes posés par les réfractaires. C'est ainsi que les exigences croissantes des utilisateurs d'acier à disposer d'aciers particulièrement pauvres en inclusions ont amené, pendant les 10 dernières années, à développer des aciers à très basse teneur en soufre pour la fabrication des tubes, des aciers à faibles teneurs en oxydes et sulfures pour la construction des centrales nucléaires et des aciers à haute résistance avec des propriétés particulières.

Les nouveaux procédés d'élaboration, liés en partie à ces développements posent également de nouvelles exigences pour les propriétés et la tenue des produits réfractaires. Les centres de gravité dans cet ordre d'idées sont constitués par la transition à la technique de la coulée continue, au dégazage sous vide et à la métallurgie en poche. Une recherche exécutée par le CRM a concerné deux problèmes importants: l'usure des matériaux réfractaires dans les installations de dégazage sous vide et la tenue des busettes immergées dans la coulée continue.

Installations de dégazage

La durée de vie des poches de dégazage, telles qu'elles sont utilisées dans les installations DH ou RH, dépend fortement des matériaux réfractaires employés. Les revêtements mis en œuvre à l'origine, à base de briques de magnésite ou d'alumine, ont présenté une durée de service insuffisante. Ce n'est qu'avec la transition vers les briques de chrome-magnésite que l'on a obtenu de meilleures tenues, et il s'est maintenant créé un intérêt croissant pour prolonger encore plus avant ces tenues par des réparations des érosions locales qui naissent particulièrement aux trompes d'aspiration.

Au cours de la recherche, on a développé un procédé d'inspection et de projection à flammes (gun-tage à chaud). L'observation de l'état d'usure à la température de fonctionnement a été réalisée au

moyen d'un endoscope introduit par la trompe. Le dispositif de projection à chaud comprend une lance de 2,50 m de longueur, refroidie à l'eau, une trémie de stockage de la poudre à projeter, de 300 kg de capacité, et les appareillages nécessaires à la commande du gaz porteur (figure 35). A la suite d'essais en laboratoire pour déterminer l'adhérence optimale, on a utilisé avec succès ce dispositif au cours d'essais industriels. Comme gaz porteur de la poudre à projeter, on a employé le gaz naturel, lequel a été brûlé par de l'oxygène à la sortie de la lance, ce qui a permis d'obtenir une température élevée de la flamme. Le gunitage à chaud est également utilisable pour les réparations des revêtements dans d'autres installations métallurgiques et pour une série de matériaux réfractaires.



Figure 35: Installation de gunitage à chaud équipée d'une lance refroidie par eau, d'un réservoir de poudre réfractaire et d'un système de réglage du débit de gaz

Busettes immergées pour coulée continue

Les busettes immergées, utilisées en coulée continue entre le panier-répartiteur et la lingotière sont soumises à de multiples sollicitations. Outre les extrêmes sollicitations thermiques et mécaniques, les busettes doivent résister à une érosion continue par l'acier liquide et par le laitier formé par la fusion des poudres de couverture. La tenue des busettes est un élément important pour le déroulement de la coulée et l'exécution des coulées séquentielles. Arriver à des améliorations dans cette tenue constituait l'objectif d'une recherche du CRM.

L'attention a été portée principalement sur l'érosion de busettes immergées, à base de graphite et à haute teneur en alumine et pressées isostatiquement. Des essais en laboratoire avec des éprouvettes de ce matériau plongées dans un bain d'acier recouvert de laitier, ont tout d'abord montré que l'agressivité de l'érosion était surtout causée par l'alternance, due aux variations du niveau du bain, de l'attaque par le laitier avec l'attaque par le métal. L'étude des mécanismes de l'érosion a conduit à l'idée de remplacer au moins une partie du graphite par du nitrure de bore. Tout comme le graphite, le nitrure de bore n'est pas mouillable par

le laitier liquide et il possède une conductibilité thermique comparable. Son insolubilité dans l'acier liquide a été au contraire reconnue comme un avantage essentiel par rapport au graphite, à la suite des informations recueillies sur les mécanismes de l'érosion. Comme, en plus, les mélanges nitrure-graphite sont moins oxydables par l'air, ils sont donc les plus appropriés à l'usage en question.

Des essais en service de busettes immergées fabriquées industriellement avec une addition de 10% de nitrure de bore ont abouti au résultat souhaité: leur tenue s'est avérée être environ trois fois plus élevée que celle des busettes conventionnelles à base de graphite et d'alumine. Les figures 36 et 37 montrent, de façon significative, les différentes érosions sur des busettes pour des durées égales de coulée.



Figure 36: Busette immergée à haute teneur en alumine après un séjour dans du laitier et de l'acier liquides

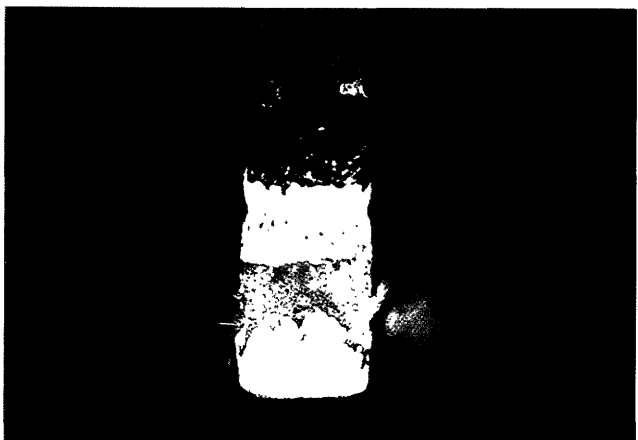


Figure 37: Busette immergée à haute teneur en alumine additionnée de 10% de nitrure de bore après le même traitement

Les économies sur les coûts qui résultent de l'usage de ce nouveau matériau, dues à une moindre consommation de busettes, à un changement moins fréquent de paniers-distributeur et à un rendement métallique plus élevé, sont considérables.

4. Technique des laminoirs — Traitement thermique

Dans les programmes de recherches CECA des 10 dernières années concernant le domaine de la technique des laminoirs, l'amélioration des qualités des produits laminés revêt une importance particulière. Les exigences en progression constante, surtout à l'encontre des produits plats, en ce qui concerne le respect de tolérances toujours plus faibles, la planéité et la régularité, réclament des efforts de recherches pour une meilleure détection des mécanismes techniques du formage et pour l'automatisation du déroulement du laminage.

Ces directions de développement se reflètent dans le choix brièvement exposé ci-après de travaux de recherche qui ont été exécutés dans le domaine des laminoirs, dans le cadre de l'activité des recherches encouragées par la CECA.

Dans les programmes entrepris dans les dernières années et qui se poursuivent à l'heure actuelle, se placent, au premier plan, les efforts de recherche pour économiser l'énergie et pour accroître la rentabilité. De nouveaux objectifs à atteindre découlent également des modifications structurelles qui s'accomplissent à l'heure actuelle.

Four électrique de réchauffage des brames

Les demi-produits, comme par exemple les brames destinées aux trains à larges bandes, sont portés à une température de laminage d'environ 1 200 °C dans des fours poussants ou des fours à longerons mobiles. La capacité de tels fours à brames oscille entre 200 et 400 t/h. Ils sont normalement chauffés au gaz naturel, au gaz de cokerie, au fuel ou au

gaz de haut fourneau enrichi. L'emploi de l'énergie électrique pour le chauffage des demi-produits n'a été introduit dans la pratique industrielle que dans peu de cas.

Les nouvelles techniques de chauffage par induction, tout comme la tendance vers une compétitivité améliorée du prix du courant par rapport aux autres sources d'énergie, peuvent changer rapidement cet état de choses. En outre, le chauffage électrique présente les avantages spécifiques suivants :

- grande rapidité de chauffage, haute productivité;
- importantes possibilités de réglage précis et d'automatisation;
- économie de matière, grâce à une plus faible perte au feu;
- bonne faculté d'adaptation, sans dégradation de la consommation spécifique, à des cadences variables de production;
- absence de pollution de l'environnement et conditions plus agréables de travail pour le personnel de conduite.

Pour aider l'industrie sidérurgique à poursuivre plus avant ces nouvelles tendances de développement et à les utiliser le cas échéant en service industriel, la CECA a encouragé, au début de 1975, une recherche qui a été exécutée par l'Irsid en collaboration avec la société Stein-Surface, l'Électricité de France et qui a été en même temps encouragée par le ministère français de l'industrie.

Installation d'essais

Pour ces essais, on a pris comme base une technologie entièrement nouvelle pour ce genre d'utili-

sation: l'emploi d'inducteurs à champ glissant. Il en est résulté un meilleur rendement, une introduction plus simple des brames dans le four et une possibilité d'adaptation optimale des inducteurs à l'épaisseur des produits. Les dimensions des brames utilisées ont oscillé de 190 à 240 mm pour l'épaisseur, de 600 à 1 200 mm pour la largeur et de 3 100 à 4 000 mm pour la longueur.

Le four à induction a été conçu avec une puissance de 5 MW. Une brame de dimensions standard (200 × 900 × 4 000 mm) a pu ainsi être réchauffée de 20 à 1 250 °C en 50 minutes. On a développé des écrans spécifiques à chemise d'eau et à parois minces, pour protéger les inducteurs contre la chaleur de rayonnement de la brame.

Un point important du programme a été le chauffage mixte des brames, consistant en un préchauffage pour les basses températures jusqu'à peu près 800 °C dans un four chauffé au gaz et ensuite à un chauffage par induction pour les hautes températures. Cette technique de procédé a permis de promouvoir le chauffage aux basses températures, économiquement favorable, par emploi du gaz de haut fourneau pauvre en calories et de l'associer aux avantages du chauffage par induction aux hautes températures. Les essais correspondants à cette technique ont pu être exécutés dans un four existant, chauffé au gaz naturel. La *figure 38* représente schématiquement l'agencement des deux fours d'essais avec les dispositifs nécessaires au transfert des brames. Bien entendu, pour des ins-

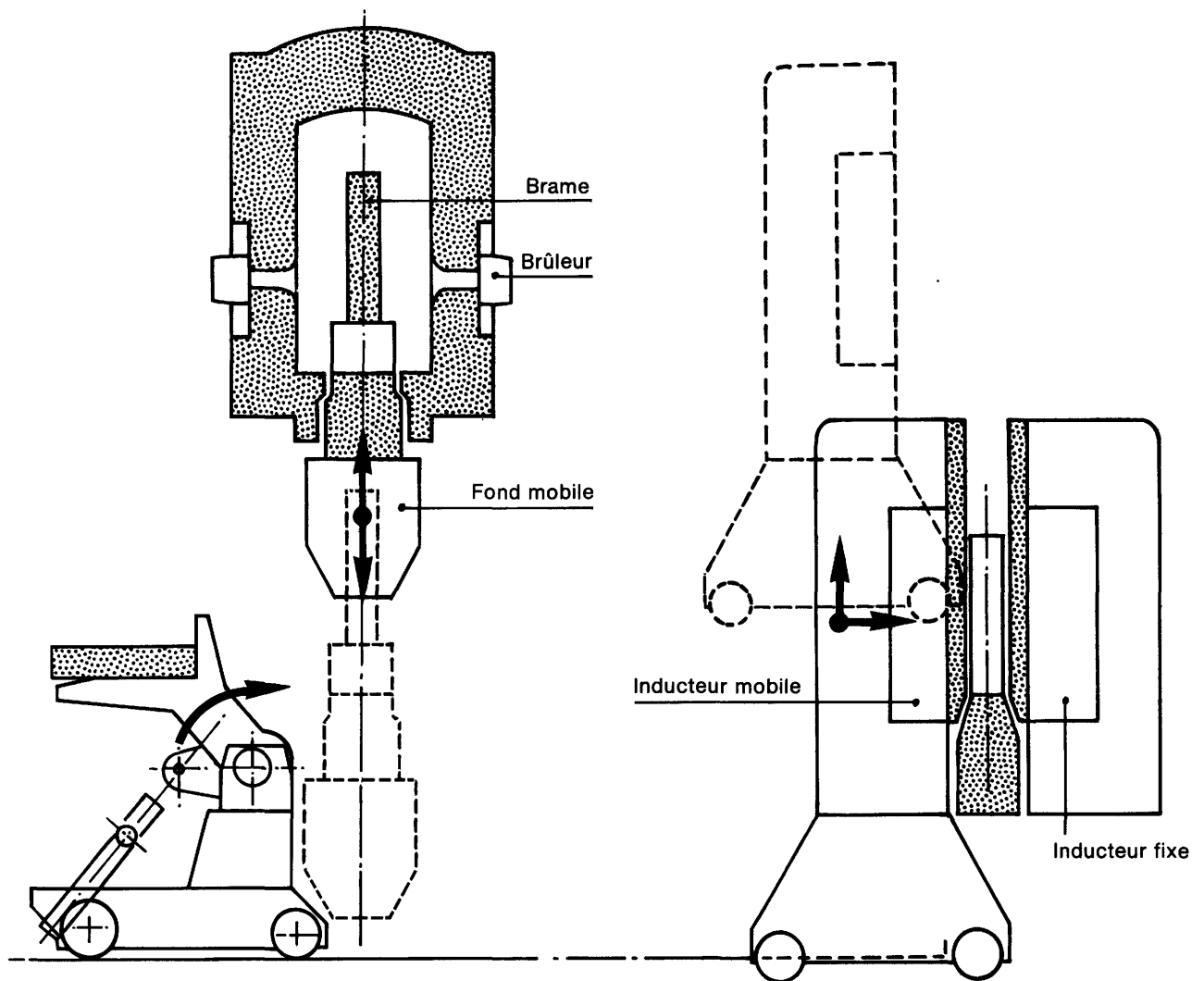


Figure 38: Disposition des fours expérimentaux pour un chauffage mixte

tallations industrielles, il faudrait choisir d'autres solutions.

Résultats et bilans économiques

Par le réchauffage exclusivement électrique, on a pu, après une série d'améliorations, atteindre une excellente homogénéité de température avec des différences maximales de température inférieures à 25 °C. Le rendement a atteint 75% et pour un réchauffage à 1 200 °C, la consommation du courant nécessaire a été de 300 kWh/t. La perte de métal par formation de la calamine n'a été que de 0,4%, donc environ 1% inférieure à celle du chauffage conventionnel.

Lors d'un chauffage mixte, la durée de mise à température depuis 800 jusqu'à 1 200 °C dans le four à induction a été de 30 minutes. L'homogénéité des températures est, également dans ce cas, restée très bonne. Cependant, en raison d'une proportion plus importante de chauffage au-dessus du point de Curie, le rendement a été un peu plus mauvais: 64%. Ceci correspond à une dépense d'énergie de 117 kWh/t; la perte au feu est restée constante avec le taux de 0,4%.

Une étude économique a donné les valeurs à titre indicatif représentées dans la *figure 39*. Ces valeurs sont, bien entendu, largement dépendantes des rapports de prix des différentes sources d'énergie.

Par exemple, dans le cas de la figure, l'énergie électrique a été supposée être 2,5 fois plus chère

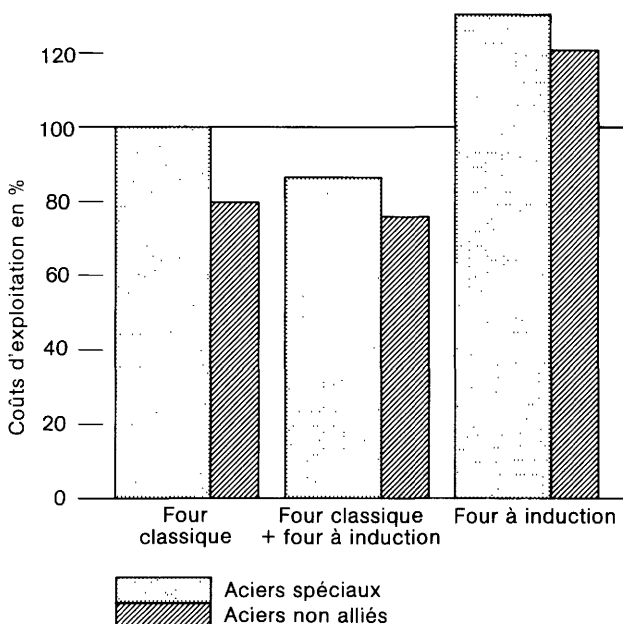


Figure 39: Comparaison des coûts d'exploitation pour le réchauffage des brames

que l'énergie pour les fours conventionnels et environ 5 fois plus chère par comparaison avec le chauffage aux basses températures pour la marche mixte. La perte financière par calaminage pour les aciers fins et spéciaux a été estimée deux fois plus élevée que celle pour les aciers de masse. En principe, la nouvelle technique de procédé semble plus particulièrement lourde de promesses pour les cas ci-après:

- pour le réchauffage de l'acier spécial;
- pour augmenter la capacité de réchauffage en modifiant un four existant chauffé au gaz et en lui adjoignant un four à induction;
- pour les techniques de laminage économisant l'énergie au moyen de l'enfournement à chaud;
- pour les trains de laminoirs à faible production et à marche discontinue.

Pour les installations à construire ou à modifier, chacune de ces possibilités doit être examinée dans le cadre des conditions marginales. Les résultats des recherches rendent possibles l'établissement d'un projet et une estimation des coûts proches de la réalité.

Contre-flexion des cylindres de laminoirs

Dans les dernières années, des efforts importants ont été déployés pour réduire les tolérances de laminage des tôles fortes. Le profil transversal de ces tôles est influencé par la flexion des cylindres. Des dispositifs de contre-flexion des cylindres ont été développés avec pour objectif de s'opposer à la flexion et par suite d'améliorer le profil transversal. La *figure 40* montre un tel système qui agit sur les cylindres d'appui (back up roll bending = BURB). Il existe également des systèmes qui agissent sur les cylindres de travail (work roll bending = WORB).

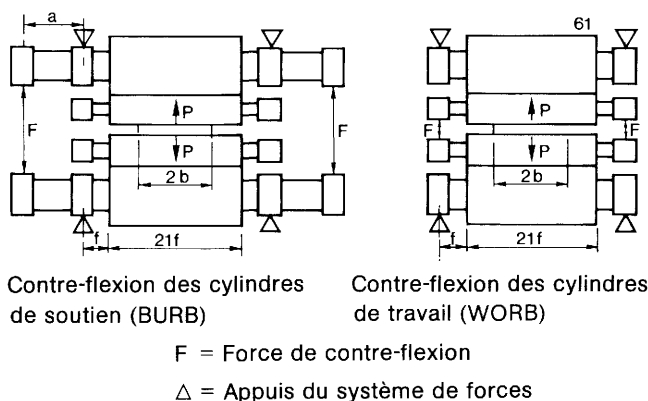


Figure 40: Système de contre-flexion des cylindres de laminoir

La contre-flexion des cylindres fait naître des situations compliquées en ce qui concerne les forces et la déformation. C'était donc l'objectif d'une recherche encouragée par la CECA et exécutée par l'Irsid, d'abord de comprendre l'ensemble des problèmes à l'aide d'un modèle mathématique et ensuite d'optimiser, dans des essais industriels, l'utilisation pratique de la contre-flexion des cylindres.

Cage de laminoir d'essai

La construction d'une cage quarto statique dans le rapport de dimensions de 1 à 10 a permis d'étudier les systèmes BURB et WORB, ainsi que leur combinaison. Cette étude a montré que la contre-flexion des cylindres de travail (WORB) était de beaucoup plus efficace que le système BURB. L'emploi combiné des deux systèmes additionne les effets de chacun. La concordance est bonne entre le modèle de calcul et les résultats obtenus sur la cage d'essai.

Essais statiques sur une cage quarto industrielle

Ces essais ont eu lieu sur la cage quarto de la tôlerie de la SA des Forges et Aciéries de Dillingen.

La longueur de table de la cage était de 4 300 mm, le diamètre des cylindres d'appui de 2 120 mm et celui des cylindres de travail de 1 095 mm.

Au moyen des empreintes laissées dans un alliage d'aluminium, on a pu déterminer l'efficacité de la contre-flexion des cylindres pour quatre largeurs différentes de tôles, comprises entre 2 000 et 4 000 mm. Dans ces essais, également, le système WORB, avec une force appliquée de 2 fois 124 t de chaque côté, s'est avéré relativement plus efficace que le système BURB avec une force de 2 fois 1 500 t de chaque côté. La *figure 41* montre, à titre d'exemple, la variation du bombé sur la largeur de la tôle pour le cas d'une tôle de 3 500 mm de largeur.

Essais industriels

Les essais industriels sur la cage quarto de Dillingen ont confirmé les relations précédemment trouvées. Globalement, les systèmes de contre-flexion du type WORB apparaissent, pour des raisons de construction et de coûts, plus intéressants que les systèmes de contre-flexion des cylindres d'appui (BURB).

Dans le cadre de ces recherches, on a pu, en outre, mettre au point des séquences optimisées de

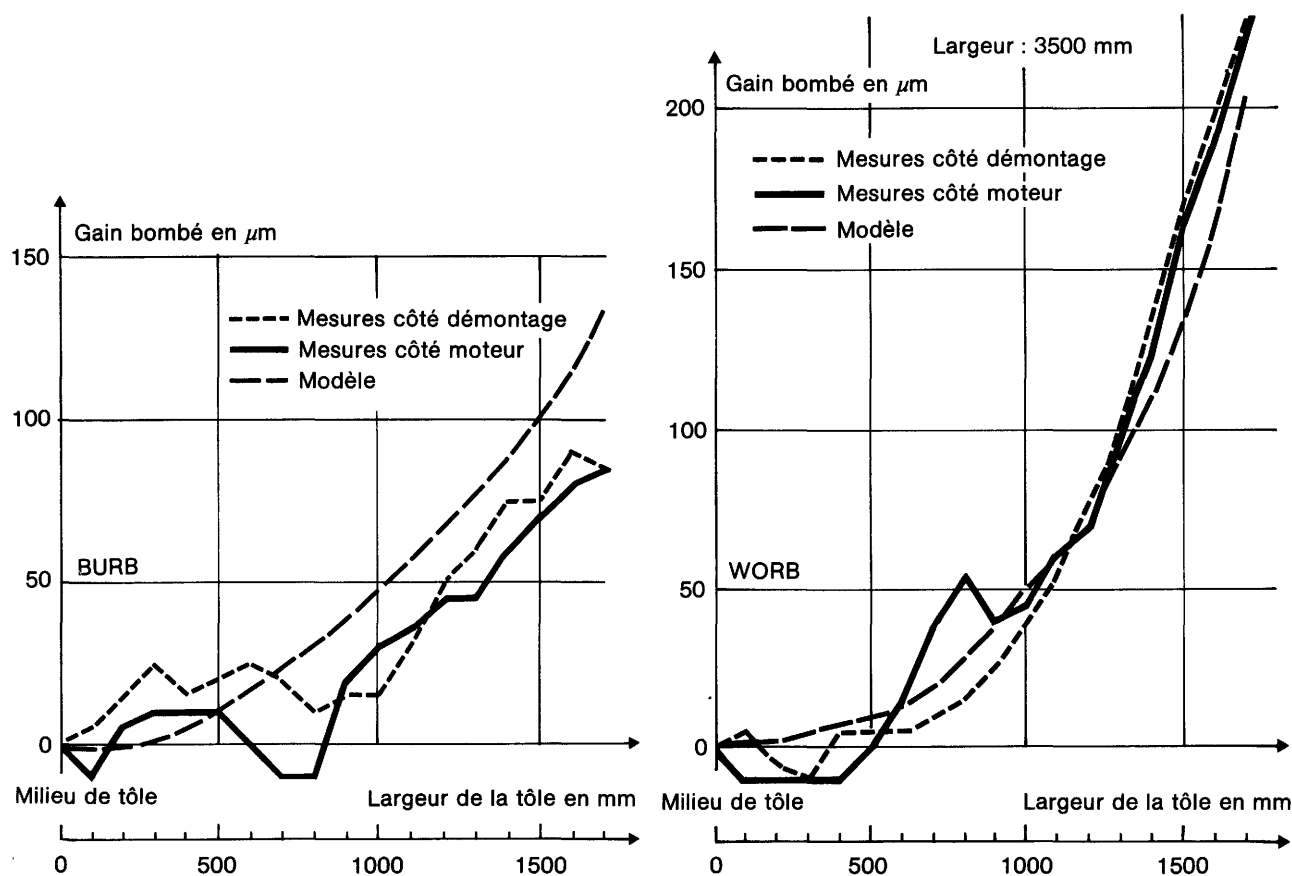


Figure 41: Variation du gain en bombé le long de la largeur de tôle

passes de laminage, lesquelles ont été appliquées dans la commande automatisée du processus de la tôlerie de Dillingen. Ceci a amené, pour les larges tôles en dessous de 10 mm d'épaisseur, à économiser deux passes. Le schéma de laminage optimisé est depuis lors en service industriel.

Procédés de refroidissement dans les laminoirs

Les phénomènes de refroidissement dans le produit laminé sortant du laminage à chaud ont fait l'objet d'une grande attention, déjà depuis de nombreuses années. Ils influencent la formation des structures, le gauchissement des produits longs sur le refroidisseur et participent à la formation et à la répartition des tensions internes.

Dans ces derniers temps surtout, de nouvelles perspectives dans le domaine du refroidissement ont été reconnues et explorées: citons l'emploi de très hautes vitesses de refroidissement, lesquelles rendent techniquement accessibles des effets de trempe directement à partir de la température de laminage, le refroidissement programmé pendant ou après le laminage, en liaison avec un traitement thermomécanique et d'autres techniques encore. Également, les vitesses de laminage en augmentation constante, les trains de laminoirs conçus pour des productivités plus élevées exigent de nouvelles solutions pour le refroidissement. L'étude des différents problèmes soulevés par ces progrès bute rapidement sur une question capitale: la détermination exacte du transfert local de la chaleur entre la surface refroidie et l'agent de refroidissement. Pour donner une impulsion dans cette voie, la CECA a encouragé une recherche centrée sur ce problème. Elle a été exécutée par le CRM de Liège. En même temps, les résultats de cette recherche devaient être appliqués et vérifiés dans une installation pilote.

Sonde pour la mesure des échanges thermiques

Le coefficient d'échange thermique déterminant l'effet refroidissant doit être mesuré localement et dynamiquement. Les essais ont amené à développer la sonde Cryoton. Une très importante condition préalable pour la mesure précise du flux unidirectionnel de chaleur, suivant la normale à la surface refroidie du produit, réside dans la garantie que les flux de fuite de chaleur dans les autres directions puissent être complètement supprimés. La sonde qui a été développée travaille selon le principe représenté dans la *figure 42*. Un barreau cylindrique de mesure, qui peut être chauffé, est équipé de deux thermo-couples; l'un de ceux-ci est placé le plus près possible de la surface frappée par le jet de l'agent refroidissant.

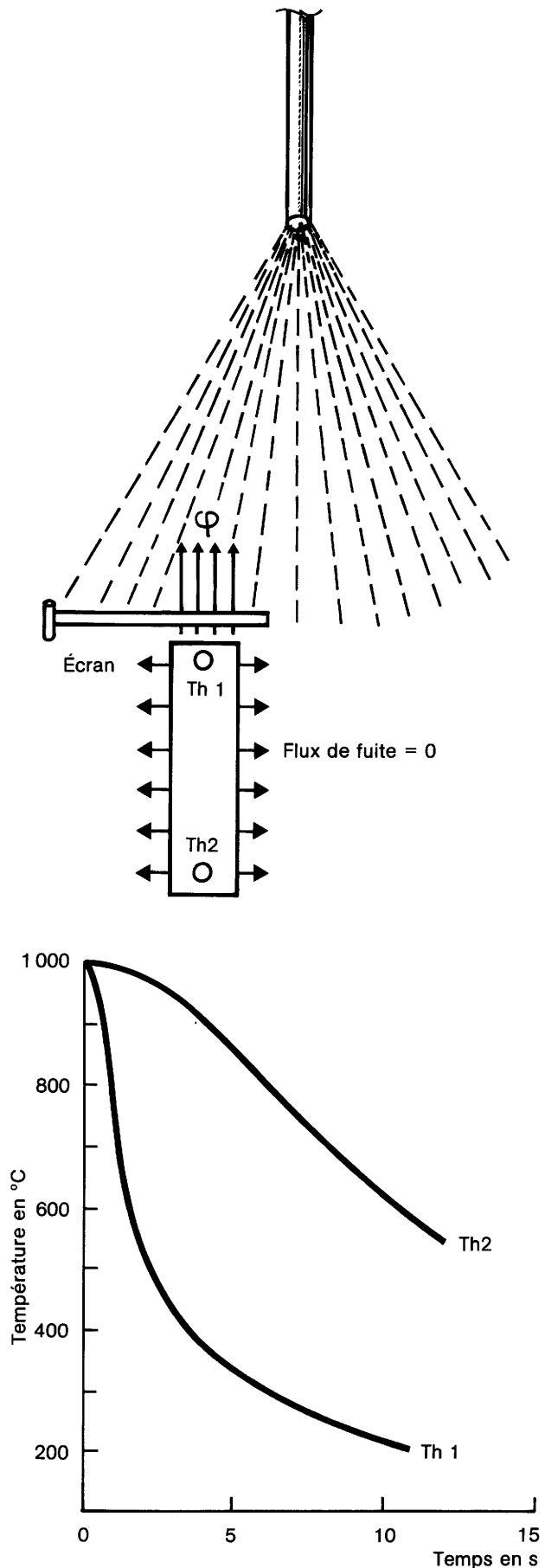


Figure 42: Méthode de mesure

Avant l'essai, la sonde est portée à une température uniforme. Après retrait de l'écran protecteur entre l'agent de refroidissement et la surface à refroidir, se développent deux courbes de température, dont le traitement permet de déterminer le flux thermique local.

La *figure 43* montre la construction de la sonde. Le barreau cylindrique de mesure est composé d'un alliage de platine et de rhodium, l'enroulement chauffant qui l'entoure est constitué d'un feuillard de nickel préalablement oxydé. Ce dernier remplit en même temps une autre tâche: celle d'interdire le flux de chaleur dans les directions latérales. La conductibilité calorifique dans le sens axial est ainsi

plus de quatre fois plus élevée que dans le sens radial.

Le modèle mathématique développé pour l'exploitation de ce dispositif de mesure a donné des résultats extraordinairement précis et reproductibles. La limitation du flux radial de chaleur, absolument indispensable pour l'utilisation du modèle, s'est révélée entièrement suffisante. La *figure 44* donne, à titre d'exemple, l'exploitation d'une mesure effectuée pour une surface soumise à l'action de gicleurs disposés en quinconce. En fonction de la température de la surface, on obtient, selon la distance à l'axe des gicleurs, différentes courbes de densité de flux thermique. Se trouve également donné le tracé du flux thermique déterminé au-des-

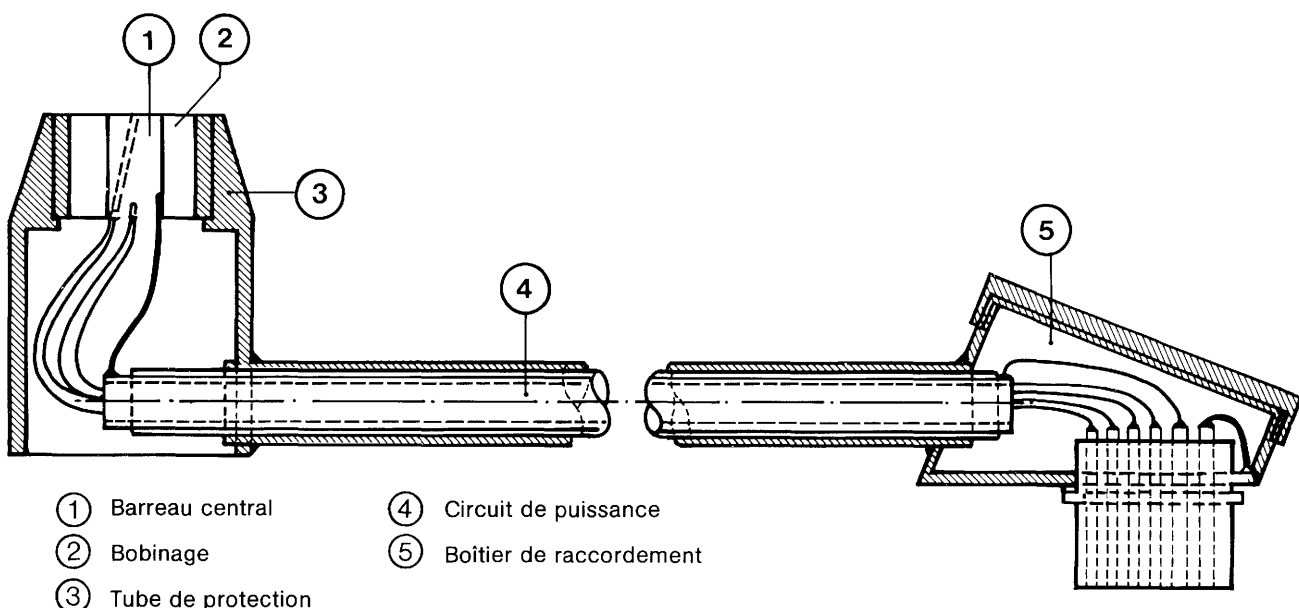


Figure 43: Structure de la sonde Kryoton

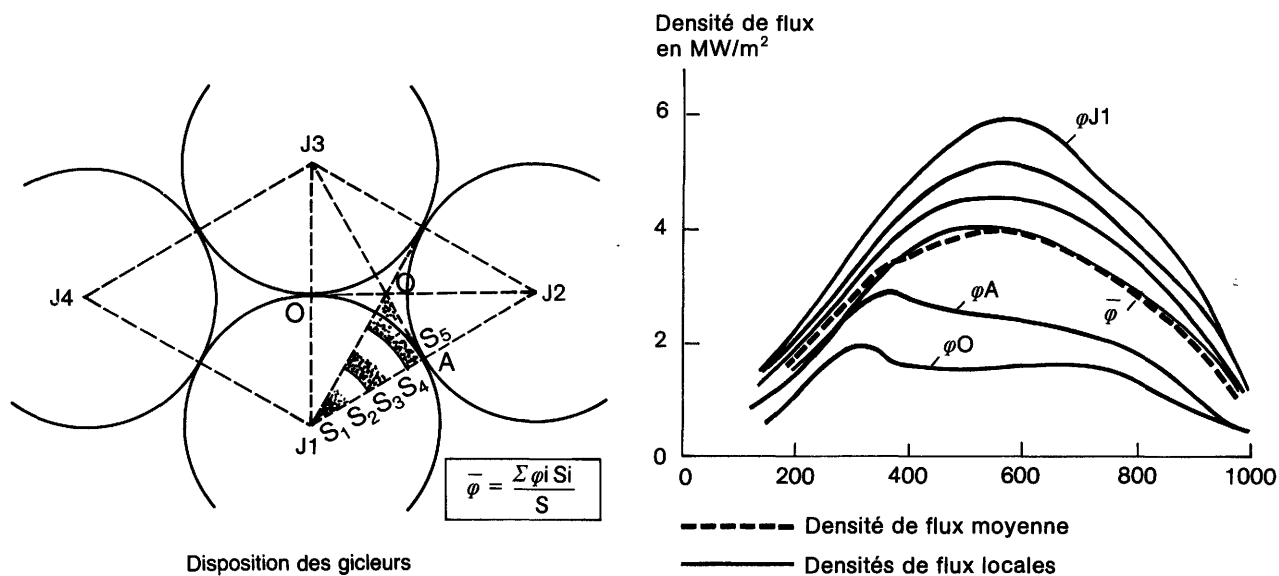


Figure 44: Effet de refroidissement d'un gicleur

sus de la surface refroidie. A l'aide de telles bases, il est possible de calculer avec précision des rampes de refroidissement pour les installations industrielles.

Essais pilotes à l'échelle industrielle

En poursuivant les recherches, on a pris en considération les connaissances rassemblées précédemment pour concevoir les trains industriels de laminaires. Le problème suivant s'est alors présenté: pour obtenir des propriétés mécaniques déterminées, les dernières passes de laminage doivent être exécutées à l'intérieur d'une zone de température définie avec précision. Dans de nombreux cas, cette procédure nécessite d'interrompre le déroulement du laminage avant ces dernières passes et de laisser le produit se refroidir pendant quelque temps sur le train de rouleaux. Ceci est possible dans les trains discontinus de laminaires pour profilés, mais, pour les trains continus, le problème ne peut être résolu qu'au moyen d'une rampe de refroidissement forcé, placée devant les dernières cages.

Les nombreux problèmes dérivés de cette situation ont été abordés d'abord dans des essais de laboratoire et ensuite dans des essais pilotes à l'échelle industrielle, menés sur le train à profilés de l'Arbed, usine d'Esch-Belval. On a aménagé devant la dernière cage de ce train, une ligne de refroidissement composée de quatre blocs refroidisseurs et garnie de tuyères-pulvérisateurs à brouillard d'eau. On a pu ainsi conduire un laminage contrôlé, travaillant avec un refroidissement rapide, de poutrelles à larges ailes du type HE 100 M.

Les essais ont été couronnés de succès. L'évolution des températures calculée au préalable s'est confirmée dans la pratique; les propriétés mécaniques des profilés traités thermo-mécaniquement de cette manière présentent les mêmes valeurs que celles obtenues avec le laminage contrôlé habituellement utilisé. Ce procédé peut donc être mis en œuvre également dans les trains continus à profilés.

Automatisation des trains à larges bandes à chaud

La proportion sans cesse croissante des produits plats dans la production totale des aciers laminés est exclusivement à attribuer à l'augmentation de la part des larges bandes. Dans ce secteur, on a déployé des efforts intenses pour augmenter les capacités. Les trains à larges bandes, construits ou transformés dans les 15 dernières années, sont équipés de systèmes d'automatisation plus ou

moins étendus. Ces derniers apportent essentiellement les avantages suivants:

- amélioration des tolérances d'épaisseur;
- commande plus précise de la température de fin de laminage;
- augmentation de la productivité et meilleure utilisation de la capacité.

Au début des années 70, il est apparu pertinent, dans le cadre d'une recherche encouragée par la CECA, d'améliorer par voie communautaire, les conceptions de l'automatisation afin de tenir compte des exigences croissantes sur le respect des dimensions et sur les propriétés demandées aux larges bandes à chaud. C'est ainsi que des travaux de développement ont été engagés par l'Irsid et Usinor à l'usine de Denain et par le CRM et Sidmar, sur le train à larges bandes de Gand.

Train à larges bandes d'Usinor de Denain

Au cours de la recherche, on a développé une conception d'automatisation qui commande le serrage des cylindres, les vitesses de laminage et les rampes d'arrosage des six cages du train finisseur. Une condition préalable à l'exécution des essais a été l'équipement du train finisseur avec les instruments nécessaires pour collecter et traiter les valeurs mesurées. La *figure 45* montre de façon schématique la liaison entre ordinateur et système de réglage.

Tous les modèles mathématiques nécessaires à la commande du processus ont été établis en conformité avec les lois fondamentales de la physique, afin de leur garantir une possibilité d'utilisation plus générale que celle offerte par les modèles statistiques. Par la suite, ces modèles ont pu être simplifiés pour la commande du processus.

- Déformation élastique des cages: alors que le modèle théorique décrit le comportement de la cage pour différents cas d'application des charges, pour la commande en temps réel, on a pu établir et mettre en pratique une courbe simple pour le cédage des cages.
- Évolution des températures: le modèle théorique calcule l'évolution de la température moyenne et de la température superficielle depuis la sortie du train dégrossisseur jusqu'à la sortie du train finisseur, en fonction de différents paramètres, tels que le contact avec les cylindres, le décalamineur, les rampes de refroidissement, l'énergie de déformation, etc. Le modèle simplifié utilisé pour l'automatisation ne détermine que la température moyenne de la bande, mais effectue en plus une adaptation automatique aux divergences de longue durée.

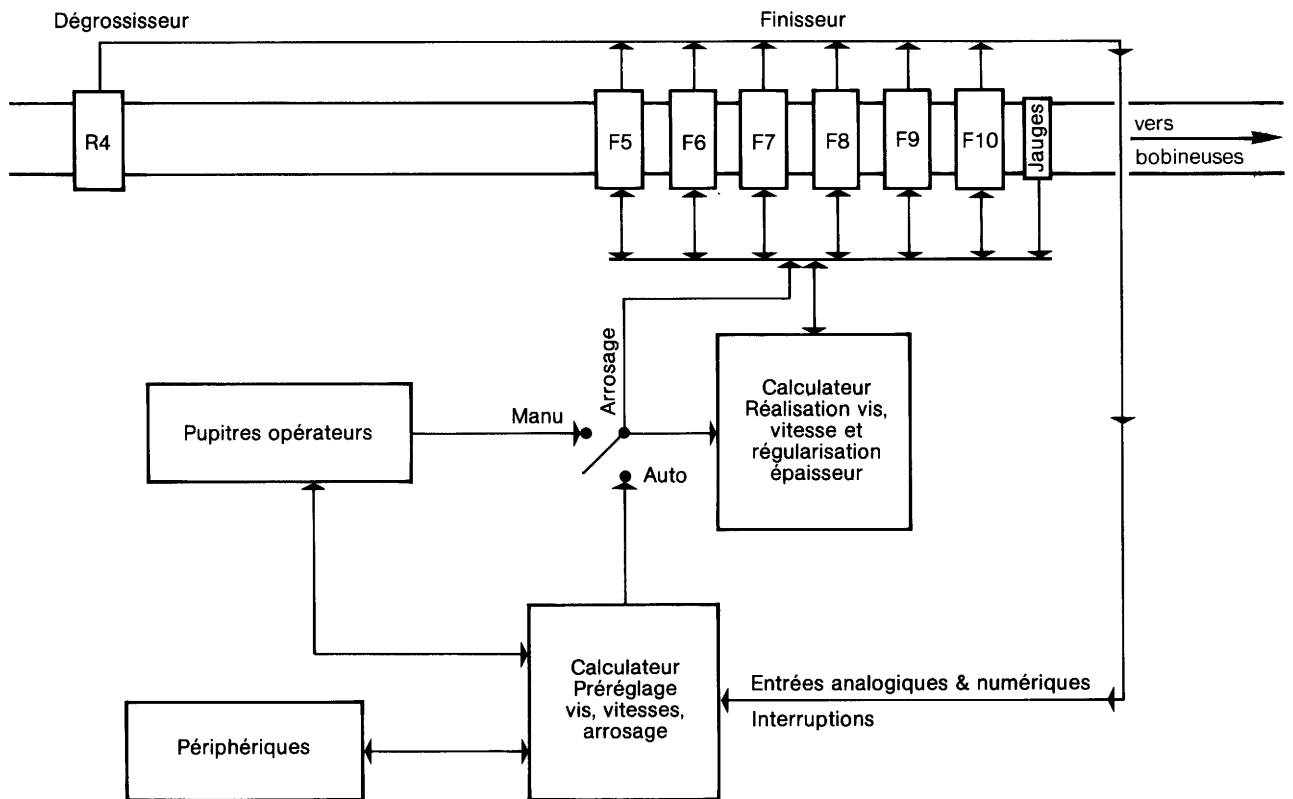


Figure 45: Liaison entre le processus et le système de pré réglage

— Force de laminage et couple: les bases de calcul furent établies aussi bien à partir de modèles théoriques de calcul qu'également à partir d'essais de simulation de torsion à chaud. A titre d'exemple pour la bonne concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées, la figure 46 montre une telle comparaison en ce qui concerne la force de laminage.

L'essai industriel du système d'automatisation sur le train à larges bandes de l'usine de Denain a abouti à des résultats très satisfaisants. Dans un essai de grande envergure, portant sur plus de 9 500 bobines, on est arrivé à des écarts types de 3,9 % pour la force de laminage, de 5 % pour le couple et de 8,9 % pour la température de fin de laminage. Quant à l'épaisseur, les écarts types ont été de 0,030 mm pour des épaisseurs de 1,75 à 2,45 mm et de 0,038 mm pour des épaisseurs de 2,45 à 3,75 mm.

Train à larges bandes de Sidmar à Gand

La conception d'automatisation développée par le CRM et Sidmar a élargi le but poursuivi aux réglages du profil de l'emprise des cylindres et de

la planéité de la bande, deux facteurs qui ne sont pas maîtrisés avec les systèmes de réglage existants.

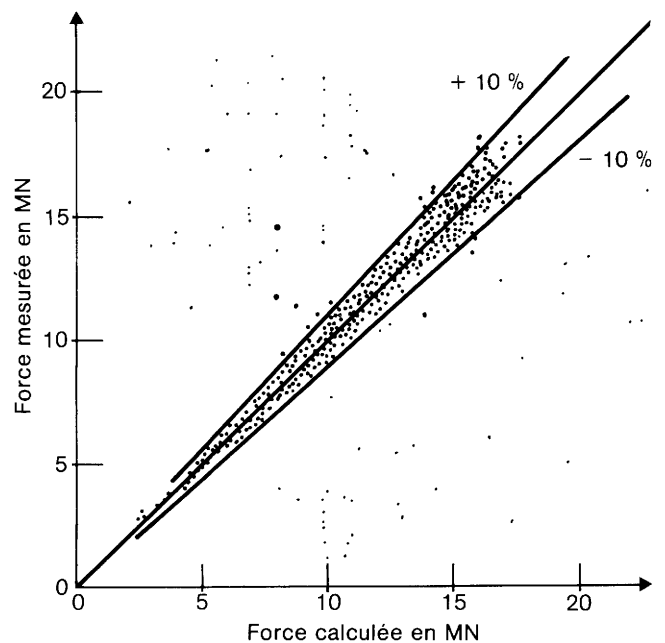


Figure 46: Comparaison de la force de laminage calculée et mesurée

Les travaux de recherche ont abouti au développement du procédé SIGMA-RO de commande du processus. Il est en fonctionnement depuis 1975 chez Sidmar.

En 1979 et 1980, les trains à larges bandes de Cockerill à Chertal et de Carlam l'ont appliqué à leur tour, et trois autres trains à larges bandes le mettront aussi bientôt en œuvre.

Le grand succès de cette conception de commande du processus réside dans la répartition dynamique des réductions sur toutes les cages du train finisseur et ceci pour chaque bande, en tenant compte de l'état thermique et mécanique instantané du train. La *figure 47* explique cette stratégie de réglage: en plus des modèles courants de calcul pour la température de fin de laminage, les forces de laminage, les couples, le cédage élastique des cages, etc., on a introduit de nouveaux modèles qui commandent le profil transversal d'épaisseur et la planéité de la bande, en fonction de la déformation thermique et de l'état d'usure des cylindres.

Dans la pratique industrielle, l'introduction de cette commande par ordinateur a fortement diminué la dispersion des épaisseurs de bande et des températures de fin de laminage. Cela est nettement visible sur la *figure 48*. En outre, des améliorations sensibles ont pu être atteintes pour le profil transversal et pour la planéité de la bande.

Durée d'utilisation et augmentation de productivité

Un complément judicieux des recherches sur l'automatisation a été apporté par des travaux de l'Institut

de recherches industrielles (BFI) du VDEh sur les temps de disponibilité des installations. A côté de l'emploi de la conduite commandée par ordinateur du processus, la diminution systématique des temps de pannes peut également contribuer à un abaissement des dépenses d'exploitation.

La grande partie des perturbations dans les trains à larges bandes, dues aux installations, retombe sur le train finisseur, y compris le train de rouleaux de sortie et les bobineuses. En particulier, pendant le parcours de la tête de bande entre le train finisseur et la bobineuse, il se produit fréquemment, pour les bandes minces, outre la formation de boucles, un retournement de la tête de bande. L'étude détaillée du déroulement des mouvements de la bande a montré que la vitesse limite, critique pour la tête de bande, dépendait essentiellement du rapport de la distance entre rouleaux au diamètre de ceux-ci; ce résultat peut être pris en considération lors de la construction de nouveaux trains ou la transformation de trains existants.

Les causes de l'enroulement, pareil à un télescopage, des spires intérieures de la bobine sur le mandrin de la bobineuse sont à attribuer, en tout premier lieu, à la forme de la tête de bande, laquelle est engendrée pendant le formage sur le finisseur. Les mécanismes de l'engagement de la tête de bande sur la bobineuse ont été scrutés à l'aide d'une caméra à grande vitesse. Cette prise de bande peut être améliorée de façon décisive par un positionnement optimal de la bobineuse. On a dégagé dans ce sens des propositions pour la construction et la technique d'exploitation, afin de diminuer le taux de perturbations et d'améliorer la qualité de la bande enroulée.

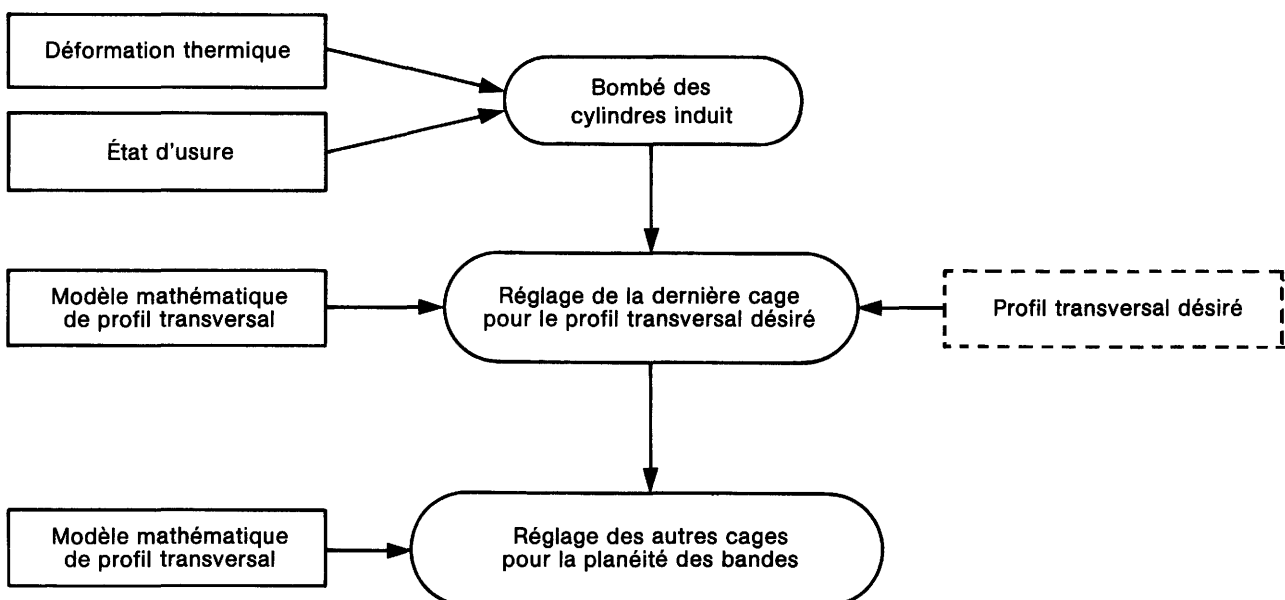


Figure 47: Modèle de répartition dynamique des réductions sur toutes les cages

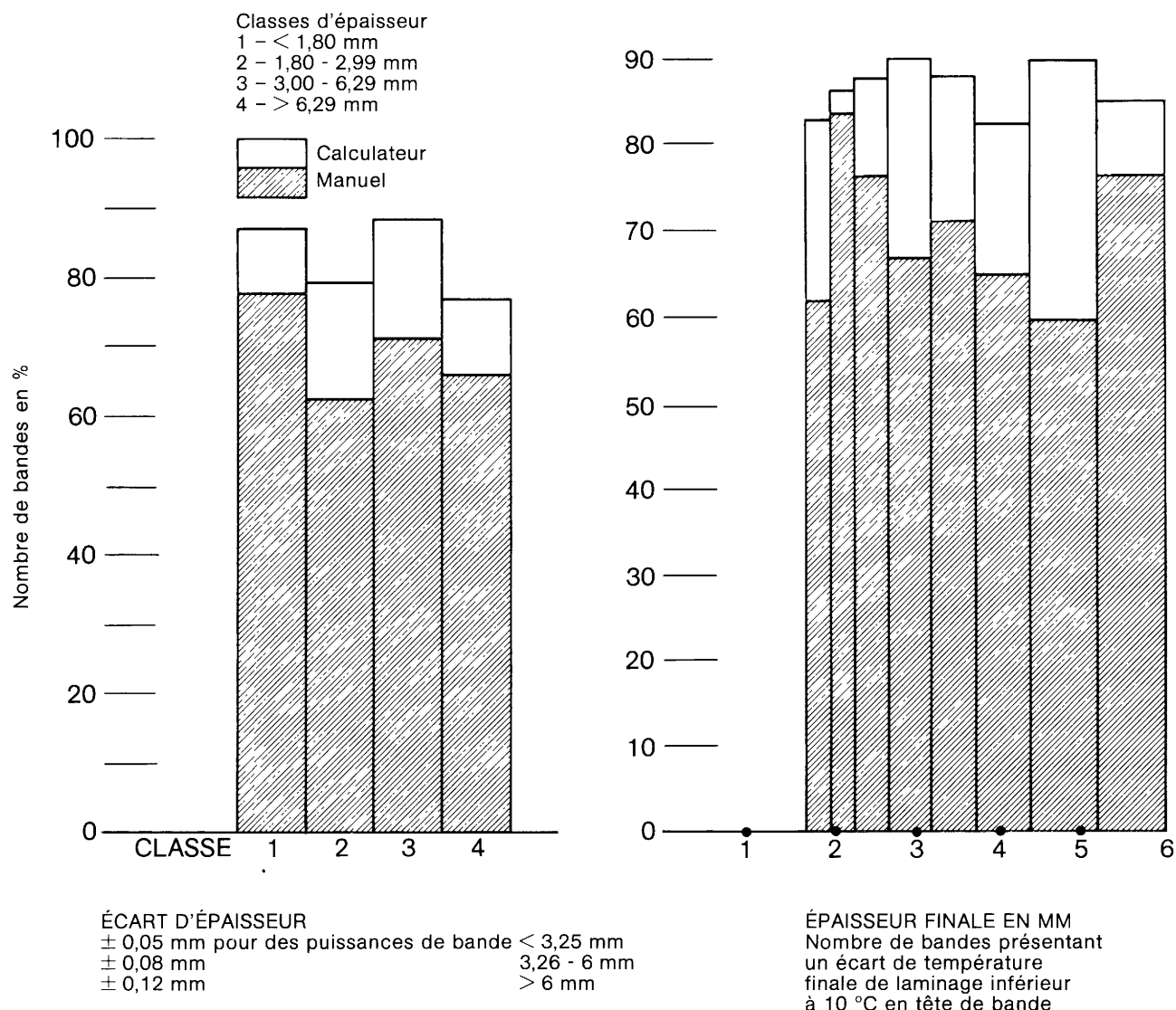


Figure 48: Écarts d'épaisseur de bande et de température finale de laminage en cas de fonctionnement automatisé

Grâce à l'emploi d'un refroidissement complémentaire dans le train finisseur, on a la possibilité d'augmenter la vitesse du laminage. A l'aide de la simulation du comportement de la température, on a déterminé des relations entre les vitesses de sortie du train et les débits d'eau nécessaires.

geur et par voie de conséquence les surlargeurs de sécurité à la fabrication. Pour le producteur, tout comme pour l'utilisateur, ceci présente une grande importance économique. Avec l'aide de la CECA, l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh, en collaboration avec la société Estel, Usines sidérurgiques de Dortmund, a exécuté une recherche très importante pour résoudre ce problème.

Diminution des fluctuations de largeur des larges bandes à chaud

Par suite des fluctuations de largeur, on est obligé, lors du laminage de la bande à chaud, de lui apporter des surlargeurs de sécurité, afin de ne pas se trouver, à aucun endroit de la bande, à une largeur inférieure à la largeur de consigne prescrite. On peut donc apporter de sensibles économies de métal, si on réussit à réduire les fluctuations de lar-

Essais industriels sur un train à larges bandes

Le train à larges bandes à chaud de Dortmund, utilisé pour les essais, se compose d'un train dégrossisseur constitué d'une cage continue, d'une cage réversible et d'une autre cage continue munie de cylindres refouleurs coniques, ensuite d'un train finisseur à sept cages, suivi d'un train de rouleaux de refroidissement et enfin d'un groupe de trois bobineuses. Tout d'abord, on a constaté, dans une

recherche particulière, que les cylindres verticaux de forme cylindrique produisaient un tracé de largeur beaucoup plus favorable sur toute la longueur de la bande que les cylindres de forme conique. Les fluctuations résiduelles de largeur aux extrémités de la brame dégrossie sont cependant toujours importantes.

Pour expliquer les causes de ces défauts, on a installé sur le train des appareils de mesure de la largeur développés par le BFI et comportant un enregistrement en continu. Les fluctuations de largeur n'ont pas été déterminées comme jusqu'ici comme étant la somme résultant de plusieurs passes horizontales et verticales, elles ont été au contraire collectées individuellement après chaque passe soit verticale, soit horizontale. Il en est résulté la conception d'un modèle sur le mouvement du métal au voisinage des arêtes.

Les rétrécissements dans la largeur qui apparaissent au voisinage des extrémités de la bande prennent naissance dans le train dégrossisseur. Participent largement à ce phénomène, les bourrelets produits par les passes refouleuses le long des arêtes de la bande, mais qui ne s'étendent pas jusqu'aux extrémités de la bande. Il fallait trouver tout

d'abord s'il n'y avait pas des combinaisons de passes qui conduisaient à de plus faibles fluctuations de largeur. Par laminage de brames flammées en gradins qui chacune a été laminée par quatre passes horizontales et quatre passes verticales, on a pu vérifier environ 300 combinaisons différentes de passes, en n'utilisant que quatre brames dégrossies.

le résultat le plus important de ces séries d'essais a été que les fluctuations de largeur sont les moindres, quand les réductions choisies sont d'environ 25 mm pour la passe refouleuse, et pour la passe horizontale qui lui fait suite d'environ 40 mm ou plus. La *figure 49* explique l'influence des séquences de passes; on y a représenté l'évolution de la largeur d'une brame dégrossie comportant un impact prononcé de décrochage (courbe supérieure). Une forte passe refouleuse élimine le défaut de largeur presque complètement, comme le montre la courbe supérieure de la partie gauche de la figure. Cependant, dans la passe horizontale qui suit, le défaut s'agrandit à nouveau de façon considérable (courbe du milieu). Si on utilise une passe refouleuse plus faible, il en résulte une plus importante élimination du défaut (partie droite de la figure).

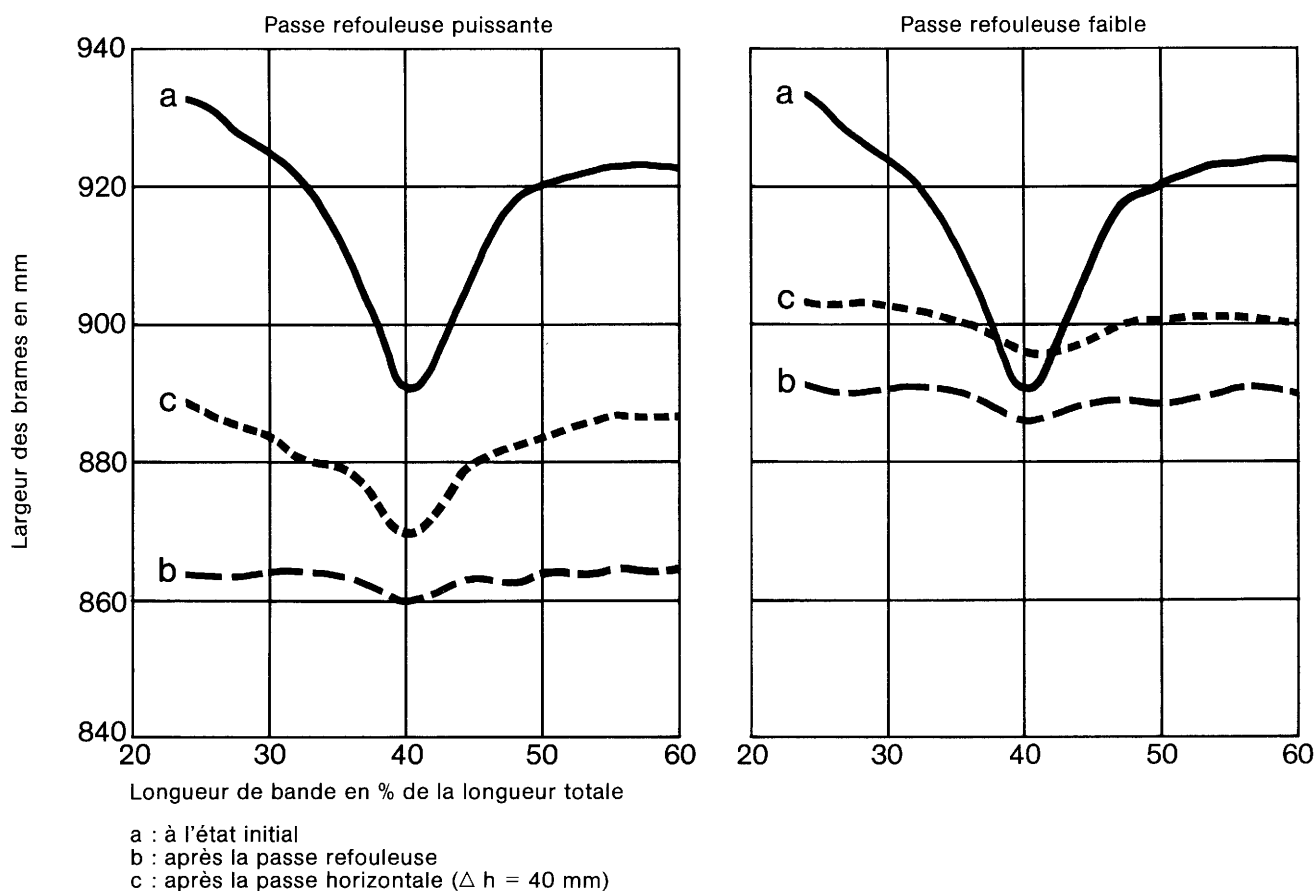


Figure 49: Modification des fluctuations de largeur d'une brame après une combinaison de passe refouleuse et horizontale pour différentes réductions de passes refouleuses

Les recommandations que l'on a pu déduire des recherches ont amené dans la pratique du laminage une réduction de 8 mm des fluctuations de largeur et un amoindrissement correspondant des surlargeurs de sécurité jusqu'ici nécessaires.

Débit des installations de coulée continue

Si on applique intégralement les recommandations ci-dessus, il peut arriver qu'à partir d'une certaine largeur initiale on ne peut couvrir qu'un domaine plus restreint de largeurs finales. Cette constatation est importante pour le réglage des largeurs des brames de coulée continue et par là pour le débit des installations. Une recherche CECA qui a débuté chez Hoogovens-Estel va tenter de trouver de nouvelles voies. Son objectif est d'atteindre, dans le train dégrossisseur, des réductions de largeur jusqu'à 600 mm.

Par ce moyen, il pourrait se trouver de nouvelles possibilités d'économiser l'énergie, en laminant des demi-produits de coulée continue sans réchauffage intermédiaire.

Automatisation des trains tandem à froid

L'augmentation de la capacité, l'amélioration de la qualité des produits et l'accroissement du degré d'utilisation sont les objectifs poursuivis qui ont amené, dans les dernières années, un développement intensif des systèmes de commande du processus dans le laminage à froid. Depuis le début des années 70, la recherche Acier CECA a poursuivi systématiquement la réalisation de ces objectifs. Plusieurs programmes de recherche, étalés dans le temps, ont apporté un lot de connaissances nécessaires à l'automatisation et ont permis d'établir finalement des conceptions de réglage d'utilité pratique et de portée générale.

Modèles

Pour l'optimisation des séquences de passes, ont joué le rôle le plus primordial les modèles de processus pour la force de laminage, le couple de laminage, la distribution des températures dans la bande et les cylindres, ainsi que la planéité de la bande. Étant donné que le développement des modèles de cette nature, sur base statistique, n'aboutissait pas à la validité générale désirée, des modèles basés sur l'analyse physique des mécanismes ont été établis par l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh.

Pour l'établissement du modèle de la force de laminage et du couple de déformation, les importantes

propriétés du frottement dans l'emprise des cylindres sont nettement influencées par la longueur de cette emprise et par la vitesse de laminage. À l'aide des valeurs mesurées sur des cages à froid, on a pu développer un modèle empirique pour calculer le coefficient de frottement à partir des données disponibles par le laminage.

Le modèle pour le calcul des températures de la bande et des cylindres se construit à partir d'un processus stationnaire de laminage et permet de déterminer les zones de température à l'intérieur des cylindres, de la bande et du film de lubrification. À titre d'exemple d'un tel calcul, la *figure 50* montre les distributions de température dans un train tandem de 5 cages. Le calcul du bombé thermique des cylindres, de même que les modèles pour la description de la répartition des contraintes de traction sont des éléments importants d'une conception pour automatiser l'optimisation des séquences de passes. L'objectif est le laminage d'une bande plane avec le débit le plus grand possible pour le train.

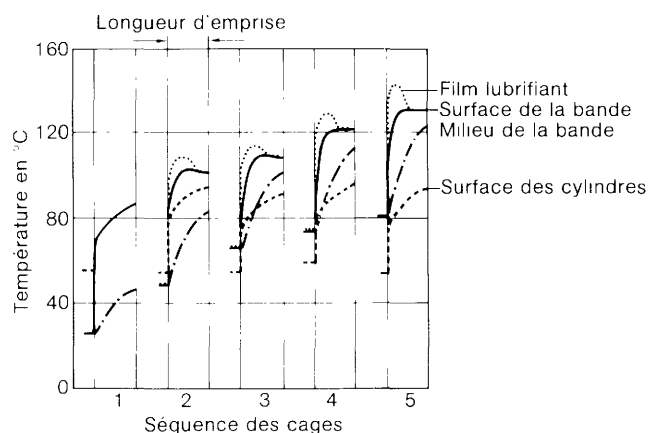


Figure 50: Répartition de la température sur un train tandem à 5 cages

Commande du processus avec optimisation auto-adaptative des passes

Dans la suite des recherches, un système de commande «on-line» a été développé dans un travail en commun entre le CSM et Italsider et vérifié, pour son utilisation industrielle, sur un train tandem à froid de 4 cages de l'usine de Novi Ligure. Pour ce faire, on a pu se reporter à des modèles partiels provenant des recherches du BFI et du CRM. L'optimisation des séquences de passes a les fonctions suivantes :

- recensement de l'état de service du train et collecte des propriétés de la bande, en particulier de sa dureté;
- calcul du réglage du train pour l'introduction de la bande, la phase d'accélération et le déroulement ultérieur de la marche du laminage;

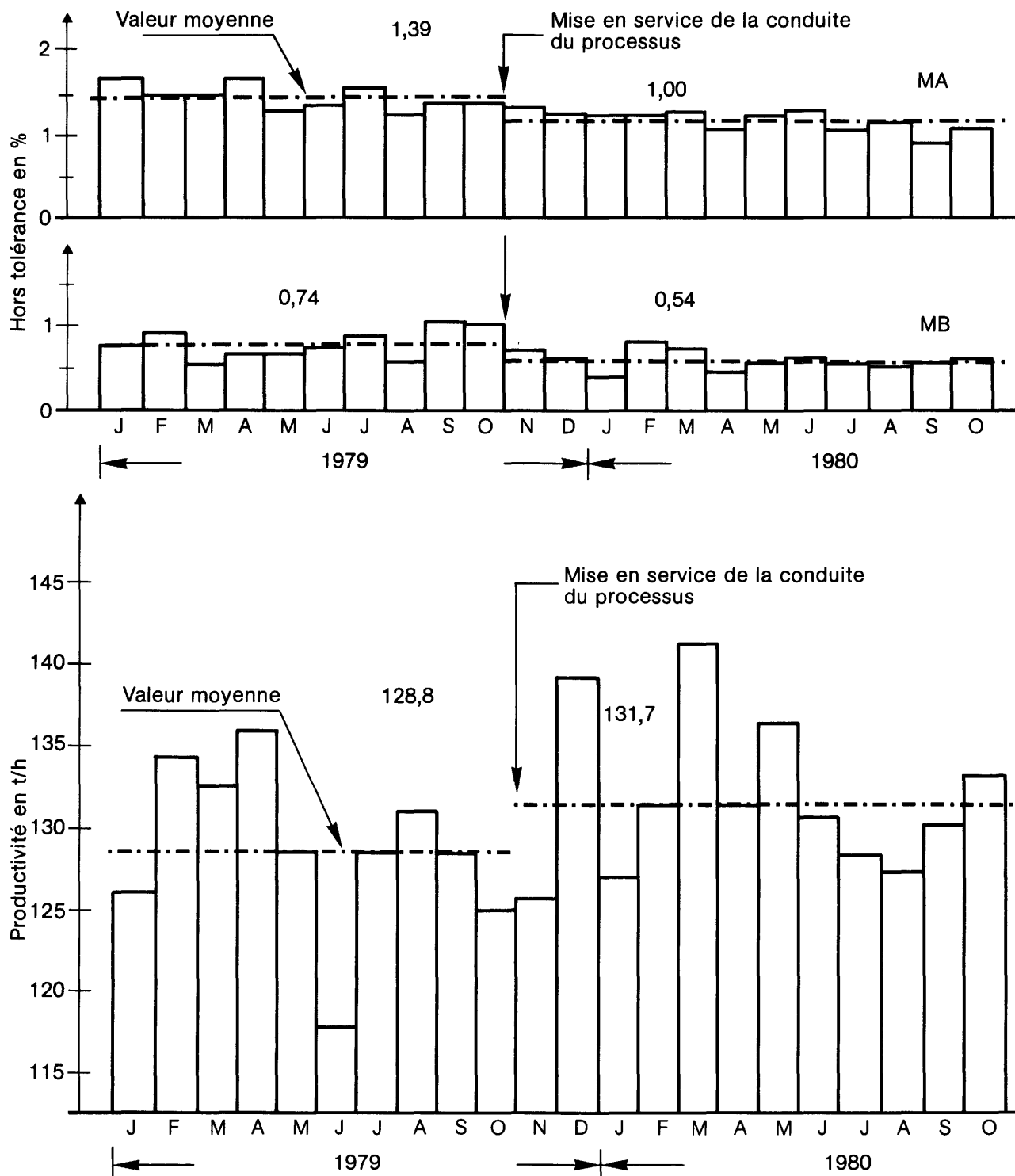
— adaptation des grandeurs de commande pendant le laminage.

Les modèles de commande dérivent d'un modèle physique du mécanisme du laminage. Comme particulièrement importants se sont révélés les modèles pour le calcul de la rugosité, du profil transversal, de la planéité et de la température de la bande, ainsi que pour la rugosité, la température et le bombé thermique des cylindres. D'autres modèles saisissent le comportement dynamique du

train en liaison avec les modifications dans les qualités de la bande.

Grâce à une mise en service normal depuis fin 1979, on a pu relever une série d'améliorations apportées par l'automatisation :

- diminution des tolérances pour l'épaisseur finale prescrite (*figure 51*);
- amélioration de la planéité;
- augmentation de la productivité par diminution des durées de perturbations et par introduction plus rapide de la bande (*figure 52*);



Figures 51 et 52: Amélioration de la stabilité dimensionnelle et de la productivité après la mise en service du système de conduite du processus

- adaptation plus facile de la marche du laminoir pour de nouvelles qualités de bande;
- allègement des conditions de travail du personnel de conduite.

L'utilisation du système de commande du processus dépasse 96 %.

En raison de sa construction de portée générale, cette commande du processus est bien transposable sur d'autres trains à froid. En ce moment, le train à froid de l'usine de Tarente est en cours d'équipement avec ce système de commande.

Réglage de la planéité dans les laminoirs à froid

La sidérurgie s'efforce de satisfaire aux exigences en perpétuelle croissance à l'encontre de la planéité en vue de la transformation ultérieure des bandes laminées à froid. Sans doute, dans le laminoir à froid, l'action combinée des paramètres de marche qui influencent la planéité est extraordinairement complexe. Cette complexité demande une méthode de recherche très étendue: elle nécessite aussi bien des développements des modèles théoriques qu'une technique de mesures améliorée et que des recherches industrielles approfondies. Cet état de choses a incité la CECA à mettre en route un programme coordonné, réparti entre plusieurs centres de recherches. Ce programme n'est pas encore terminé dans son entièreté, mais il a déjà à l'heure actuelle fourni des résultats intéressants pour l'industrie.

Établissement des modèles mathématiques

Une étude théorique et expérimentale de l'Irsid a permis de vérifier et d'augmenter les connaissances acquises.

Tout comme pour la bande à chaud, les défauts de planéité dans la bande laminée à froid sont provoqués par des différences de longueurs sur la largeur de la bande. Cependant, au contraire des phénomènes qui se déroulent pendant le laminage à chaud, on ne peut, dans le laminage à froid, que modifier dans de très faibles proportions en général, le profil transversal, sans qu'apparaissent des défauts de planéité. Des différences entre le profil transversal initial de la bande et la forme de l'emprise des cylindres provoquent, sur la largeur de la bande, des divergences dans la répartition des contraintes de traction, dans les forces de laminage et dans la déformation des cylindres. Ces diffé-

rences locales dans la pression exercée par les cylindres agissent sur les coefficients locaux de frottement et s'extériorisent par une répartition irrégulière des températures sur la largeur de la bande.

Un modèle de calcul s'appuyant sur différents coefficients de frottement a donné une bonne concordance avec les résultats industriels. Pour les actuelles géométries des cages, on peut déterminer les paramètres de réglage comme la force de laminage et la contre-flexion, qui amènent une plus grande précision pour le laminage de bandes planes.

Au Max-Planck Institut pour la recherche sidérurgique, on a développé des calculs de modèles qui recouvrent en particulier le comportement thermique des cylindres de travail et par là les variations de forme qui lui sont liées. Les effets des interventions thermiques par refroidissement ou échauffement des cylindres ont pu être observés et comparés quant à leurs répercussions sur la planéité.

Appareil de mesure de la planéité

Étant donné que, dans le laminage à froid, la bande se trouve sous traction longitudinale, les différences de longueurs sont, dans la plupart des cas, compensées par l'allongement élastique. Une mesure directe des différences de longueurs est par conséquent impossible. Cependant la répartition des contraintes de tension, proportionnelle à la répartition des longueurs, est un moyen de secours pour déterminer les défauts de planéité. Au cours d'une recherche exécutée par l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh, on a développé un instrument de mesure de la planéité qui utilise comme valeur de mesure la force, proportionnelle à la traction, d'appui sur un galet de renvoi.

L'appareil de mesure présente extérieurement la forme d'une poulie de renvoi. Il comporte plusieurs éléments individuels, rangés les uns contre les autres et haubanés entre eux par un tirant. Une importance particulière de ce développement réside dans la réduction extrême de la largeur des éléments de mesure. Celle-ci n'est que de 25 mm et permet de collecter également les défauts locaux de planéité, comme les ondulations en rive et les ondulations situées plus vers l'axe, avec suffisamment de sûreté.

Les forces de renvoi qui agissent sur les éléments individuels sont reportées sur des capteurs rotatifs piézo-électriques de force, qui livrent une valeur mesurée à chaque rotation. Les éléments sont rangés les uns contre les autres de telle façon que les capteurs puissent être disposés en quinconce et être reliés par groupes à un amplificateur commun

des mesures. Ceci est expliqué par la *figure 53*, dans laquelle est représenté le développement du pourtour des galets et l'exploitation des valeurs mesurées.

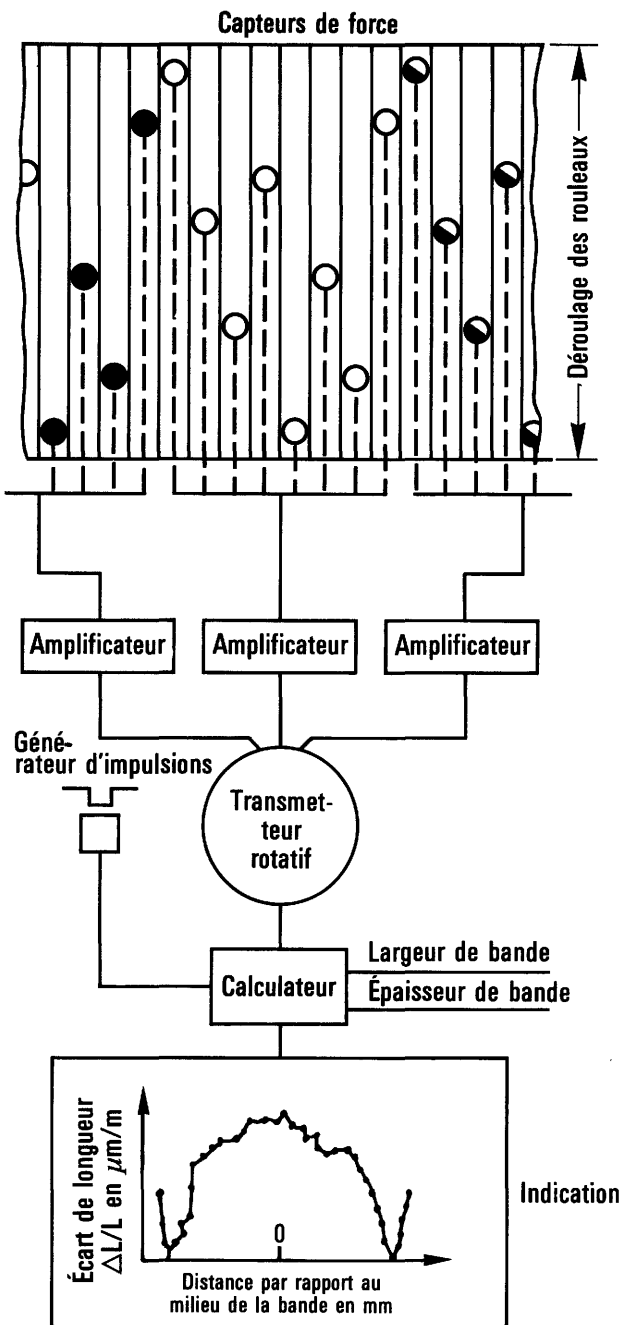


Figure 53: Jauge de planéité. Disposition des capteurs de force et traitement des mesures

Dans des essais industriels sur un train à froid de trois cages, on a expérimenté en service permanent, avec un grand succès, un appareillage de mesure large au total de 1 075 mm. Les différences de longueurs ainsi déterminées sont affichées sur un moniteur TV. Les défauts de planéité décelés par l'appareil de mesure montrent, avec les défauts relevés par les contrôles qui ont suivi, une bonne concordance sur le plan de leur nature et de leur grandeur.

Améliorations industrielles

Le développement de l'appareil de mesure de la planéité constitue une base de départ importante pour la mise au point continue et la mise à l'épreuve de dispositifs de réglage pour la planéité des bandes et la répartition des contraintes de traction. Ce pas suivant dans le réglage de la planéité et des contraintes de traction constitue l'objectif principal d'un projet de recherches qui vient de débiter au VDEh en collaboration avec le BFI et plusieurs laminoirs à froid.

Sur un train tandem à froid, on a ajouté pour la mesure de la planéité, une correction de température. On a aussi étudié l'effet de la répartition de l'agent de refroidissement, de la flexion des cylindres et d'autres paramètres de fonctionnement, sur la répartition des contraintes de traction.

Pour le réglage de la planéité dans un laminoir à froid pour aciers spéciaux (laminoir à 20 rouleaux), on a adapté le système de mesure de la planéité du BFI aux particularités de ce type de laminoir. D'après la compréhension des rapports entre les valeurs de consigne et la planéité de la bande, on en a déduit un schéma de réglage approprié au laminoir à 20 rouleaux.

Les essais sur une installation de planage sous tension ont pour but d'analyser technologiquement plus à fond le mécanisme de planage et d'établir des consignes pour son réglage et, le cas échéant, des directives pour une conception améliorée des installations de planage sous tension.

Procédé de décapage électrolytique neutre continu

Le développement des procédés de décapage électrolytique pour le traitement des bandes à chaud poursuit essentiellement deux objectifs: Tout d'abord, on espère obtenir une amélioration de la qualité de surface du produit décapé et ce avec une rentabilité comparable. Ensuite, cette technique de procéder pourrait apporter la solution des très difficiles problèmes de l'environnement provoqués par le décapage de l'acier.

Ces deux tâches se trouvent dans les objectifs de recherche de la CECA. C'est pourquoi il était tout à fait logique de découvrir une nouvelle voie dans ce domaine. La CECA soutient le développement intensif, sur les plans technique et métallurgique, d'un nouveau procédé de décapage proposé par le CSM de Rome. En même temps, sont encouragées des recherches techniques sur l'environnement

dans le cadre d'un programme de lutte technique contre les nuisances dans l'industrie sidérurgique, relevant de la direction des « affaires sociales » de la Commission des Communautés européennes.

Conception de la recherche

Le procédé classique de décapage chimique pour décalaminer l'acier provoque des nuisances considérables dans l'environnement. Le procédé de décapage électrolytique neutre, proposé par le CSM (DEN⁽¹⁾), supprime l'utilisation d'acides. Ces derniers sont remplacés par des solutions salines neutres, lesquelles peuvent être régénérées sans nuisances pour l'environnement, tout comme l'élimination des boues de décapage qui en proviennent.

Dans le but de décalaminer les bandes laminées à chaud en acier non allié ou faiblement allié pour tôles électriques, le CSM a développé d'abord, par des essais en laboratoire, une conception de procédé qui repose sur une suite de polarisations cathodiques et anodiques de la bande. Les réactions électro-chimiques fondamentales ont été étudiées. Le pas suivant est constitué par la définition des paramètres les plus favorables pour la marche du procédé : température du bain, densité de courant linéaire, séquences de polarisation, concentration de la solution de sulfate de soude, etc. Les procédés pour la régénération et le réemploi des sous-produits du processus ont été développés.

Installation pilote

La construction d'une installation pilote, étape nécessaire avant l'utilisation industrielle du procédé, a apporté de plus amples et importantes bases. La *figure 54* donne une représentation schématique de l'agencement de l'installation pilote. Les essais

pilotes ont déterminé pour les valeurs optimales de marche : une température de bain de 90°C et une concentration de la solution de sulfate de soude de 200 à 250 g/l. La durée de décapage est fortement influencée par le traitement mécanique de la calamine qui précède l'opération. Pour des tôles électriques grenillées au préalable, les temps de décapage étaient de 40 à 45 s. Le procédé est facilement adaptable à différentes conditions d'exploitation, car le temps de décapage peut être abaissé par une augmentation conséquente de la densité du courant. Les densités optimales du courant se situent entre 2 et 5 kA/m².

Application industrielle

Les perspectives d'utilisation industrielle rentable de ce procédé sont bonnes. La consommation de courant dans les essais pilotes, pour une épaisseur type de 2,5 mm de la bande, a atteint des valeurs comprises entre 25 et 50 kWh/t. Industriellement, on peut s'attendre à coup sûr à réaliser une valeur moyenne de 35 kWh/t, si des procédés modernes de préparation de la calamine sont utilisés, comme par exemple le planage sous tension, tel qu'il est déjà employé avec succès industriellement dans les installations de décapage aux acides.

Dans la totalité des coûts d'exploitation pour le traitement de décapage, la consommation d'électricité ne joue qu'un rôle secondaire. Bien plus importantes sont les dépenses d'entretien courant. C'est pourquoi, on peut poser en principe que celles-ci seront moindres en comparaison de celles des installations de décapage aux acides. Ceci constitue un avantage essentiel du nouveau procédé.

(¹) Decapaggio Elettrolitico Neutro.

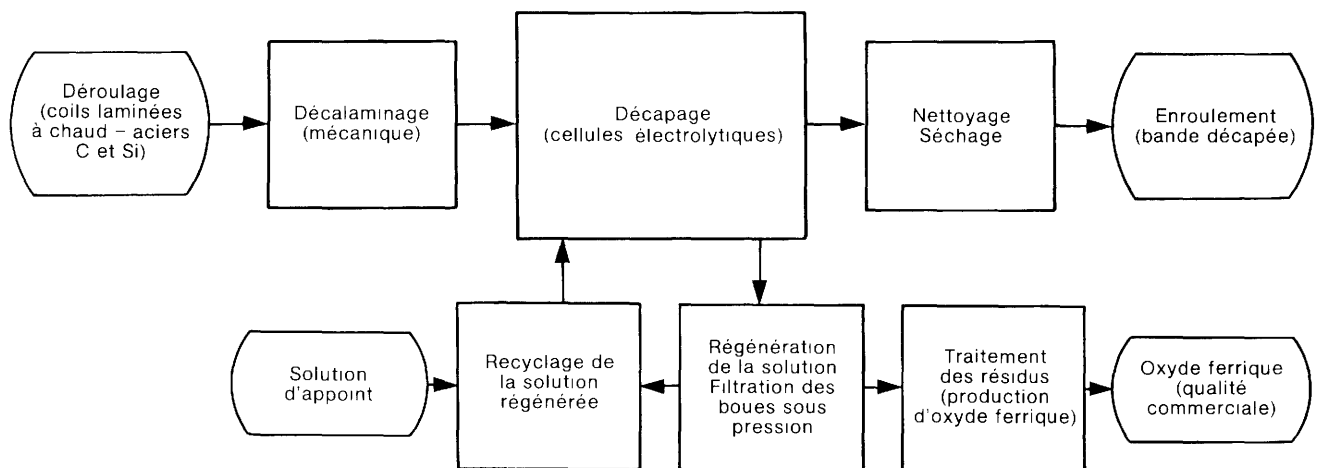


Figure 54 : Schéma du procédé de décapage électrolytique neutre

Les méthodes développées pour la régénération de la solution électrolytique et l'utilisation des sous-produits semblent être rentables. On peut donc ainsi disposer d'une solution favorable des problèmes d'environnement qui sont si difficiles à maîtriser pour les actuels procédés de décapage. Enfin, les essais ont montré — et ceci est peut-être le plus grand attrait de l'utilisation technique de ce

procédé — que l'on peut obtenir une qualité de surface remarquable. En outre, ce procédé est contrôlable simplement et efficacement par la commande des paramètres de marche. Il y a là un avantage essentiel du procédé DEN pour satisfaire la demande croissante de produits plats, laminés à chaud ou à froid, exigeant de très hautes qualités de surface.

5. Procédés de mesure — Techniques d'analyse

La qualité, la régularité des propriétés et le respect des tolérances des produits de l'industrie sidérurgique sont en relation directe avec l'état et la fiabilité des techniques des mesures industrielles. Les efforts de recherches de la CECA dans ce domaine ont conduit à des résultats intéressants et largement utilisés dans la pratique industrielle.

Dans le contexte des objectifs généraux de recherche de la CECA, se trouvait l'intégration la plus poussée possible dans les lignes de fabrication de procédés appropriés de contrôle non destructif. Ce n'est que de cette façon qu'en plus d'une amélioration de la régularité des produits, on rend possible un abaissement des coûts par diminution des rebuts de fabrication. A cet égard, la combinaison des techniques de mesure et de l'automatisation s'impose de toute évidence.

Les problèmes se situent surtout dans le secteur des laminoirs. Les grandeurs complexes à mesurer, comme la qualité de la surface, les défauts internes et d'autres grandeurs, lesquelles doivent être contrôlées en partie à de hautes températures et à de grandes vitesses en des conditions dures de service du laminoir, offrent ici un vaste champ pour la recherche et le développement.

Le contrôle de la marche des installations sidérurgiques peut également être substantiellement amélioré par de nouvelles méthodes de mesure. Dans le développement de nouvelles techniques d'analyse, on cherche à atteindre une haute précision, une mise à disposition rapide et des coûts peu élevés.

Dans le chapitre qui suit, on a choisi quelques exemples dans le programme très étendu des techniques de mesure de la CECA.

Procédés de contrôle par ultrasons

Des procédés non destructifs au moyen des ultrasons possèdent, depuis plusieurs décennies, une place solide dans l'industrie sidérurgique. En grande partie, ils sont utilisés pour déceler les défauts internes dans les demi-produits en acier, tels que les brames et les blooms et aussi dans les produits finis. Pour l'intégration des procédés ultrasonores de contrôle dans les lignes de fabrication, le problème se pose de leur possibilité d'être utilisés pour des produits à haute température. Jusqu'ici c'était impossible. Divers programmes CECA devaient, dans cette optique, aboutir à des solutions applicables dans la pratique industrielle. L'utilisation de techniques ultrasonores pour la détection des structures était un autre thème qui sera évoqué brièvement dans ce chapitre.

Sondage des brames à haute température

Dans différents programmes de recherche encouragés par la CECA et exécutés par l'Irsid, en collaboration avec la SA Hoogovens-IJmuiden pour certains cas, on a recherché des possibilités de sondage à chaud. L'emploi d'un tel procédé de localisation des défauts dans les brames, pratiqué entre la cage de laminoir et la cisaille à chaud, permet, par l'optimisation du cisailage, d'importantes économies de métal.

Les difficultés techniques se trouvent d'une part dans le couplage acoustique entre la tête de sondage et la surface chaude de la brame et d'autre part dans le fort amortissement des ondes ultrasonores à haute température. Pour réaliser le cou-

plage, l'Irsid a développé un procédé qui utilise une mince couche d'eau qui se déplace à très grande vitesse. Ce faisant, le refroidissement très bref, mais extrêmement puissant, empêche la formation d'un écran de vapeur. La *figure 55* montre la construction de la tête de sondage. On utilise une source ultrasonore focalisable de haute intensité.

Lors des essais pilotes pour introduire le procédé dans la pratique industrielle, s'est posé un autre problème dû à l'état de surface des brames. Les défauts de planéité et la calamine incrustée ont fortement dégradé le couplage. C'est la raison pour

laquelle les essais sur produits avec une meilleure surface ont conduit plus rapidement au succès. Depuis le début de 1977, on a mis en service avec succès, sur le laminoir des Aciéries d'Imphy, un dispositif industriel pour détecter la retassure primaire dans les billettes d'acier spécial de 115 mm d'arête. La *figure 56* donne le schéma de principe de ce dispositif. Le contrôle, à l'aide d'une tête de sondage qui peut se déplacer de 1,50 m se fait à l'arrêt de la billette devant la cisaille à chaud.

A l'heure actuelle, la SA Hoogovens-IJmuiden construit une installation industrielle qui localisera la

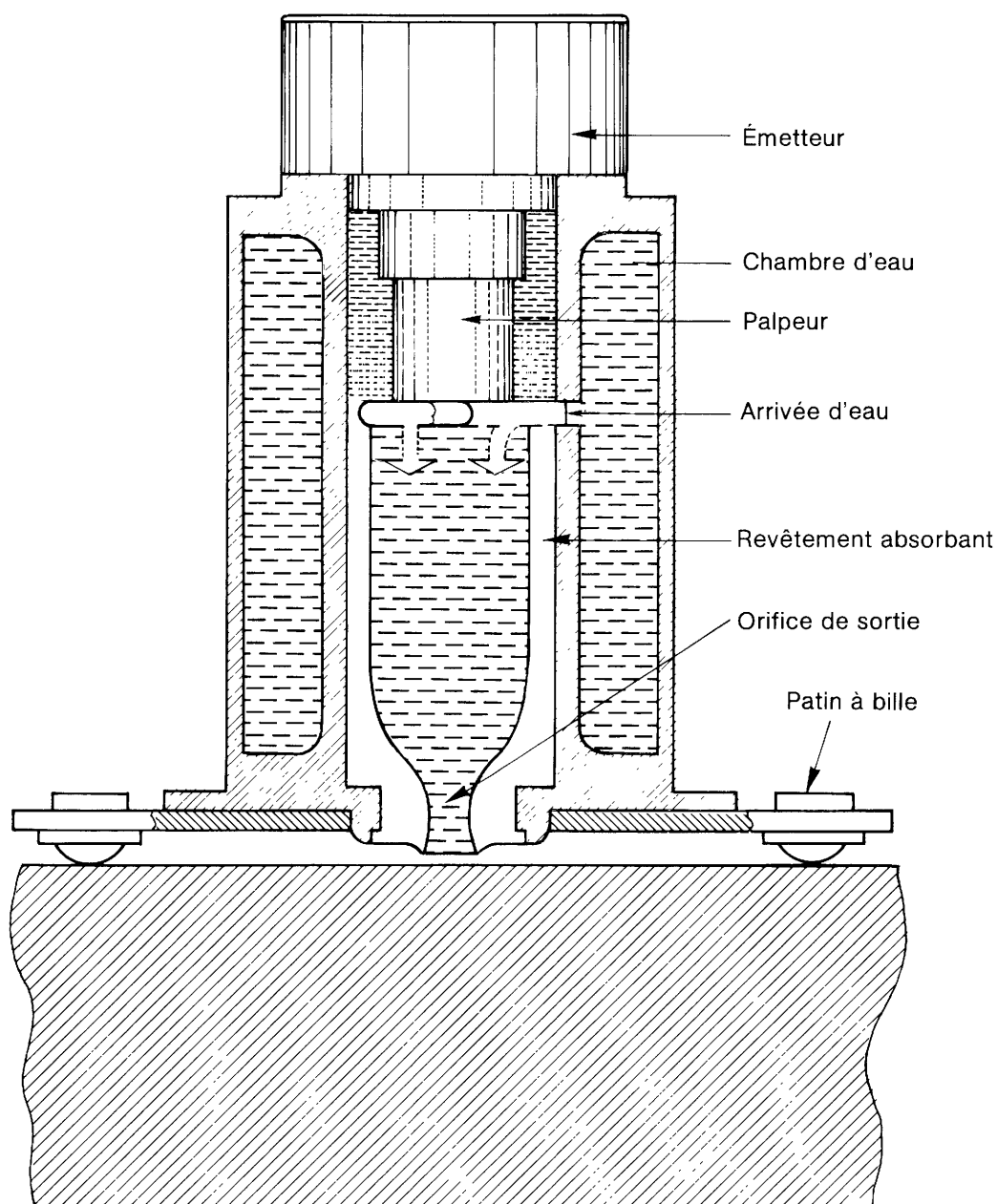


Figure 55: Tête de sondage ultrasonore pour brames

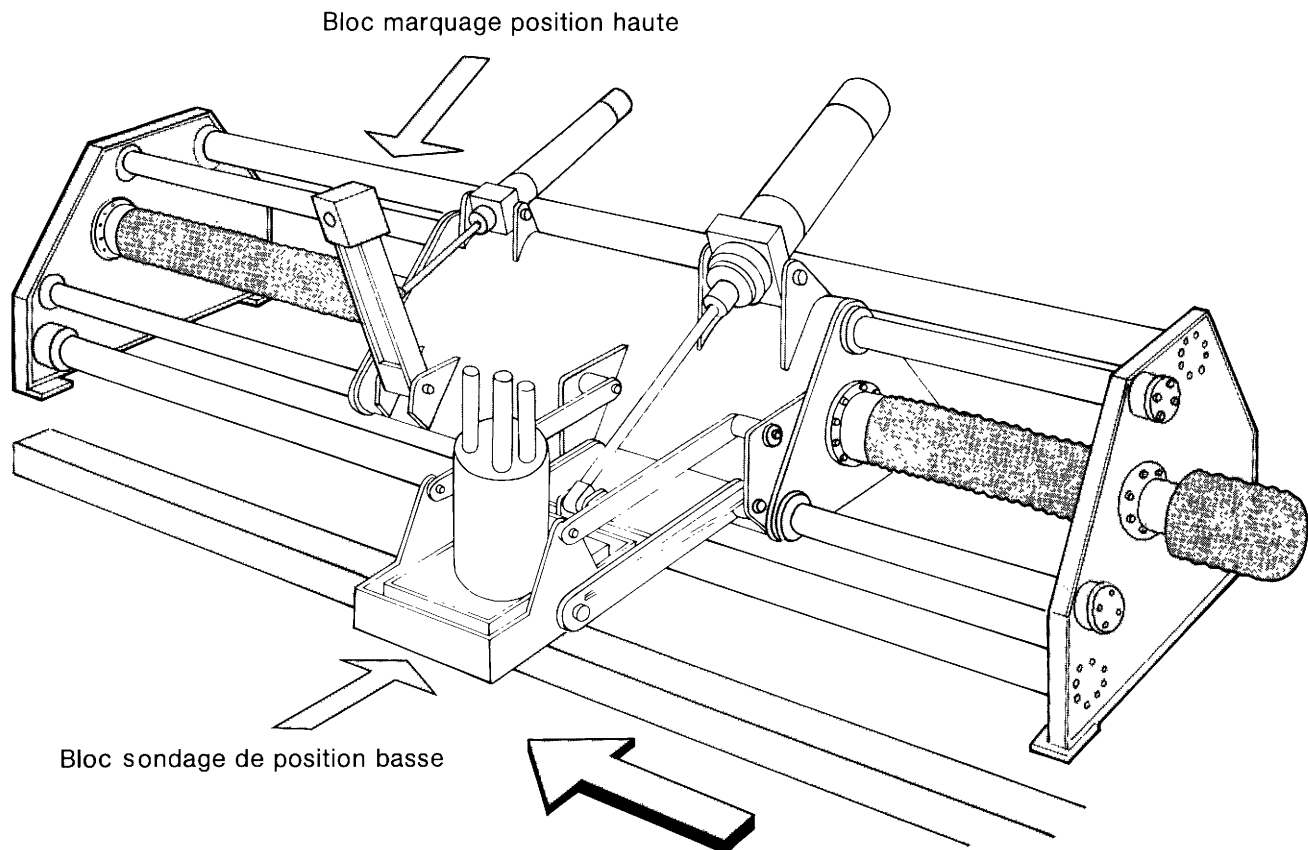


Figure 56: Schéma de principe de l'installation industrielle de sondage à chaud des billettes

retassure dans les brames chaudes après écriquage à chaud. L'aménagement de cette installation au-dessus du train de rouleaux est représenté par la *figure 57*.

L'expansion du procédé de la coulée continue a déplacé les objectifs poursuivis par de tels procédés de contrôle à chaud: à l'heure actuelle, on recherche les possibilités de leur utilisation pour déceler les criques internes dans les produits chauds de coulée continue.

Contrôle à chaud des barres rondes

Dans une recherche menée par les Round Oak Steel Works, en collaboration avec Tube Investments, on a développé jusqu'à maturité industrielle un nouveau procédé de couplage: l'activation électromagnétique des ultrasons (EMA). La *figure 58* représente le mode d'action de ce procédé: l'action conjuguée d'un champ magnétique et de courants de Foucault crée dans le matériau à contrôler des ondes ultrasonores transmissibles; il n'est pas nécessaire d'employer un liquide de couplage. La *figure 59* montre l'agencement de la tête de sondage.

Des barres rondes de 160 mm de diamètre destinées à la fabrication de tubes ont pu être sondées avec succès pour leurs défauts internes dans une installation pilote à des températures de 400 à 500 °C. Il semble possible d'étendre le domaine d'application du procédé jusqu'à 700 °C. En outre, il existe de bonnes perspectives de pouvoir utiliser également cette méthode de contrôle pour la détection des défauts de surface à de hautes températures.

La poursuite du développement de nouvelles techniques de détection des défauts internes et aussi des défauts de surface sur la base du principe de l'EMA fait d'excellents progrès. Des fabricants d'installations industrielles ont obtenu des licences.

Évaluation des structures

Les travaux de recherche commencés au début des années 70, encouragés à la fois par la CECA et par les instances nationales et exécutés par l'Institut pour le contrôle non destructif de Sarrebruck, ont montré la possibilité d'un examen non destructif des structures des aciers au moyen de mesures de la

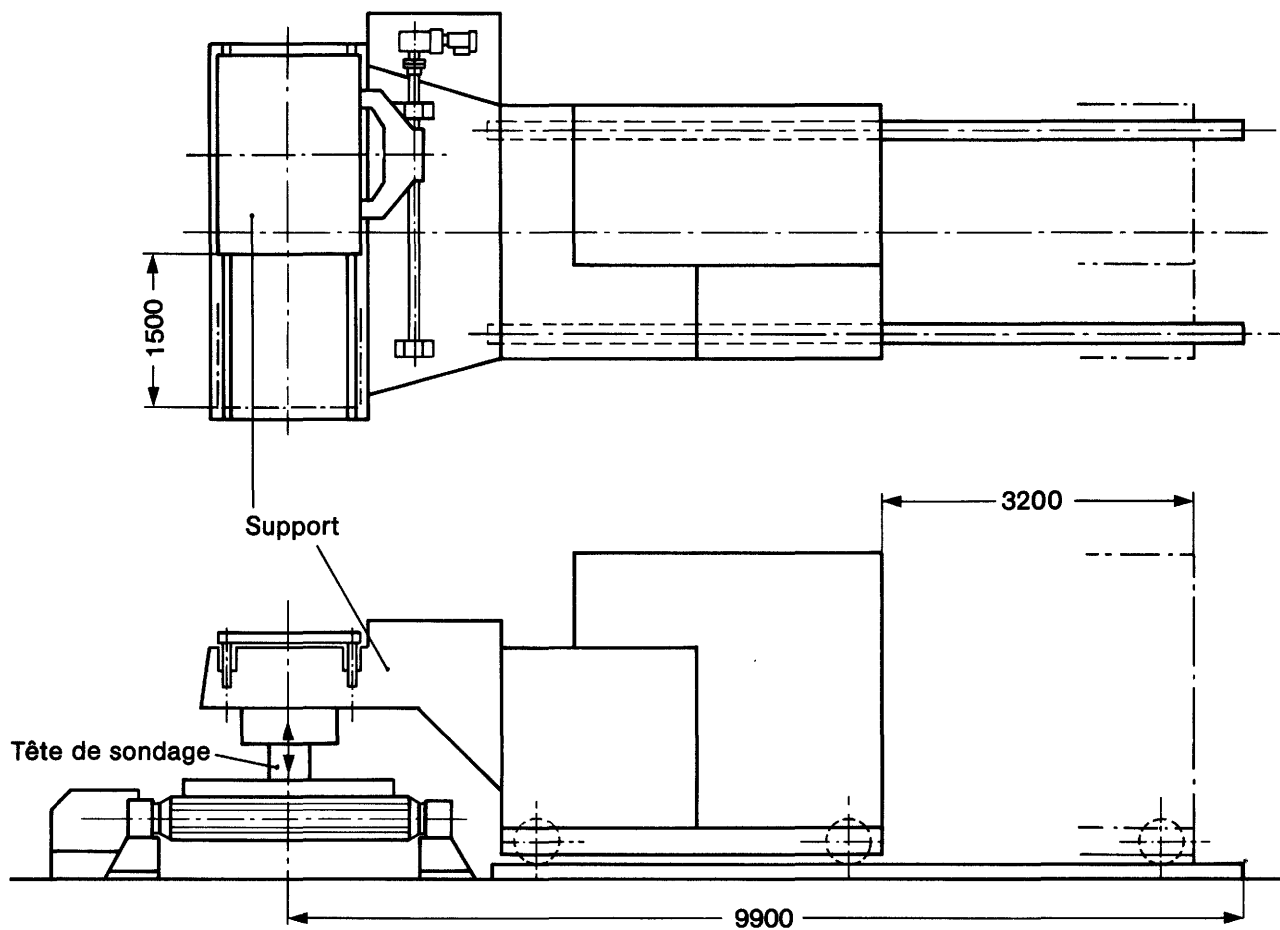


Figure 57: Installation de contrôle par ultrasons de brames chaudes (HOOGOEVENS)

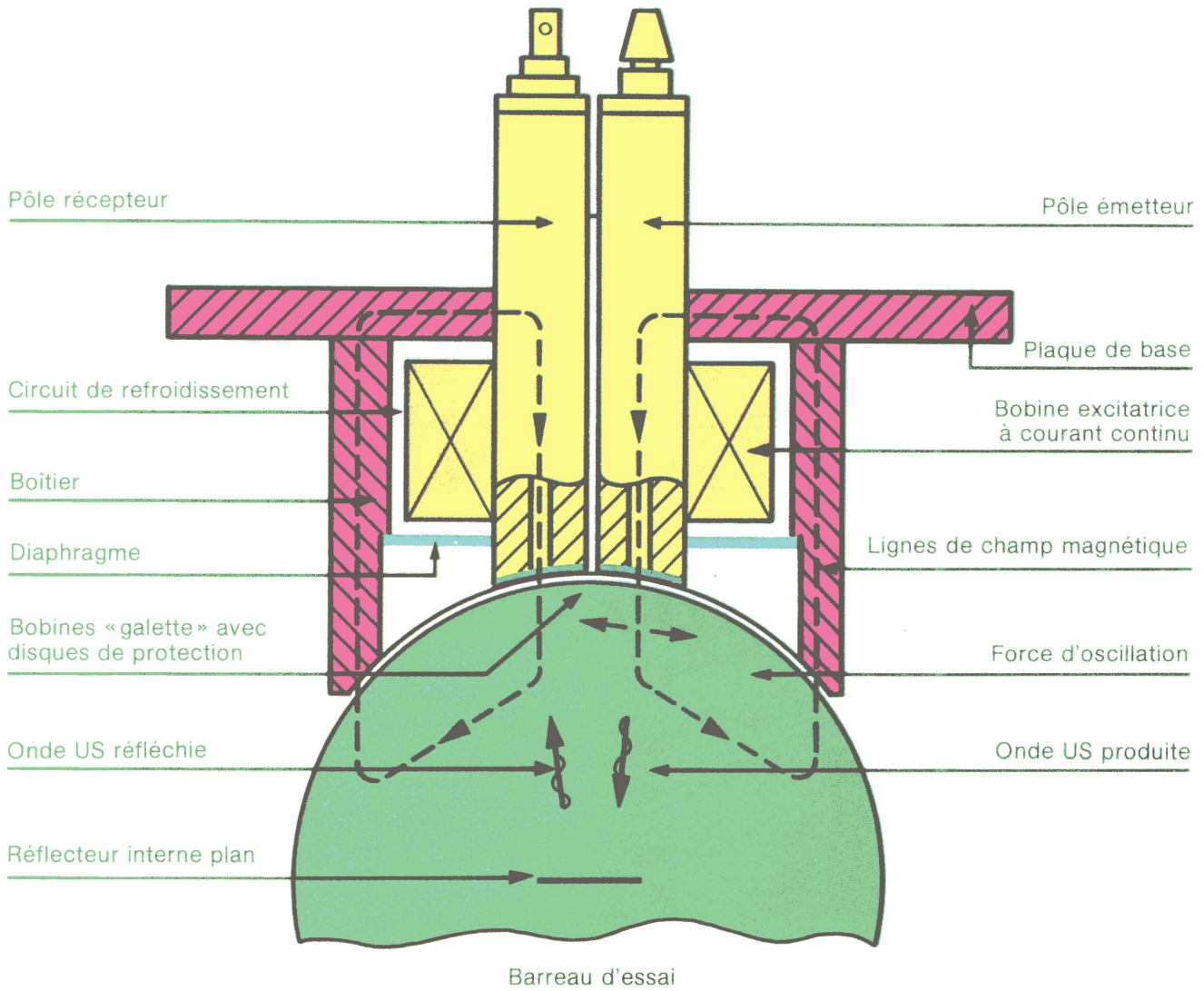


Figure 58: Mode de fonctionnement du procédé de sondage électromagnéto-acoustique

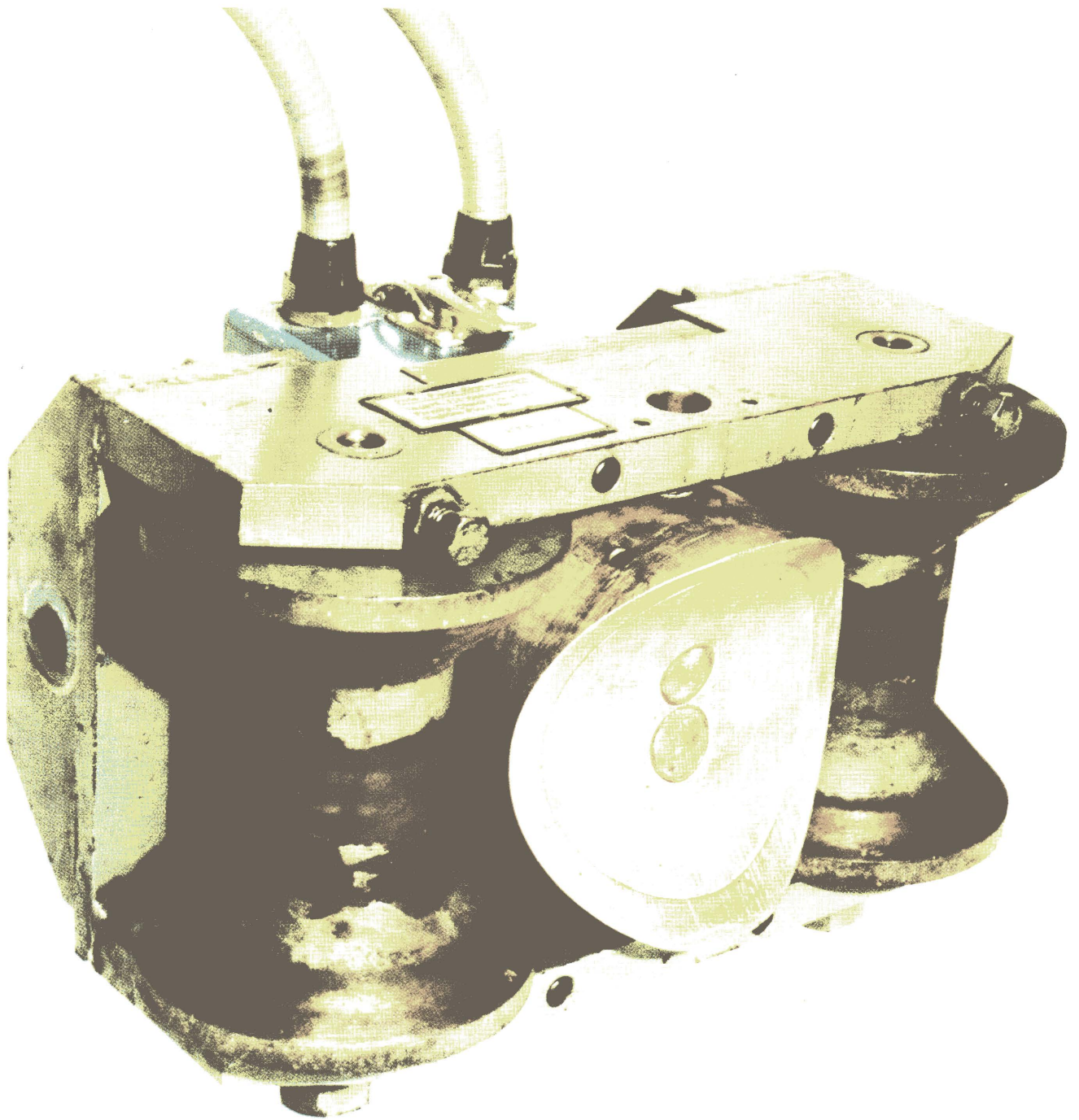


Figure 59: Tête de sondage industrielle EMA

rétrodiffusion des ultrasons (absorption différentielle). La poursuite de cette recherche a conduit au développement et à la construction d'un appareil orienté vers la pratique pour la détermination de la grosseur du grain, selon le procédé dit de la double fréquence, ainsi que pour l'évaluation de l'homogénéité des aciers.

L'appareil prototype représenté par la *figure 60* montre un dispositif développé jusqu'à maturité, d'un coût de construction modique et d'application ultérieure possible pour la commande du processus de contrôle. Cet appareil est actuellement à l'épreuve dans différentes aciéries.

Au contraire de la métallographie, la mesure de la rétrodiffusion ultrasonore permet une rapide analyse des structures à des endroits choisis, avec la plupart du temps une préparation insignifiante de la surface. Cette méthode n'est pas limitée à la surface, mais elle peut également donner une appréciation différentielle sur la structure interne d'éléments à parois épaisses.



Figure 60: Appareil de contrôle non destructif de l'état de structure par des mesures ultrasonores basées sur les phénomènes d'absorption préférentielle

Méthodes de sondage électromagnétique

Les méthodes de contrôle par courants de Foucault conviennent pour la détection des défauts de surface sur les demi-produits et les produits finis. La poursuite du développement de ces techniques de contrôle, en particulier en vue de leur incorporation dans les lignes de fabrication, a été réalisée systématiquement par la CECA au moyen des encouragements accordés à des recherches spécifiques. Quelques exemples pourront illustrer cette action.

Contrôle des demi-produits

Le développement de systèmes d'écricquage automatisés et commandés directement par le dispositif de contrôle a constitué un objectif d'un grand intérêt économique, en particulier pour les demi-produits, les billettes. La SA Thyssen-Niederrhein a conçu et mis à l'épreuve un dispositif pilote qui détecte automatiquement les défauts de surface des billettes carrées, au moyen d'un procédé magnétographique à sensibilité réglable; les défauts sont soit éliminés par des brûleurs à plasma, soit repérés par une peinture selon leur profondeur et la situation du demi-produit dans la ligne de fabrication. La billette est bloquée sur un établi-manipulateur et mise en mouvement avec celui-ci, dans le sens longitudinal, pour passer sous la tête de sondage et sous la traverse d'écricquage. Chacune des faces se présente au-dessus, est contrôlée et écriquée à tour de rôle. Le brûleur à plasma peut être disposé en travers, au-dessus de la surface de la billette et être enclenché ou déclenché avec précision.

Pour obtenir une sensibilité régulière de contrôle sur toutes les faces de la billette, on a installé un dispositif, spécialement conçu, de magnétisation à impulsions. Les signaux de contrôle sont classés, digitalisés; la position des défauts dans les deux sens longitudinal et transversal est déterminée et transmise en parallèle à un ordinateur de processus pour son exploitation consécutive. Le calculateur du processus transforme les informations du contrôle en ordres pour l'écricquage, met ces derniers en mémoire jusqu'au moment où l'endroit où se trouve le défaut dans la billette arrive au droit du brûleur à plasma ou du dispositif de marquage à la peinture. La *figure 61* donne une vue en plan de l'installation pilote. Ce système de contrôle possède une limite de détection de 0,2 mm. Toutes les nuances d'acier qui ont été essayées ont pu être, sans difficultés, contrôlées et écriquées. L'expérience acquise a été utilisée dans des installations industrielles qui ont fonctionné rentablement. Elle est par ailleurs utilisable aussi pour la conception et la marche d'installations plus modestes, dans lesquelles les informations provenant du contrôle et mises en mémoire, agissent sur des machines à meuler à commande par ordinateur.

Contrôle du fil

Des études fondamentales sur la physique du contrôle par courants de Foucault ont été menées par l'Irsid pendant plusieurs années. Les travaux ont abouti au développement de systèmes multifréquentiels. La *figure 62* montre schématiquement la construction d'un tel système de contrôle sans contact, lequel peut être mis en service à des températures élevées et pour de grandes vitesses du fil.

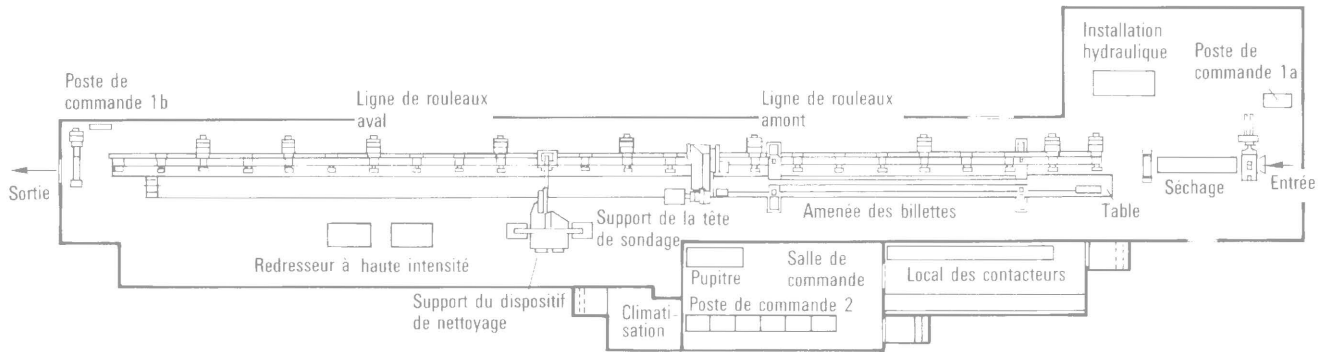


Figure 61: Vue schématique de l'installation pilote pour le contrôle et le nettoyage des billettes

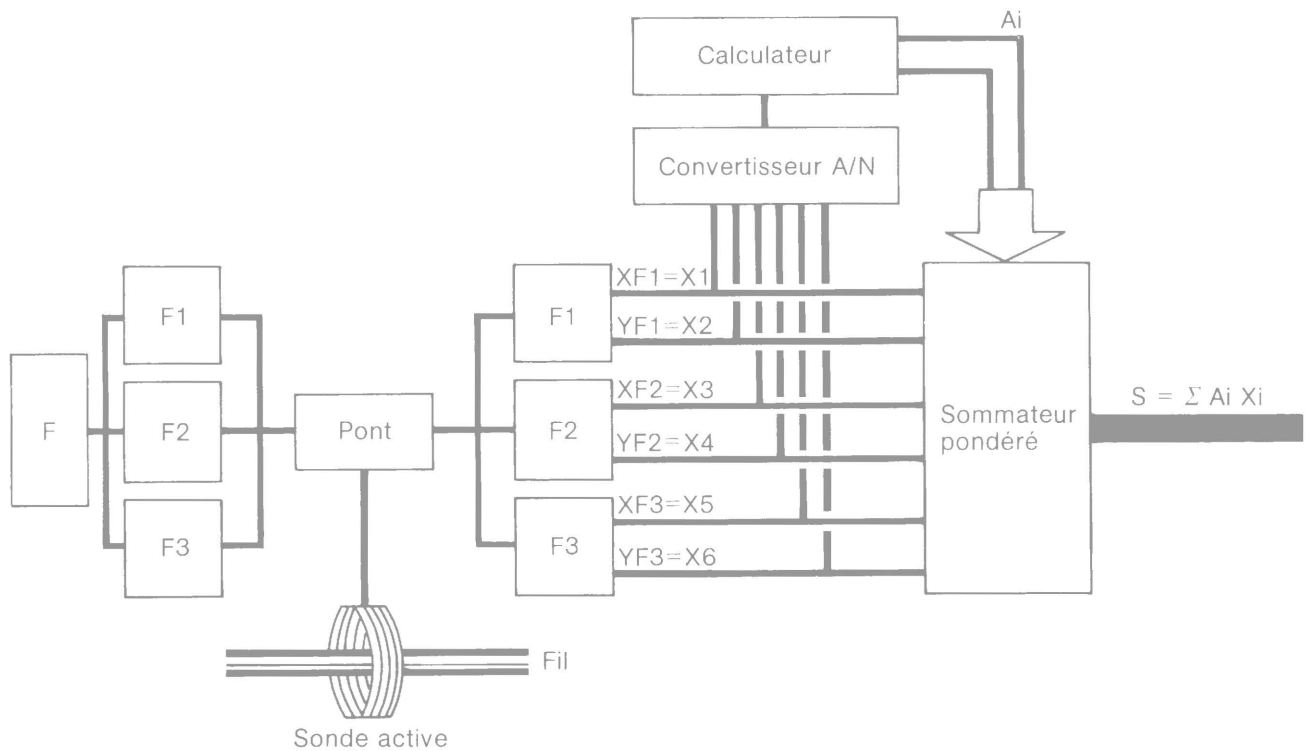


Figure 62: Schéma de principe de la structure d'un système multifréquence de contrôle des fils

Après achèvement des programmes CECA, les connaissances acquises ont pu être valorisées dans des installations industrielles. Une installation de contrôle des rails travaillant selon le principe de la multifréquence est en service chez Sacilor; sur le train à fil de l'usine de Rombas, on a mis en service une installation de contrôle à chaud. Même, si pour cette installation, il a fallu revenir à une marche monofréquentielle, cependant, sur la base des travaux de recherche précédemment exécutés, l'exploitation des données déduites des valeurs mesurées a fait d'importants progrès par rapport aux systèmes jusqu'ici employés.

Contrôle des rails

L'objectif d'un autre projet de recherches est constitué par le contrôle industriel des rails sortant du laminoir, pour les défauts de surface et les tolérances dimensionnelles; dans ce but, on a utilisé un procédé basé sur les courants de Foucault pour reconnaître les défauts de surface. Dans une étude très étendue du VDEh, avec la participation des usines des SA Thyssen, Kloeckner et Krupp Stahl, on contrôle à l'heure actuelle des sections types de rails, selon le procédé du flux magnétique de fuite et le procédé par courants de Foucault, afin d'arri-

ver à une comparaison de ces deux procédés automatiques importants pour le contrôle final des rails.

Pour le contrôle des tolérances dimensionnelles, on développe un nouveau procédé de mesure basé sur les techniques des lasers.

Méthodes de mesures optiques

Les procédés optiques sont particulièrement bien appropriés pour le contrôle sans contact des dimensions des objets en mouvement. Dans ce domaine, le développement des techniques des lasers a apporté, pendant les dernières années, des impulsions décisives. Pour le contrôle de la forme et le respect des tolérances dimensionnelles dans les laminoirs, cette nouvelle technique offre un champ d'application riche de promesses.

Dans le cadre des objectifs pour introduire dans les laminoirs des systèmes automatiques de contrôle, la CECA a encouragé un programme de recherches du CRM à Liège pour le développement de systèmes de mesure destinés à vérifier la planéité des larges bandes laminées à chaud. Des procédés semblables doivent être essayés en site industriel pour la mesure de la largeur des ailes des profilés pendant le laminage à chaud.

Planéité des bandes à chaud

Le procédé de contrôle doit permettre d'assurer la planéité de la bande à chaud à sa sortie du train finisseur. Dans ce domaine, un système de mesure opérant suivant le principe de la triangulation optique et développé par le CRM par application des lasers est apparu lourd de promesses. Le but de la recherche était la transposition du procédé dans la pratique industrielle des laminoirs. La poussière, les hautes températures, les vibrations et les grandes vitesses de bandes ont constitué alors des conditions de travail difficilement maîtrisables.

Le principe de la mesure est représenté par la *figure 63*. Trois lasers à l'hélium-néon éclairent ponctuellement la bande dans sa partie centrale et au voisinage des deux rives. La position des points lumineux obtenus est mesurée à l'aide de trois caméras à réseau de photo-diodes. Un ordinateur exploite les valeurs mesurées et détermine la longueur réelle de la bande au centre et en rives. Les valeurs des allongements relatifs sont affichées toutes les deux secondes sur un écran.

Ce système a été installé sur le train à larges bandes de Sidmar à Gand et testé industriellement. Dans une longue série d'essais, on a pu obtenir des résultats de mesure, éprouvés en service et bien reproductibles; ceux-ci ont constitué un progrès par rapport à l'observation visuelle de l'état

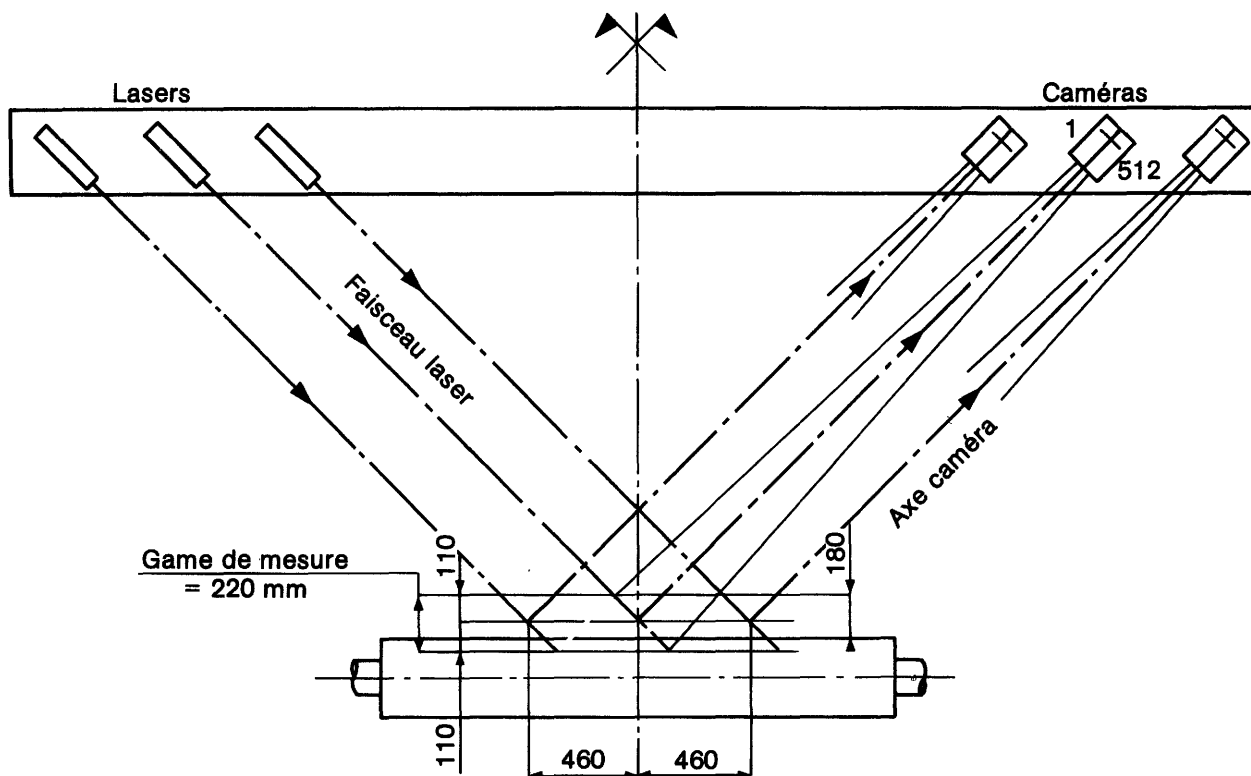


Figure 63: Schéma optique de la jauge de planéité

de la bande, en vue du réglage du train finisseur et de la planéité de la bande à chaud. Très rapidement, les signaux de mesure ont été utilisés par le personnel de conduite pour apporter les corrections de réglage nécessaires très peu de temps après la sortie de la cage finisseuse de la tête de bande. La *figure 64* explique un tel processus. L'indice de planéité R_o , calculé à partir des différences des longueurs mesurées entre le milieu de la bande et ses rives a pu être, dans de nombreux cas, diminué après quelques secondes par une intervention dans le réglage.

temps utile pendant le laminage, d'améliorer le respect des dimensions exigées des profilés, d'éviter les défauts de forme et par là de diminuer les tolérances de laminage. C'est ainsi que la technique de mesure développée par le CRM a suscité un grand intérêt pour son emploi à la mesure de la largeur des semelles dans un laminoir à poutrelles. Les essais ont été exécutés sur le train à poutrelles à larges ailes de l'usine de Differdange de l'Arbed, Luxembourg. La *figure 65* montre la disposition utilisée pour les mesures. Après différents essais, on a utilisé, dans le cas présent, comme source lumi-

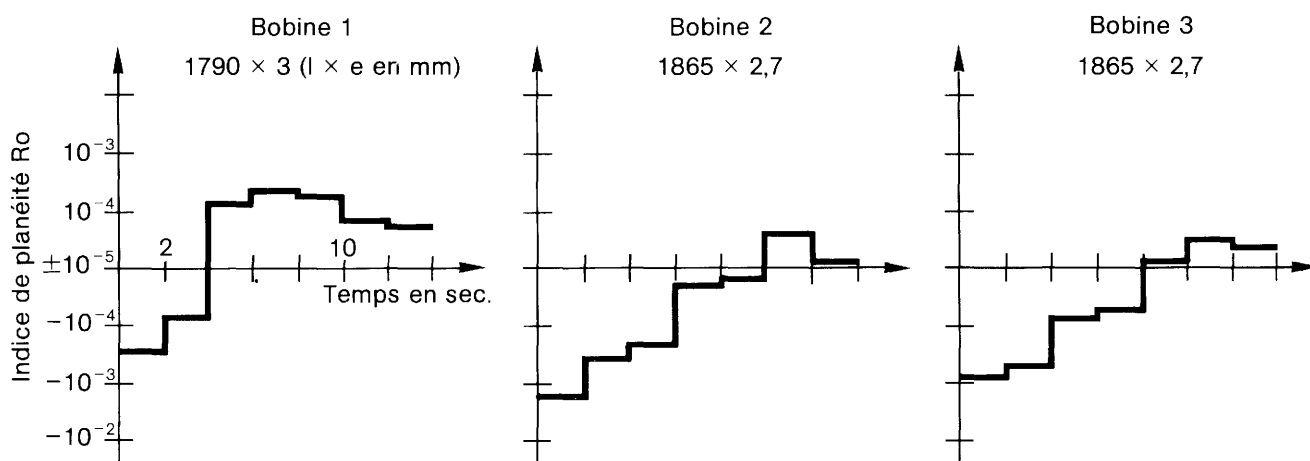


Figure 64: Évolution de l'indice de planéité R_o après entrée de la tête de la bande dans la jauge de planéité

Après l'achèvement de la recherche CECA, le procédé de mesure a été encore largement amélioré. Ceci afin de réaliser en particulier une meilleure adaptabilité aux différentes largeurs de bande. Le nouvel appareillage de mesure, remanié en totalité, possède maintenant cinq systèmes de triangulation. L'un d'eux est installé à poste fixe au milieu de la bande, les quatre autres peuvent être rapidement adaptés à chaque largeur de bande qui se présente, deux d'entre eux sont placés alors à une distance de 5 cm des deux rives de la bande, et les deux restants occupent des positions intermédiaires.

Des usines sidérurgiques européennes et hors d'Europe portent un grand intérêt à l'utilisation de ce nouveau système de contrôle.

Largeur des semelles des poutrelles

La mesure sans contact de certaines dimensions des poutrelles pendant leur laminage à chaud offre la possibilité, au moyen d'interventions réalisées en

neuse une série de 37 émetteurs à vapeur d'iode. Un aménagement adéquat spécifique a été nécessaire pour adapter le système de triangulation à chacune des largeurs d'aile nominales. Pour les différentes séries de poutrelles, cette largeur varie entre 160 et 500 mm; la hauteur nominale du profil peut également se situer entre 160 et 1 100 mm. Le problème a été résolu par la mise en place motorisée du miroir M1 et des objectifs.

Les mesures industrielles ont apporté de bons résultats. La *figure 66* montre le déroulement d'une mesure de largeur de semelle. Les valeurs moyennes sur toute la longueur de la poutrelle sont calculées et affichées. En principe, on a la possibilité d'étendre ce système à la mesure des excentricités d'âme des poutrelles.

Entre-temps, le procédé de mesure a continué à être développé. En particulier, il convenait d'éliminer une quelconque influence de la position ou des vibrations de la poutrelle en cours de laminage sur les résultats des mesures. Ces dernières ont été utilisées pour le réglage des cages.

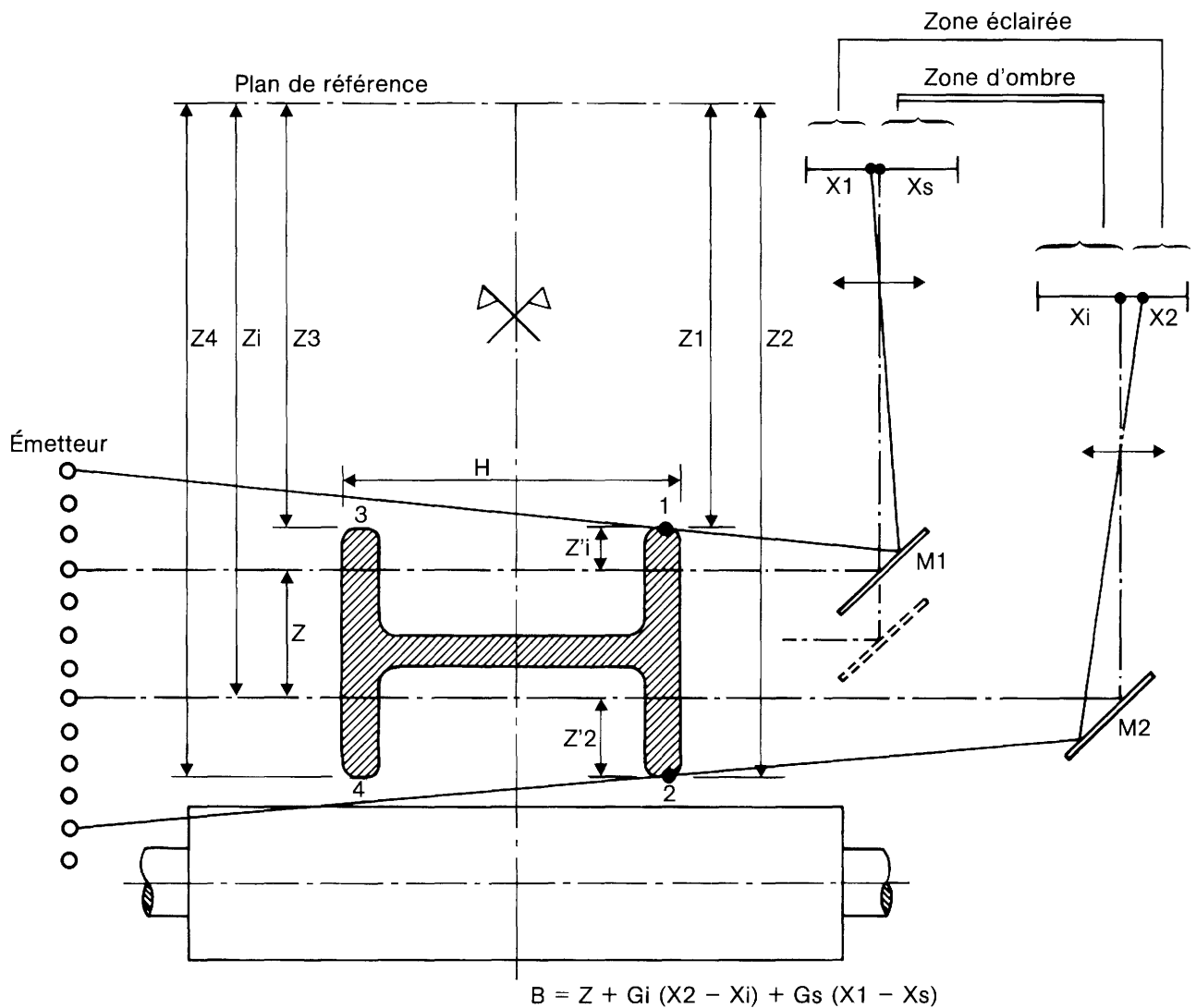


Figure 65: Disposition des composants de mesure de largeur

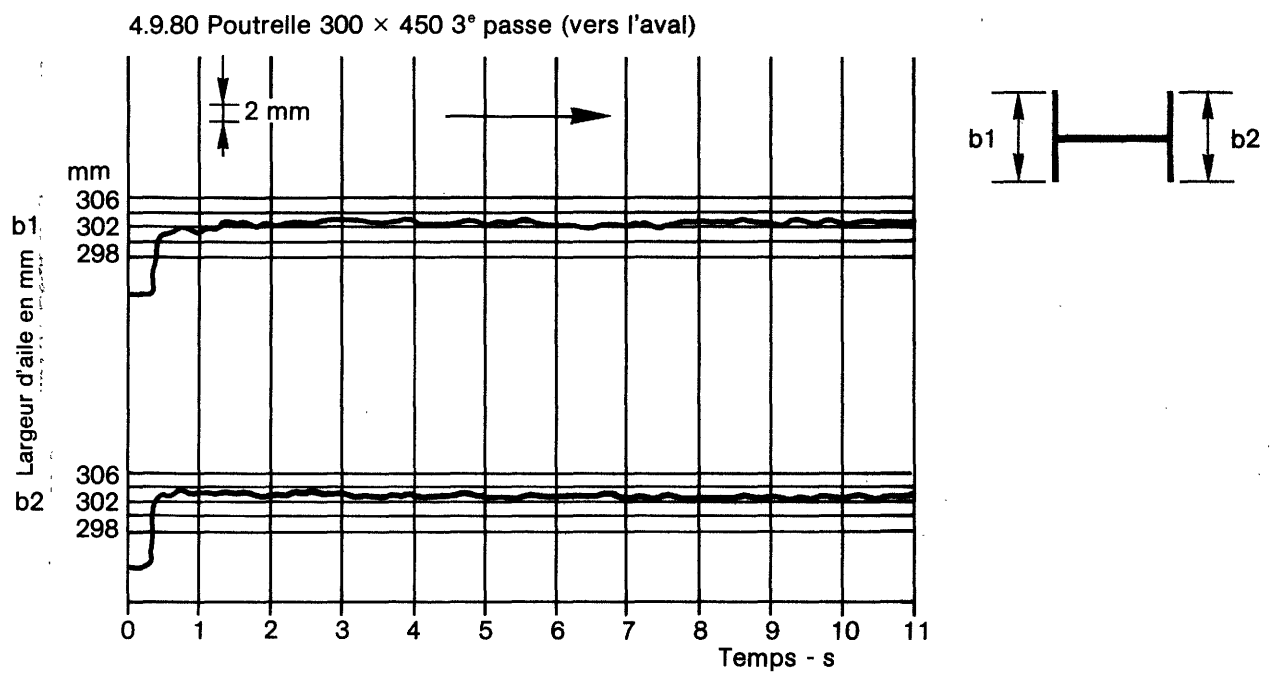


Figure 66: Évaluation, en fonction du temps, de la largeur d'une poutrelle

Contrôle de l'état de surface des bandes laminées à froid

Le contrôle à vue des qualités de surface est normalement exécuté avec une vitesse de défilement de la bande d'environ 1,5 m/s. Des contrôleurs expérimentés montrent une extraordinaire faculté pour reconnaître les nombreuses sortes de défauts, tels que griffes, rayures, marques du refoulement, incrustations de lubrifiant, etc. et pour apprécier leur acceptabilité pour l'une ou l'autre utilisation ultérieure de la bande. Mais cette fonction est fatigante, elle devient impraticable pour des vitesses dépassant 3 m/s.

La concurrence des produits d'importation en provenance des pays hors d'Europe et les exigences croissantes à l'encontre des propriétés de surface avancées par les utilisateurs d'acier ont renforcé la promotion d'appareils de contrôle de la surface travaillant automatiquement et pour de grandes vitesses de bande. C'était une raison suffisante pour la CECA de mettre sur pied un projet de recherches coordonné et rassemblant les connaissances spécialisées des entreprises européennes, afin d'arriver, dans des délais les plus brefs possible, à des systèmes de contrôle applicables industriellement.

Procédé de contrôle

Pour la détection des défauts de surface sur les bandes laminées à froid, ce sont les méthodes optiques qui offrent les plus grandes chances de succès. La grandeur de mesure utilisée réside fondamentalement dans les propriétés réfléchissantes différentes entre les défauts et la surface exempte de défauts. Tout comme pour le contrôle dimensionnel des produits de laminage, la technique des lasers a aussi, dans ce cas, apporté son aide aux procédés optiques par d'intéressantes nouveautés technologiques.

Les programmes de recherche commencés depuis 1974 et actuellement en voie d'achèvement ont été exécutés par la SA Hoogovens-IJmuiden, l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh et la BSC. Chez Hoogovens, on a développé et mis en service sur une cage skin-pass une méthode de contrôle travaillant avec une source lumineuse linéaire et une caméra à lignes de diodes. Les travaux de recherche de la BSC et du BFI concernent les systèmes de balayage par lasers. La génération des appareils de cette technique, disponibles au début des travaux, n'a fait preuve que d'une capacité insuffisante de détection des défauts. A partir de 1976, la BSC, en collaboration avec l'Institut SIRA a optimisé le système de l'appareil de projection de laser et a développé une nouvelle concep-

tion pour le récepteur. La *figure 67* explique schématiquement le mode d'action de cet appareil. La surface est explorée par des rayons produits par un laser à hélium-néon et mis en condition de balayage par un miroir tournant. Un autre système de miroirs réfléchit les rayons sur la ligne à explorer et les focalise en même temps sur trois photo-multiplicateurs disposés suivant différentes positions angulaires par rapport à la source lumineuse.

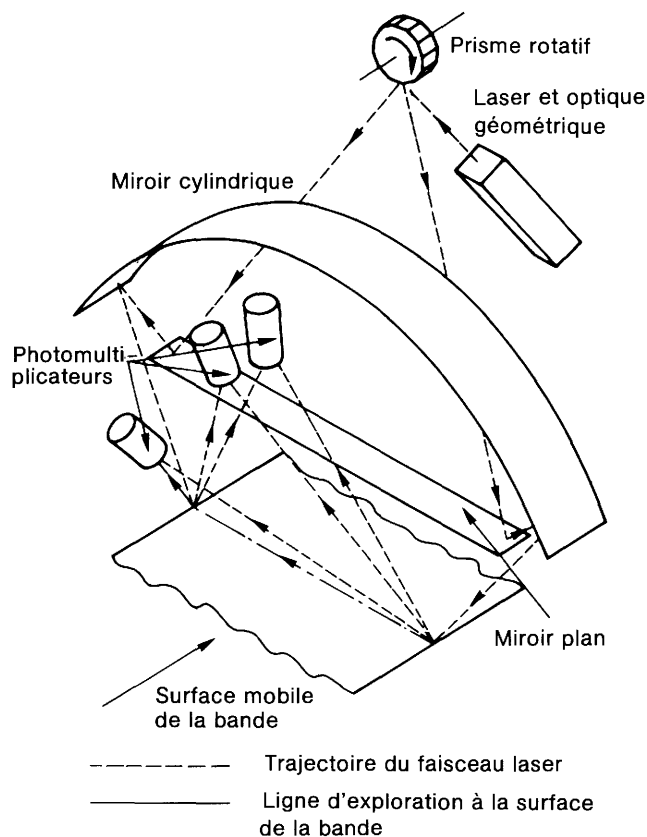


Figure 67: Schéma optique de l'appareil recommandé pour le contrôle de l'état de surface de bandes

Exploitation des signaux

Ici aussi, on a fait des progrès significatifs. L'appareil, optimisé par la recherche de la BSC, permet l'exploitation du signal reçu par chaque photorécepteur, au moyen d'un filtre électronique spécialement conçu, de telle façon qu'on obtient un rapport optimal entre le signal du défaut et le fond de la bande. Par comparaison avec les balayages suivants, les sources des signaux parasites qui n'ont rien à voir avec les défauts sont éliminés.

L'exploitation consécutive des signaux et l'identification des défauts ont pu être mises au point en collaboration avec l'Université de la Cité de Londres, grâce à la création de systèmes basés sur une série de dépouillements aboutissant à la détermination de la nature des défauts et à leur répartition en différentes classes :

— par la définition de la forme et de la grandeur du défaut;

- par les informations optiques issues de l'amplitude des signaux;
- par la différence de réflectance reçue par les trois photo-récepteurs.

Surveillance des installations sidérurgiques

La *figure 68* montre le schéma de principe du traitement des signaux.

Les travaux de recherche du BFI concernent en grande partie le développement de systèmes d'exploitation des valeurs mesurées qui puissent recevoir une application pour un grand nombre d'appareils de balayage optique. L'électronique du dépouillement des données se compose de groupes de blocs logiques, en partie déjà connus et en partie nouveaux, en particulier pour le filtrage

Parmi les mesures extrêmement différenciées prises pour abaisser les dépenses d'entretien, la surveillance des installations de production dans les usines sidérurgiques prend de plus en plus d'importance. Pendant que, d'un côté, on s'efforce d'augmenter les durées de service des différentes parties des installations par des améliorations dans leur construction et par un choix optimum des matériaux constitutifs mis en œuvre, il est nécessaire en même temps d'éviter par ailleurs des perturbations graves au moyen d'avertissements en temps opportun. Ce n'est que de cette façon que l'on rend possibles un entretien programmé et un abaissement des temps d'arrêt si onéreux.

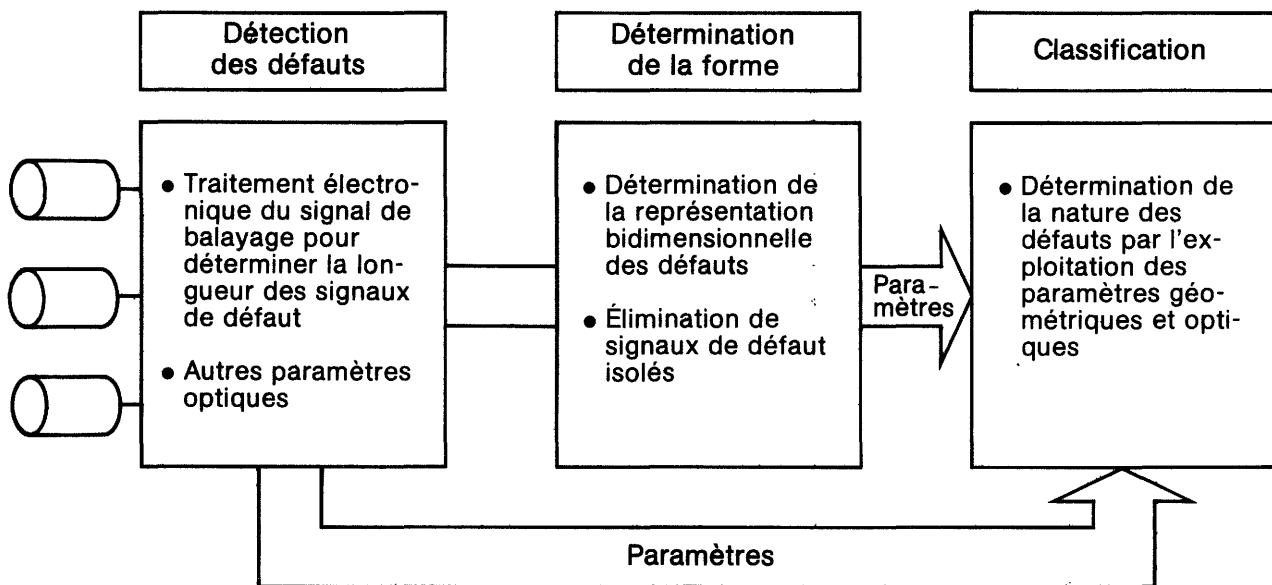


Figure 68: Schéma de fonctionnement simplifié du traitement des signaux.

électronique des valeurs de mesure. Une représentation des défauts, commandée par micro-processeur et affichée sur un moniteur TV, a été en outre développée.

Dans la recherche CECA sur ce thème, on a choisi, à titre d'exemple, le développement de systèmes de surveillance pour détecter à temps les détériorations des roulements.

Utilisation industrielle

Des essais effectués sur plusieurs laminoirs à froid promettent des espoirs de succès industriels. Les nouveaux systèmes ont été de la même façon testés avec succès sur une ligne d'étamage. La recherche a abouti au développement d'installations de contrôle de la surface, qui ont de fortes chances de pouvoir être intégrées dans les lignes de fabrication avec tous les avantages que cela comporte.

Méthode Kurtosis pour la détection des détériorations des roulements

Une recherche exécutée par la BSC, en collaboration avec l'Institut de recherches sur les bruits et vibrations (ISVR), a été axée sur la mesure de l'état des roulements dans des machines à marche lente, typiques de l'industrie sidérurgique. Des mesures très étendues de vibrations sur des roulements de différents types dans les conditions du laboratoire

et du service industriel ont abouti à des données de base pour l'exploitation de la distribution des valeurs mesurées.

Dans ce cadre, la méthode Kurtosis est apparue comme la plus appropriée. Cette méthode définit un paramètre statistique qui est dérivé de la forme de la répartition statistique des amplitudes des vibrations. La *figure 69* explique cette méthode: alors que des roulements sans détériorations présentent la courbe normale de distribution de Gauss, les roulements détériorés montrent des écarts par rapport à la distribution normale, écarts qui permettent de calculer l'indice Kurtosis. Pour une valeur de cet indice supérieur à 3, des détériorations sont présentes dans les roulements.

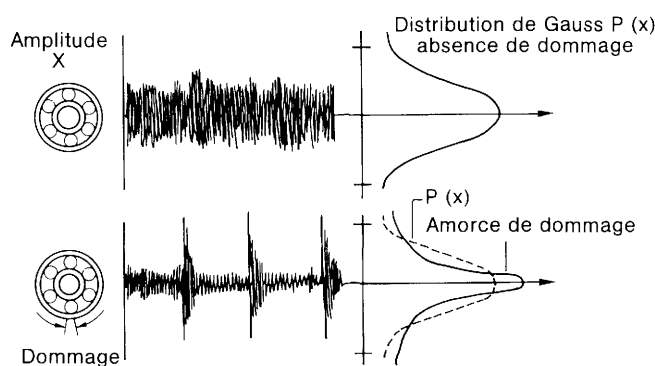


Figure 69: Vibrations des engrenages et leur distribution probable

Ce cette manière, on possède un diagnostic possible sur les détériorations des roulements sans que l'on ait besoin de recourir, en même temps aux fins de comparaison, à des mesures de référence sur des roulements non endommagés. Cependant, pour quelques machines, on trouve également des valeurs élevées de l'indice Kurtosis pour un état impeccable des roulements. Malgré tout, dans ce cas, la comparaison entre les courbes enveloppes des spectres des vibrations produites pour différents nombres de tours permet de déduire certaines valeurs types qui sont à attribuer à des détériorations des roulements.

Appareil transportable de mesure Kurtosis

A la suite de très longs travaux de développement, on a pu construire un appareil de mesure basé sur la technique des micro-processeurs et qui exauce tous les espoirs formulés pour un maniement facile dans l'industrie. Comparativement aux prototypes précédents, la mise en place, le calibrage et le réa-

justage de cet appareil s'opèrent automatiquement. Le système peut être perfectionné. Plusieurs appareils de mesure Kurtosis peuvent être commandés par un ordinateur de surveillance qui leur est superposé.

Techniques d'analyse

La transition vers la commande automatisée des processus métallurgiques exige des contrôles beaucoup plus rapides et plus nombreux de la composition des matières premières, des produits intermédiaires et des produits finis. Dans de nombreux cas, les données résultant des analyses sont introduites automatiquement dans les systèmes de commande des processus. Seuls des procédés d'analyse physique, rapides et de fonctionnement garanti, tels qu'ils ont déjà largement trouvé accès dans l'industrie sidérurgique, permettent de suivre cette tendance.

Cela signifie pour les laboratoires de la sidérurgie l'obligation de satisfaire à des exigences croissantes sans coûts exorbitants. Les prises d'échantillons et les techniques d'analyse sont mises à contribution de la même façon. Quelques exemples pris dans le cadre de la promotion de la recherche par la CECA doivent illustrer le travail accompli.

Prise d'échantillons dans l'acier liquide

La prise manuelle d'échantillons à l'intérieur du convertisseur soumet les opérateurs à un fort dégagement de chaleur. Par ailleurs, en raison des profondeurs forcément variables de la louche, les prélèvements ne sont pas comparables entre eux.

Un travail de recherche encouragé par la CECA et exécuté par le CRM de Liège a conduit au développement d'un appareillage mobile avec lequel il est possible de prélever automatiquement des échantillons d'acier liquide et en même temps d'effectuer des mesures de température et d'activité de l'oxygène. La profondeur d'immersion est maintenue constante et égale à une valeur fixée à l'avance et indépendante de l'épaisseur de la couche de scorie. L'utilisation de l'appareil, représenté dans la *figure 70*, conduit à des durées de prises d'échantillons plus courtes, à une amélioration de la qualité des éprouvettes et des mesures et à de moindres fatigue et dangers d'accident pour le personnel de plancher. Dans les aciéries de la seule Communauté européenne, il y a jusqu'ici 18 de ces appareils en service industriel.

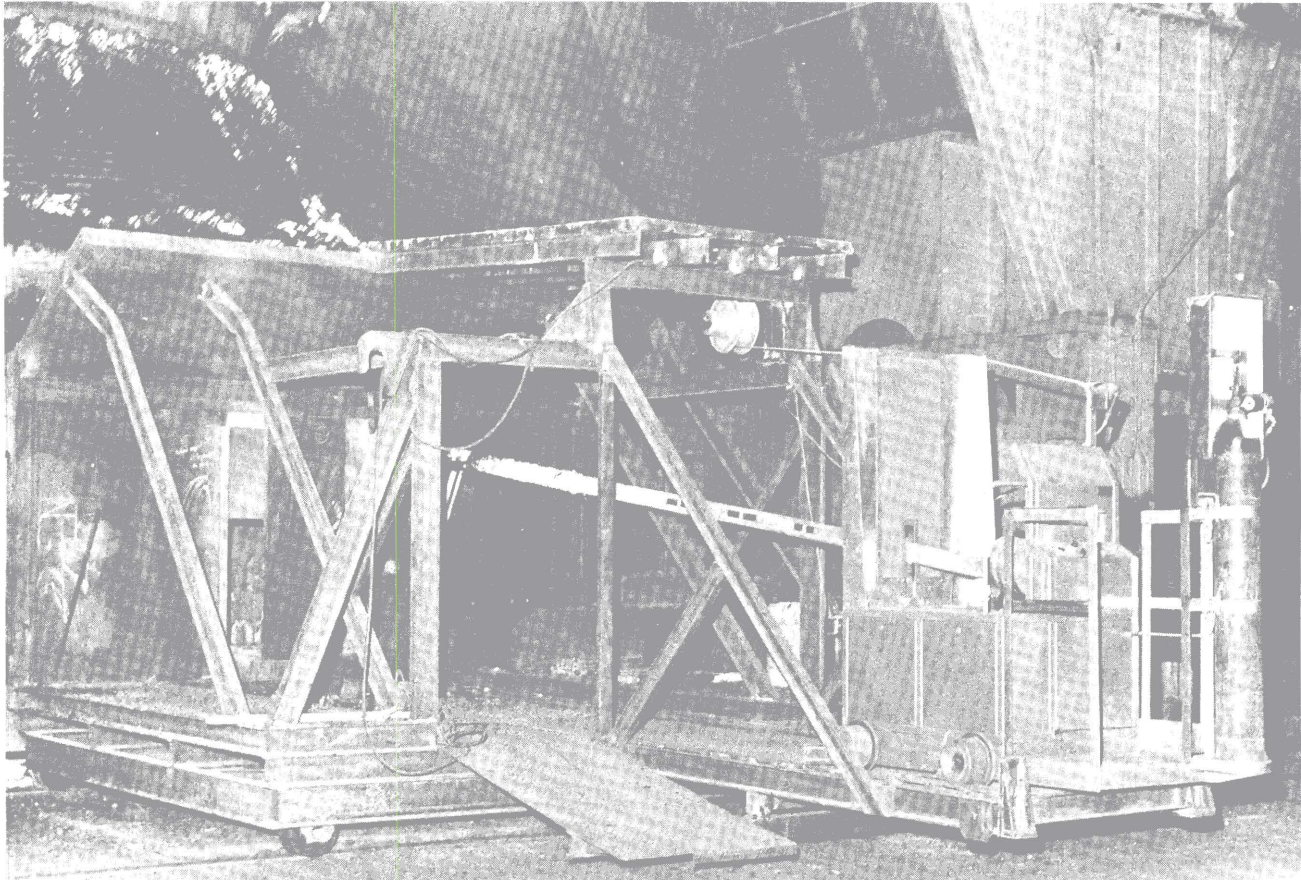


Figure 70: Appareil de prélèvement automatique d'échantillons d'acier liquide dans le convertisseur

Spectromètre mobile

La prise d'échantillons et l'analyse quantitative des demi-produits et des produits finis en acier aux fins de contrôle sont, avec les méthodes conventionnelles, des opérations de longue haleine. Dans un programme CECA, Thyssen-Recherche à Duisburg a développé une méthode qui supprime le prélèvement de copeaux ou de coupons. Sur la surface polie de la pièce à analyser, on enlève, à l'aide d'un arc électrique à courant continu, une petite quantité de matière, laquelle est transportée sous forme d'aérosol dans un courant d'argon, à travers une tuyauterie, vers un spectromètre d'émission optique. Dans ce dernier, se produit l'excitation dans une unité à arc capillaire accouplée à un spectromètre conventionnel. A la SA Thyssen, le système d'analyse est installé dans une sorte de conteneur monté sur un camion de 7,5 t. Les analyses peuvent être exécutées dans un rayon d'environ 10 m. Les résultats obtenus sont comparables à ceux de l'analyse en laboratoire de petites éprouvettes traitées sur un spectromètre d'émission avec excitation par étincelage. La *figure 71* montre l'installation de spectrométrie mobile.

Échantillons fondus pour l'analyse par fluorescence des rayons X

La rapidité et la fiabilité de la spectrométrie par fluorescence des rayons X, introduite amplement dans les laboratoires sidérurgiques, ne peuvent être

utilisées à plein effet que si la préparation des échantillons répond aux mêmes préoccupations. Ce n'était pas le cas jusqu'à présent. La CECA a, pour ce, encouragé des travaux de recherche de l'Irsid sur la préparation automatique d'échantillons fondus. La *figure 72* montre l'appareillage (appelé «perleuse» à commande entièrement automatique pour la fusion, la coulée et le refroidissement des échantillons. Grâce à une agitation permanente du bain pendant la fusion, on atteint une homogénéité remarquable des échantillons. En tout, on n'a besoin que de moins de 4 minutes pour confectionner les échantillons; pendant ce temps, l'appareillage fonctionne complètement en automatique. On peut ainsi diminuer de manière efficace les durées globales des analyses, y compris la préparation des échantillons des matériaux qui entrent ici en ligne de compte, tels que les minerais, les agglomérés, les laitiers, les produits réfractaires, etc. Cet avantage permet, dans beaucoup de cas, d'intervenir plus rapidement dans les processus de fabrication.

Des licences de fabrication de cet appareil ont été accordées. Celui-ci a trouvé rapidement son chemin dans les laboratoires: 60 appareils environ sont en service à l'heure actuelle.

Spectrométrie d'émission ICP

Dans le procédé ICP (= inductive coupled plasma), on utilise, pour l'analyse spectrométrique, comme



Figure 71: Spectromètre mobile pour l'analyse de contrôle de demi-produits et de produits finis

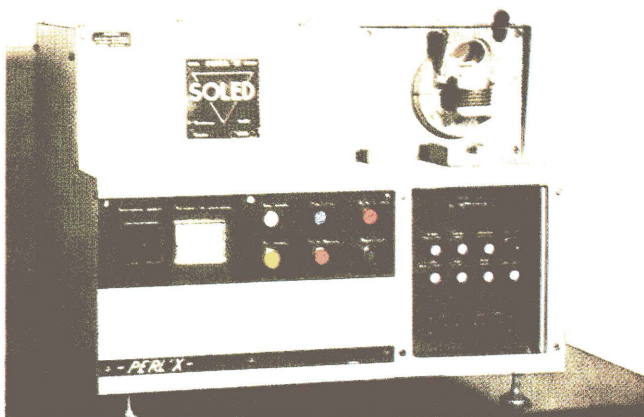


Figure 72: Appareil PERL-X: appareil de préparation d'échantillons fondus pour la spectrométrie par fluorescence de rayons X

source lumineuse, une flamme de plasma couplée par induction. La matière à analyser est amenée vers la flamme sous la forme d'un aérosol finement divisé en provenance d'une solution. Pour accélérer l'introduction dans les laboratoires sidérurgiques de cette intéressante méthode, relativement récente, on a mis en route une recherche communautaire coordonnée, à laquelle participent les laboratoires spécialisés de la BSC, de l'Institut de recherches Teesside, de la SA Estel, Usines de Dortmund, de l'Irsid à Maizières-lès-Metz et du CRM à Liège.

Pour les programmes partiels de la BSC et d'Estel, a été attribuée la tâche d'optimiser les différentes parties élémentaires du système, telles que le générateur haute fréquence, la torche à plasma, le

système de nébulisation et la préparation des solutions. Dans ce cadre, la BSC a entrepris la mise au point d'un générateur à plasma de haute énergie de 10 à 15kW. Dans les deux laboratoires, on a pu fixer les paramètres les plus favorables pour le fonctionnement du générateur, du gaz de refroidissement, du gaz plasmatique, de la technique d'injection et de la production des aérosols.

L'Irsid a entrepris d'établir les raies spectrales les mieux appropriées pour l'utilisation de la spectrométrie ICP sur les matières rencontrées en sidérurgie. Sur la base d'essais très nombreux, a été dressé un atlas des raies spectrales non perturbées par la matrice fer; ce document contient les raies utilisables dans la pratique pour 43 éléments.

Les travaux du CRM ont apporté de nouvelles méthodes pour l'analyse ICP de matières pulvérulentes non métalliques, comme les minerais de fer, les agglomérés, les laitiers, etc.

L'avance de l'Europe par rapport à l'Amérique et au Japon est, entre-temps, devenue indiscutable, en ce qui concerne les connaissances technologiques qui peuvent conduire à une meilleure utilisation de cette technique d'analyse.

Décharge lumineuse

Dans cette manière d'excitation pour le spectromètre d'émission optique, la surface de l'échantillon est enlevée couche par couche par bombardement à l'aide d'argon ionisé et analysée en rapport. Le CSM de Rome et l'Irsid à Saint-Germain-en-Laye ont étudié, dans un programme commun de recherches, les possibilités d'application de cette nouvelle technique dans l'industrie sidérurgique.

Les résultats obtenus par le CSM montrent que, par suite d'effets de matrice très faibles, on peut analyser avec les mêmes courbes d'étalonnage, des aciers non alliés, ainsi que des aciers faiblement ou fortement alliés. Une applicabilité étendue, des durées courtes d'analyse, une exploitation sim-

plifiée des résultats et une haute précision sont les caractéristiques de ce nouveau procédé d'excitation.

L'Irsid a cherché à déterminer la composition des couches superficielles à l'aide des possibilités offertes par cette excitation. Les métalloïdes carbone, phosphore, soufre et bore ont pu être dosés quantitativement jusqu'à 0,001%. Pour l'oxygène, l'azote et l'hydrogène, les limites de détection sont sensiblement plus élevées. Cependant, dans la plupart des cas, ces limites suffisent largement pour fixer la distribution de ces éléments, car les concentrations locales, comme celles rencontrées dans les couches superficielles oxydées ou nitrurées, sont élevées.

Absorption atomique sans flamme

Dans la spectrométrie d'absorption atomique, au lieu d'une flamme, on peut utiliser un four en graphite à des températures allant jusqu'à 2800°C et sous gaz protecteur. Cette pratique fait naître une série de nouvelles possibilités: analyse de très faibles volumes de solution, adaptation de la matrice, analyse de substances solides, sans avoir besoin de les dissoudre auparavant et d'autres avantages encore.

Cette technique d'analyse relativement récente a été étudiée pour son applicabilité aux laboratoires sidérurgiques dans un programme de recherches en commun exécuté par le CSM et par Creusot-Loire à Firminy. On a pu mettre au point des méthodes spéciales pour l'analyse des oligo-éléments dans les milieux les plus diversifiés, typiques de l'industrie sidérurgique, comme les matières premières, les laitiers et scories, les ferro-alliages, les aciers, les eaux résiduelles, etc. Les résultats des recherches ouvrent des domaines de travail nouveaux, intéressants, à des prix tout à fait acceptables, particulièrement dans le domaine des oligo-éléments contenus dans les aciers et dans celui des éléments déterminants de la protection de l'environnement.

6. Propriétés d'emploi et techniques d'utilisation

Des travaux de recherche dans le domaine des propriétés des aciers et des techniques de leur emploi ont été exécutés par priorité dans le cadre de programmes coopératifs de grande envergure. C'est un fait que le cercle des chercheurs dans ce domaine, tout comme celui des intéressés aux résultats des travaux sont sensiblement plus vastes que pour les techniques des processus métallurgiques.

Pour cette raison, on a choisi, pour le court aperçu qui suit, uniquement des sujets parmi les programmes coopératifs. Ces sujets concernent des recherches sur des propriétés importantes d'emploi, comme la soudabilité, l'emboutissabilité, la résistance à la fatigue et la tenue contre la rupture fragile. Parmi les techniques d'emploi, seront brièvement décrits les travaux de recherches sur les structures marines, les conduites pour le transport de gaz à grande distance et la tenue au feu des charpentes métalliques.

Sécurité et rentabilité dans la mise en œuvre de l'acier sont les points d'application de tous ces efforts de recherche. Les résultats des recherches CECA des dernières décennies ont, en dehors de leurs applications chez les utilisateurs d'acier, déjà trouvé largement une introduction pour l'établissement de normes, de règlements et de procédures d'agrément. Dans de nombreux cas, ces résultats ont constitué les bases pour de nouveaux règlements uniformisés sur le plan européen.

Structures marines

Avec le début de l'exploitation off-shore du pétrole dans la mer du Nord, l'acier a acquis un nouveau domaine d'utilisation: la fabrication de gigantesques

plates-formes de forage dont le poids atteint jusqu'à 40 000 tonnes. En raison des conditions climatiques qui règnent sur la mer du Nord, les pratiques américaines n'y sont pas sans plus transposables. Des vagues atteignant jusqu'à 30 m de hauteur, de fortes vitesses du vent, d'importantes différences de température et de grandes profondeurs de la mer ont exigé une révision et une amplification des méthodes existantes de dimensionnement des ouvrages. En particulier, on a dû avancer des exigences sévères sur la résistance aux efforts alternés de fatigue pour les charpentes métalliques.

A partir de 1975, la CECA a entrepris de coordonner tous les travaux de recherches décisifs poursuivis dans la Communauté dans le domaine du dimensionnement et du comportement en service des structures marines en acier. Plus de 40 laboratoires de recherche, répartis dans cinq pays de la CECA, ont participé à ce programme communautaire. En tout, les dépenses de recherches se sont montées à plus de 20 millions d'unités de compte. L'aide financière de la CECA est venue alors s'insérer dans le financement global supporté, dans différents pays, également sur le plan national.

L'infrastructure porteuse des plates-formes off-shore comporte de gigantesques nœuds tubulaires extrêmement compliqués. L'objectif principal de la recherche était d'améliorer le dimensionnement et le comportement en service de ces connexions tubulaires. Pour ce faire, il était nécessaire d'entreprendre des travaux très étendus dans les domaines de la résistance aux efforts alternés de fatigue des connexions soudées, de la corrosion par l'eau de mer, de l'analyse des contraintes, ainsi que d'effectuer des essais à grande échelle sur des connexions tubulaires.

Analyse des contraintes

Les concentrations de contraintes qui résultent de la géométrie des nœuds provoquent des tensions maximales, certes locales, mais déterminantes pour le dimensionnement. Pour analyser les états de contrainte dans les connexions tubulaires soudées, on dispose d'une série de méthodes: utilisation de jauges de contrainte sur modèles en plexiglas ou en acier, mesures photo-élasticimétriques et d'autres moyens encore; dans ces derniers temps, les modèles mathématiques numériques, basés sur la méthode des éléments finis, prennent de plus en plus d'importance. Comme le représente l'exemple décrit dans la *figure 73*, on partage, pour ce faire, la forme géométrique du nœud en petites surfaces élémentaires de calcul.

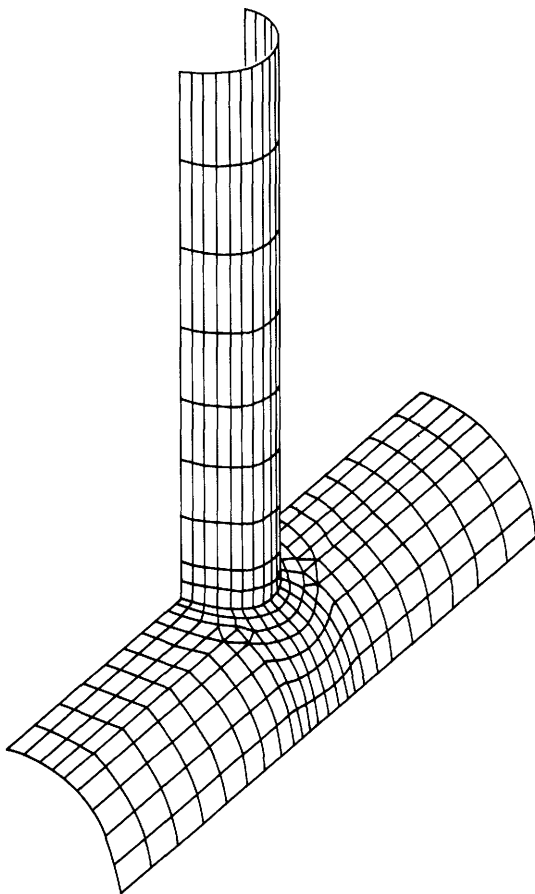


Figure 73: Quadrillage des nœuds pour le calcul des contraintes selon la méthode des éléments finis

Toutes ces méthodes ont été étudiées et comparées entre elles, ainsi qu'avec les essais à grande échelle sur des nœuds tubulaires soudés. La *figure 74* montre une telle comparaison. Les résultats finaux de ces recherches ont donné aux constructeurs les bases pour optimiser la forme des nœuds et des connexions, ainsi que des formules plus précises de calcul des contraintes à prendre en ligne de compte pour le dimensionnement des charpentes.

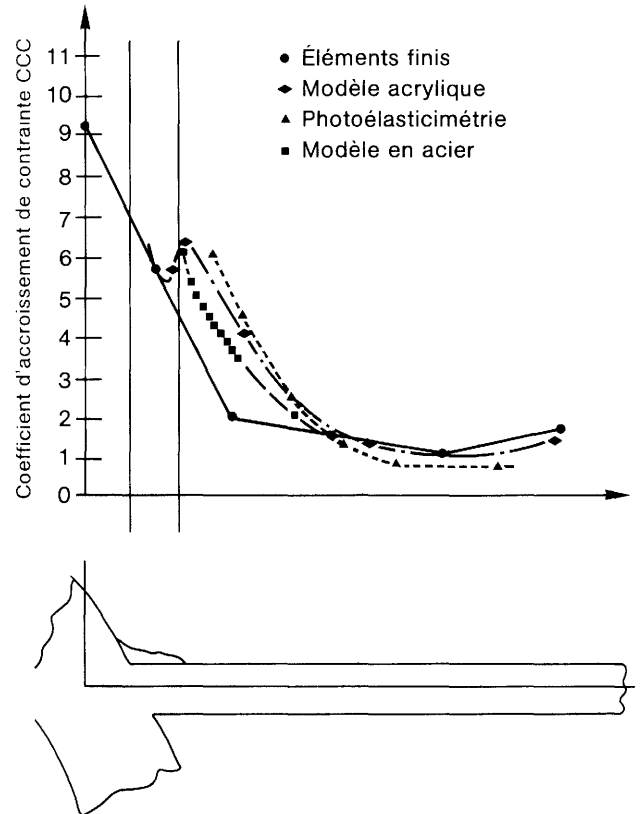


Figure 74: Comparaison des méthodes d'analyse. Joint T1 (UKOSRP)

Résistance à la fatigue des aciers et des connexions soudées

Le programme a comporté de nombreux essais de fatigue sur les joints soudés spécialement utilisés dans les connexions tubulaires. En même temps, un point capital concernait les problèmes liés à l'attaque corrosive par l'eau de mer.

Des essais de longue durée sur des éprouvettes soudées ont montré que l'influence des propriétés de l'acier cède le pas aux effets des cordons de soudure qui affaiblissent très fortement la résistance aux efforts alternés de fatigue. Dans cette optique, il est possible d'apporter différentes améliorations par un retraitement des cordons de soudure, par exemple par meulage, martelage ou refusion TIG. L'influence de ces procédés sur la résistance à la fatigue a pu être évaluée quantitativement.

L'influence néfaste de l'eau de mer peut se manifester aussi bien par la corrosion fissurante sous tension que par une chute de la résistance à la fatigue. Ces deux phénomènes ont été étudiés dans les programmes de recherches. La résistance à la fatigue d'éprouvettes mises sous contrainte dans l'eau de mer descend à environ la moitié de la valeur obtenue par des essais effectués dans l'air.

Par contre, l'utilisation de la protection cathodique contre la corrosion maintient la résistance à la fatigue à la même valeur pour autant que le potentiel soit correctement choisi. La *figure 75* montre, à titre d'exemple, pour cette importante constatation, les résultats d'essais norvégiens sur des éprouvettes soudées bout à bout.

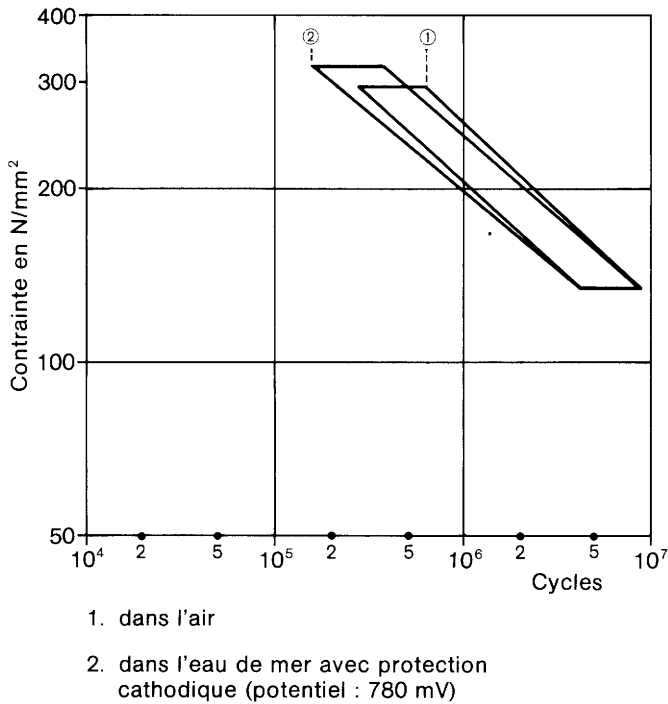


Figure 75: Essais de fatigue d'éprouvettes à soudure bout à bout dans l'air et dans l'eau de mer avec protection cathodique contre la corrosion

Essais sur nœuds tubulaires

Ces essais ont constitué la partie la plus onéreuse du programme. Près de 300 nœuds tubulaires soudés de constructions variées et de dimensions allant jusqu'à 1 830 mm pour le diamètre des tubes, ont été soumis à des essais de fatigue. La *figure 76* donne un aperçu sur les différentes formes des nœuds d'essai. On avait programmé les conditions d'essai les plus différenciées: dans l'air, dans l'eau de mer, avec et sans protection cathodique contre la corrosion, après retraitement thermique du cordon de soudure, avec différentes épaisseurs de tôle, etc.

Les résultats ont abouti à des connaissances largement plus solides pour le dimensionnement des charpentes que celles qui se présentaient jusqu'ici et qui servaient de bases aux courbes AWS-X ou aux courbes Q du Lloyd's. Ceci était particulièrement concluant pour le domaine des grandes épaisseurs de tôle, lesquelles trouvent de plus en plus d'application dans la construction des plates-formes de la mer du Nord.

Des essais sur le comportement des nœuds soumis à une suite de mises en charge et de décharges,

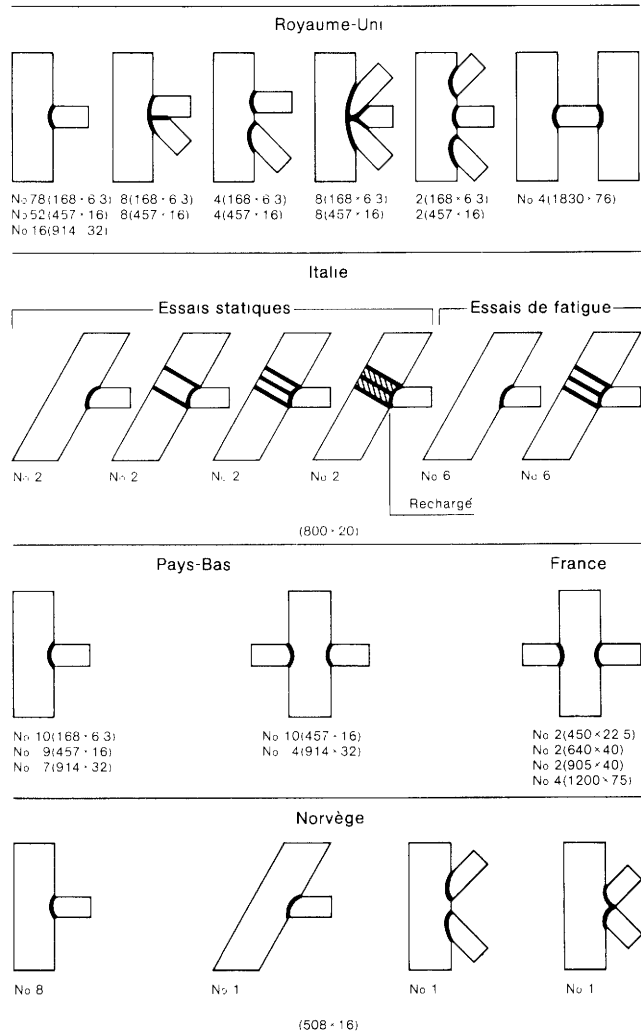


Figure 76: Types de nœuds examinés

simulant les effets de la houle, ont apporté d'importants renseignements pour les prédictions sur la durée de service des ouvrages. Après avoir établi les relations correspondantes, ces prévisions peuvent être alors déduites avec une assez grande précision à partir des essais conventionnels de fatigue menés avec une amplitude de contrainte constante.

En outre, ces essais ont confirmé que la protection cathodique contre la corrosion des charpentes soumises à des suites de contraintes simulant les effets de la houle, éliminait complètement l'influence néfaste de la corrosion par l'eau de mer.

Les résultats de ces recherches ont mis au point un savoir-faire technique qui garantit à l'industrie et à l'acier européens une place solide dans la technologie en progression des constructions off-shore.

Conduites pour le transport de gaz à grandes distances

Rentabilité, grande sécurité et respect de l'environnement sont les causes de l'importance grandissante des conduites de gaz à grandes distances dans l'approvisionnement en énergie. Le dévelop-

pement technologique qui accompagne cette tendance amène à utiliser des diamètres de tubes plus grands, des pressions de service plus élevées et en conséquence des épaisseurs de parois plus fortes pour les tubes. On est contraint de mettre en œuvre des aciers à plus haute limite élastique et à plus forte ténacité.

Pour répondre aux consignes de la plus grande sécurité possible dans ces nouveaux domaines d'emploi, la CECA a encouragé un programme communautaire sur le comportement à la rupture des tubes de grand diamètre. A ce programme participent les exploitants des conduites à grandes distances et les fabricants de tubes de six pays.

La ténacité de l'acier est la plus importante propriété d'emploi pour le comportement des conduites de gaz à grandes distances dans les conditions de sollicitations auxquelles ces conduites sont soumises en service. L'objectif principal de la recherche était l'établissement d'un rapport quantitatif plus précis entre les valeurs de la ténacité mesurées sur l'acier utilisé pour la fabrication des tubes — par exemple au moyen des éprouvettes de résilience ISO-V — et le comportement à la rupture de tubes de grand diamètre dans les conditions de leur emploi; l'attention était attirée en particulier sur la propagation des fissures.

Essais à grande échelle

On a exécuté une série de 14 essais sur des coupons de tubes de 914 et de 1 219 mm de diamètre. Les autres paramètres d'essai pris en compte ont

été le niveau des contraintes, l'épaisseur des parois et les propriétés de ténacité des aciers utilisés.

L'ordonnancement des essais est représenté schématiquement par la *figure 77*. Dans ces essais, on a cherché à simuler aussi près que possible de la réalité les conditions de service imposées aux conduites de gaz à grandes distances. Pour la pression intérieure prévue, on a initié une rupture fragile dans un coupon de tube spécialement choisi dans ce but pour sa faible ténacité. Le comportement à la rupture des coupons de tube qui lui étaient accolés et qui constituaient à proprement parler l'objet de l'essai a été observé soigneusement à l'aide de dispositifs de mesure adéquats. Ainsi, il a été possible, pour chaque condition d'essai, d'une part, de déterminer l'allure de la propagation de la fissure ou bien l'arrêt de la fissure en progression dans l'acier soumis à l'essai et, d'autre part, d'établir une corrélation avec les valeurs de la ténacité mesurées par des essais de résilience effectués sur cet acier.

Les essais ont été exécutés sur des tubes soudés suivant une génératrice ou en hélice et provenant d'aciers de laminage contrôlé du type X65. Chaque conduite d'essai était composée de quatre coupons tubulaires de différentes ténacités. Les épaisseurs de parois soumises aux essais étaient de 12,7, 15,9 et 25,4 mm.

Les résultats de ces essais extraordinairement coûteux ont permis de contrôler et d'élargir les théories en vigueur pour la détermination des

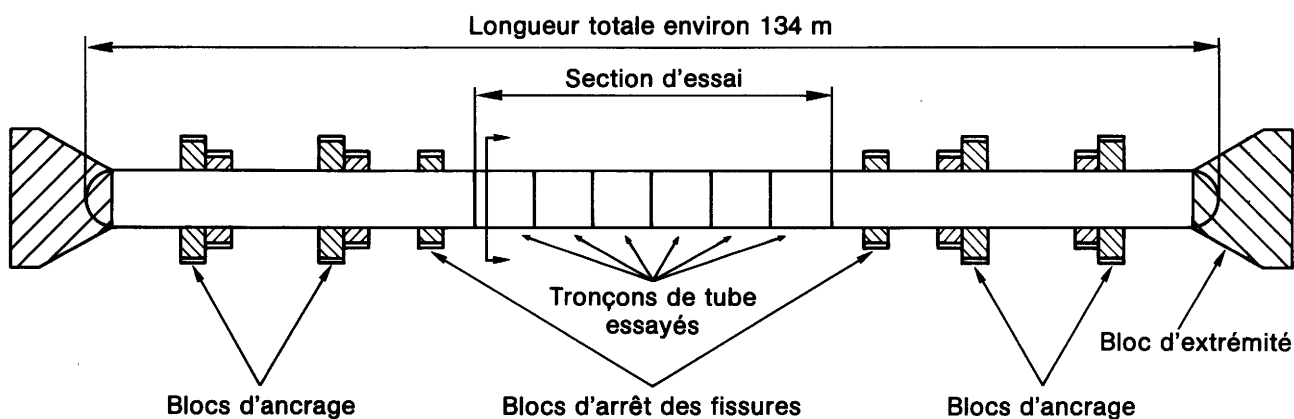


Figure 77: Schéma d'ensemble de la section d'essai

valeurs de la ténacité nécessaires pour obtenir l'arrêt de la propagation des fissures. Les premières bases pour les tubes avec des parois épaisses de 25 mm sont actuellement disponibles et améliorent l'état de nos connaissances sur l'influence de l'épaisseur des parois. Les théories existantes de la rupture du Battelle, de British Gas et de l'American Iron and Steel Institute possèdent chacune une zone de validité spécifique et maintenant mieux connue.

La mesure des propriétés des aciers en ce qui concerne la propagation des fissures dans les tubes apparaît également susceptible d'amélioration. Selon les premiers essais, le test Drop Weight Tear est, dans cette optique, riche de promesses de succès.

Tenue au feu des structures en acier

Des recherches dans le domaine de la protection contre l'incendie dans la construction métallique constituent un excellent exemple de travaux de grande utilité pour la Communauté européenne. A l'heure actuelle, dans les différents pays de la Communauté, les réglementations en matière de sécurité contre l'incendie ne sont pas uniformes. Elles doivent être harmonisées et adaptées à l'état de nos plus récentes connaissances. Il convient aussi de supprimer les fausses opinions et les préjugés qui entravent l'expansion de la construction métallique et qui sont portés sur la tenue au feu des structures en acier.

Sous l'attaque du feu, les structures en acier doivent être capables d'assurer la sécurité des personnes et des biens. Dans ce but, l'opportunité des mesures techniques de protection contre l'incendie doit être constamment remise à l'étude à partir des résultats des enquêtes sur chaque cas d'espèce. C'est ainsi que pendant les dernières années, on a constaté que les causes les plus fréquentes de décès ou de blessures sont à attribuer à l'action thermique directe et aux gaz et fumées qui proviennent de la combustion de substances non métalliques se trouvant dans les locaux. Par rapport à ces causes, le danger d'accident par l'action du feu sur l'affaissement de la stabilité des constructions est largement surestimé. Les opinions sont en train de se retourner. Les administrations portent de plus en plus leur attention sur les mesures, telles que les détecteurs automatiques des foyers d'incendie ou les systèmes d'extinction, sur le contrôle, au point de vue dégagement de fumées, des matériaux utilisés pour la finition des locaux, sur la prise en compte de la charge d'incendie et sur d'autres systèmes encore. En ce qui concerne les structures en

acier, pour des cas déterminés, on englobe de plus en plus dans de telles réflexions, l'utilisation de structures ou d'éléments de construction non protégés.

C'est d'une importance vitale pour la construction métallique que les dépenses pour la protection contre l'incendie restent dans une proportion par rapport à leur utilité qui soit supportable économiquement. En premier lieu, ceci exige la mise en pratique de réglementations de sécurité appropriées et également équitables pour la construction métallique. D'autre part, il convient de mettre à disposition des architectes et des constructeurs des règles simples pour la conception et le calcul des structures en acier, règles qui garantissent une concurrence loyale avec les autres formes de construction, lors de l'appréciation de leur comportement à l'incendie.

Dans ce cadre se trouvait un vaste champ d'activité pour la recherche acier CECA. On trouvera ci-après quelques points d'impact de cette activité de recherches.

Essais d'incendie simulés

De très nombreuses recherches se sont occupées du problème de la valeur significative des essais standardisés d'incendie. Elles ont concerné en particulier la détermination de l'influence de la charge d'incendie en comparaison avec la courbe temps-température de l'essai normalisé d'incendie selon ISO. La *figure 78* montre le déroulement d'un essai d'incendie réalisé dans la station d'essais de Maizières-lès-Metz, construite avec l'aide financière de la CECA. Pour les locaux à usage de bureaux, la question importante de l'effet des quantités de papier entreposées, de leur mode de stockage et de leur comportement au feu a suscité une particulière attention, de même que la détermination de la charge d'incendie résultant d'installations typiques de bureaux. Les résultats montrent qu'en comparaison avec la courbe temps-température, les pointes de température atteintes sont, dans tous les cas, plus basses et la durée d'incendie plus brève. Des valeurs comparatives avec la charge d'incendie provoquée par le bois ont été établies.

Comportement au feu d'éléments en acier

Les recherches communautaires encouragées par la CECA ont traité une série de sujets importants pour la construction métallique :

— Poteaux extérieurs : Environ 20 essais d'incendie ont été exécutés dans la station d'essais de Maizières-lès-Metz par le Centre technique industriel de la construction métallique (CTICM).



Figure 78: Essai d'incendie à la station d'essai de Maizières-lès-Metz

Au cours de ces essais, on a testé la tenue au feu aussi bien des poteaux extérieurs seuls que des assemblages de poteaux et de poutres de plancher. La *figure 79* représente schématiquement la disposition des essais. Les résultats montrent que, dans certaines conditions, les poteaux extérieurs non protégés présentent une haute capacité de résistance au feu. Le facteur important est la distance qui les sépare de la façade et le mode de liaison entre poteaux et poutres. De simples déflecteurs possèdent aussi un effet considérable.

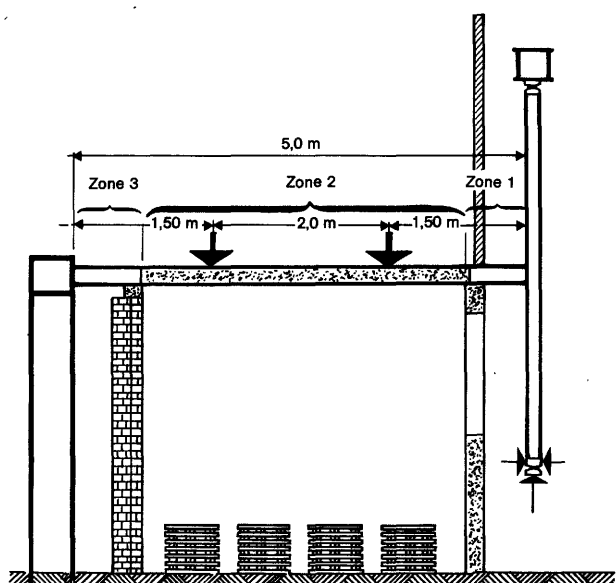
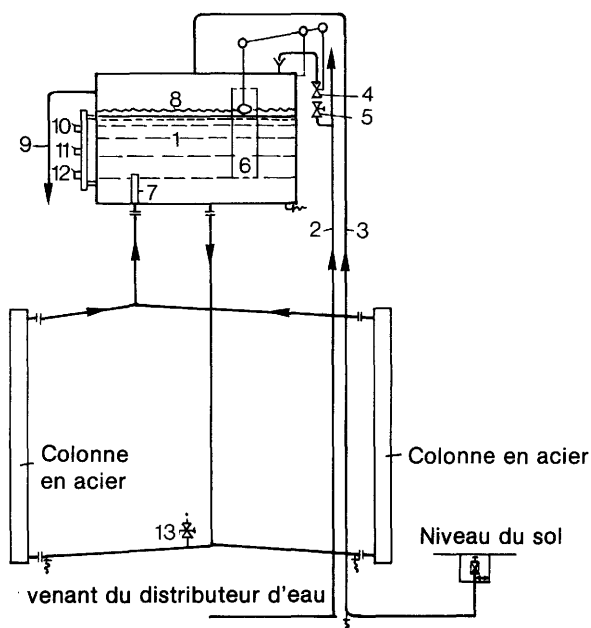


Figure 79: Disposition d'essai pour les essais d'incendie avec colonnes extérieures

- Colonnes refroidies par eau: Les études menées par le VDEh ont apporté des connaissances de base sur la transmission de la chaleur vers le liquide de refroidissement, la nécessité de la circulation de celui-ci, les quantités d'eau correspondantes, la comparaison des coûts avec d'autres solutions, etc. On a pu atteindre de hautes durées de résistance au feu. La *figure 80* montre schématiquement le système de circulation utilisé pour les colonnes extérieures irriguées employées dans la construction — réalisée en combinaison avec ces recherches — du nouvel immeuble de l'Institut de recherches industrielles (BFI) du VDEh.
- Poutres isostatiques: Les essais d'incendie exécutés par la CTICM sur plusieurs types de poutres en profilés et différentes sortes de protection ont montré l'influence considérable, pour obtenir la classe souhaitée de résistance au feu, bien sûr des enrobages, mais aussi de la massivité déterminée par le profil choisi et également des contraintes en service. Des bases de calcul ont été proposées.
- Systèmes hyperstatiques: 25 éléments de construction ont été testés par des essais au feu. La température critique de ruine était, dans

ce cas, environ 200 °C plus élevée que celle des systèmes isostatiques. Il en résulte que les revêtements peuvent être choisis plus minces.



1. Réservoir
 2. Tuyauterie d'amenée du distributeur d'eau
 3. Tuyauterie sèche
 4. Robinet à flotteur avec dispositif de contrôle à sec
 5. Vanne d'arrêt à roue plombée (ouverte)
 6. Tube de tranquillisation
 7. Tuyau vertical
 8. Couvercle d'huile
 9. Trop-plein
 10. Alarme de trop-plein
 11. Niveau normal
 12. Alarme de niveau bas
 13. Contacteur manométrique
- } Contrôle de niveau
par contact mobile

Figure 80: Circuit d'eau avec réservoir surélevé pour les colonnes irriguées (le schéma n'est pas à l'échelle)

Structures mixtes acier-béton

- Colonnes mixtes: Une recherche communautaire de grande envergure a permis d'établir les énoncés de base sur le comportement au feu des profils creux remplis de béton et sans enrobage. Pour le dimensionnement de ces colonnes, on a développé des programmes de calcul pour atteindre des classes prévues d'avance de résistance au feu entre 0,5 et 2 heures. On a également testé des profilés de laminage, donc non clos, enrobés de béton. La *figure 81* donne différentes possibilités de construction de colonnes mixtes.
- Poutres mixtes: Les essais d'incendie en charge sur 2 et 3 appuis ont abouti à de grands écarts de température entre les semelles et les ailes des poutres. On a établi des modèles pour le calcul de la température critique.

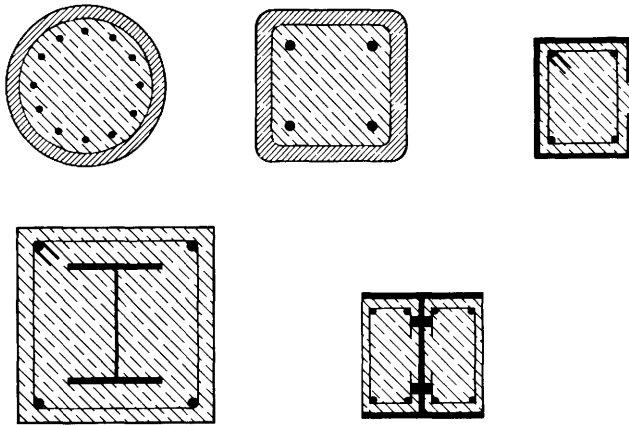


Figure 81: Exécutions possibles de colonnes mixtes béton-acier

Répercussions économiques des recherches

Une partie des résultats des recherches a pu déjà être valorisée par l'amélioration des réglementations nationales de sécurité ou dans des procédures d'agrément pour des emplois particuliers de l'acier. La collaboration européenne a renforcé la mise sur pied de règlements nationaux uniformes. La plus grande partie des travaux de recherche encouragés par la CECA a été coordonnée par la Convention européenne de la construction métallique (CECM); on a pu réaliser d'importants progrès dans le développement de procédés analytiques pour le dimensionnement des éléments porteurs des édifices. Ces progrès ont permis la rédaction de recommandations européennes pour la protection contre l'incendie dans la construction métallique.

Stations européennes d'essais de corrosion

Les recherches sur la corrosion s'appliquent à un domaine extraordinairement étendu. Mentionnons seulement le développement des aciers spéciaux résistants aux acides, le développement et la mise à l'épreuve des revêtements de surfaces, la corrosion par l'eau de mer, la corrosion fissurante sous tension, etc. Un travail communautaire judicieux, exécuté sur le plan européen, ne peut être accompli dans ce domaine que par un choix très soigné des sujets de recherche.

Un exemple particulièrement bien approprié aux efforts de recherche coopérative et de ce fait encouragé par la CECA est constitué par une recherche — brièvement décrite ci-après et exécutée dans six pays européens — sur la corrosion atmosphérique.

Méthode d'essai et choix des sites

Le problème de la corrosion atmosphérique avec ses influences conditionnées par le climat se pose pour toutes les constructions en acier exposées aux intempéries. Ceci est surtout vrai dans une large mesure, lorsque l'acier est mis en œuvre sans aucune protection. C'est le cas des aciers patina-bles qui ont trouvé des applications plus fréquentes en Europe pendant la dernière décennie. En raison de leur composition particulière, ces aciers patina-bles se recouvrent au cours des années d'une couche d'oxyde protecteur qui empêche la corrosion. Des indications plus précises sur le comportement de ces aciers dans les zones climatiques européennes sont importantes pour l'utilisateur.

Douze stations d'essai ont été choisies en considération de leur représentativité de conditions climatiques typiques, comme le climat industriel ou le climat maritime. Dans chacun de ces sites indiqués dans la figure 82, on a exposé des éprouvettes d'aciers de compositions chimiques différentes. En même temps que l'on enregistrerait, pendant quatre années, les pertes de poids des éprouvettes, on a également noté continuellement les caractéristiques climatiques, comme la température, l'humidité, les teneurs en anhydride sulfureux et en chlorures de l'atmosphère, les volumes des précipitations, etc.

Élaboration de principes

L'abondance des résultats des mesures a permis l'établissement de nouveaux principes concernant l'influence des facteurs climatiques et de la composition chimique des aciers sur la corrosion atmosphérique:

- La corrosion typique pour un site déterminé peut être exprimée par des coefficients dérivés de ces principes. Le déroulement de la corrosion des aciers placés dans différents sites peut être ainsi décrit avec relativement de précision.
- Cette situation donne aussi la possibilité d'extrapoler les résultats d'essais de courte durée sur de longues périodes de corrosion. La figure 83 donne une comparaison des pertes de poids constatées après une et quatre années.
- Il est possible d'établir des relations quantitatives entre les valeurs climatiques mesurées et les coefficients de corrosion. Les hautes teneurs de l'air en SO_2 et l'humidité de l'atmosphère participent fortement à la corrosion.

Utilisation pratique

Les connaissances acquises profitent avant tout à l'utilisation des aciers patina-bles. Dans les 15 dernières années, la construction à l'aide de cette

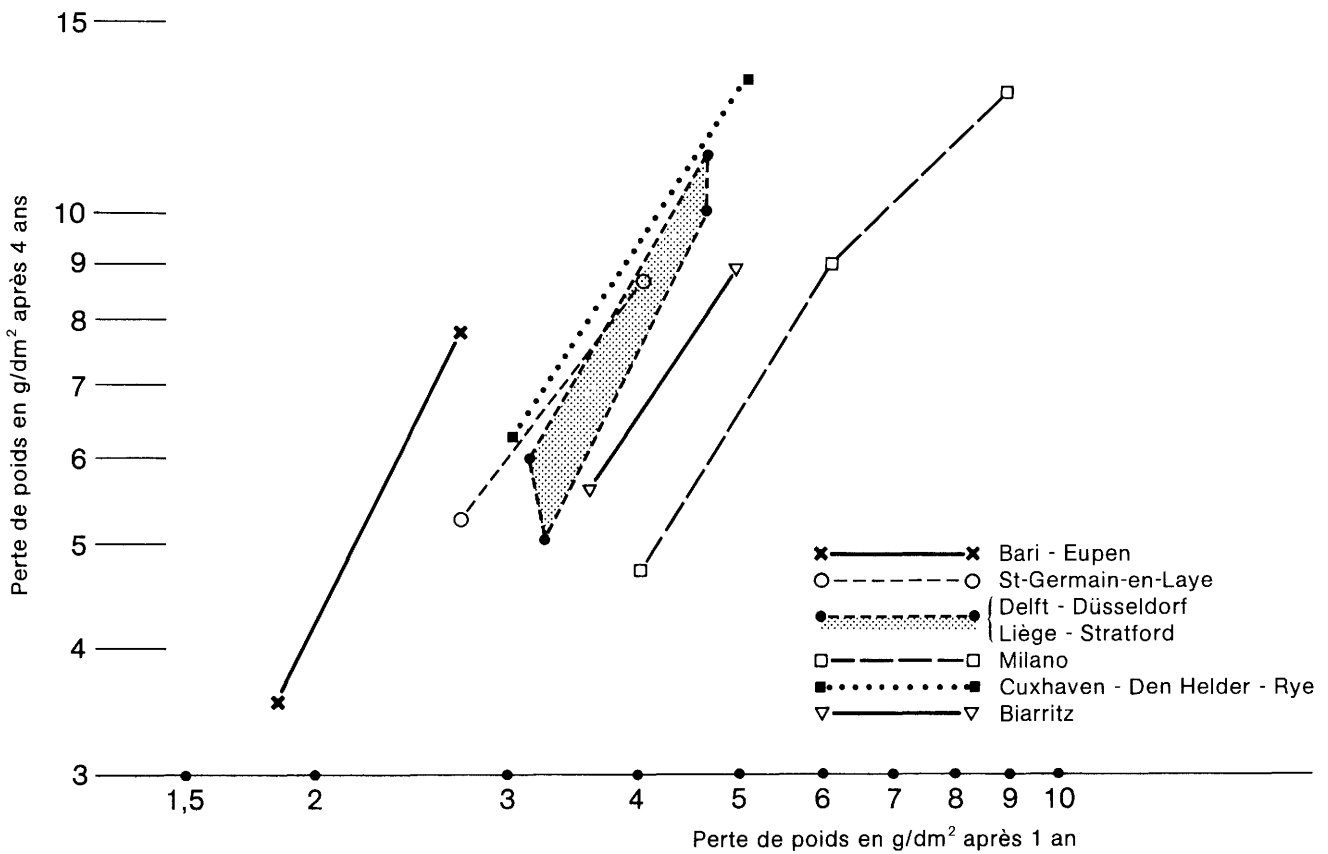
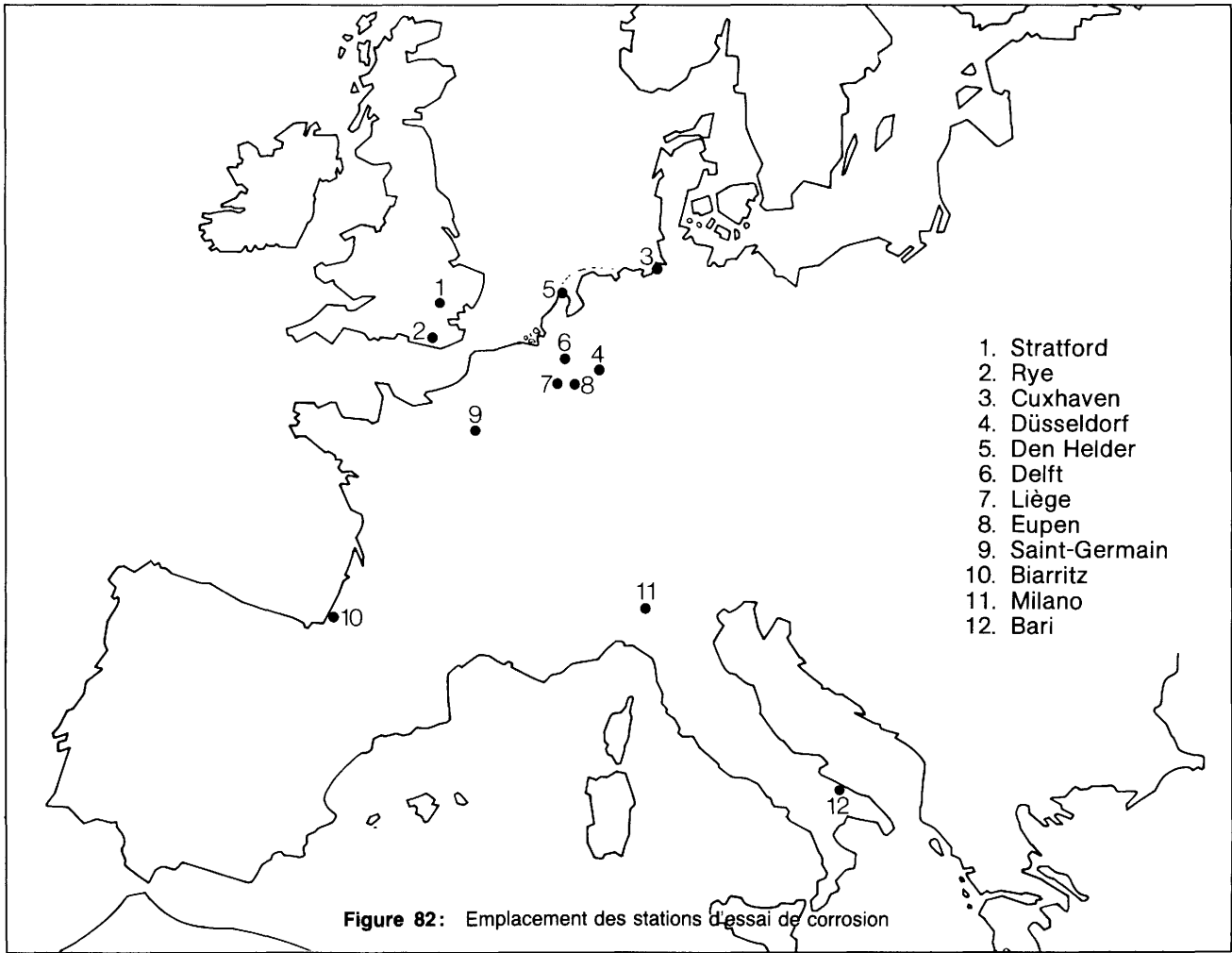


Figure 83: Comparaison des pertes de poids après 1 an et 4 ans dans différents sites de corrosion

nuance d'acier a connu un essor remarquable, en raison des possibilités variées qu'il offre pour les formes architecturales. Cependant les expériences faites n'ont pas toujours été bonnes. Cela tient à une observation insuffisante soit des principes fondamentaux spécifiques de la corrosion, soit des recommandations techniques de mise en œuvre.

Les résultats de la recherche communautaire CECA remplissent, dans ce domaine, des lacunes dans nos connaissances. Ils procurent aux producteurs d'acier et aux utilisateurs les bases nécessaires pour prédire avec une relative exactitude les effets à long terme de la corrosion pour différentes conditions climatiques.

La rentabilité de la mise en œuvre des aciers patinables est devenue plus compréhensible et plus facile à estimer. Par l'entremise des offices européens de conseils pour l'utilisation de l'acier, un cercle toujours plus grand de consommateurs se trouve familiarisé avec les bases spécifiques de la corrosion.

Tôles en aciers à haute résistance

Les tôles présentant des propriétés améliorées possèdent un domaine d'utilisation extrêmement vaste :

- tôles d'épaisseur moyenne (20 à 100 mm) pour la construction de récipients à pression, de réservoirs de stockage, de conduites forcées, de ponts à grande portée, de constructions marines, etc.;
- tôles de forte épaisseur (au-dessus de 100 mm) pour la fabrication essentiellement de réservoirs à pression dans les installations des centrales électriques et dans la pétrochimie.

Un point commun à la plupart de ces domaines est l'utilisation de hautes pressions. Naturellement, ceci exige un haut degré de sécurité. En conséquence, de sévères obligations sont imposées aux contrôles de qualité pratiqués lors de la fabrication, de la mise en œuvre et de l'observation des conditions de service de ces tôles.

Exigée par la tendance vers de plus hautes pressions et de plus grandes dimensions pour les réservoirs à pression, la nécessité s'est de plus en plus confirmée, dans les années 70, pour développer et mettre en œuvre des tôles à performances élevées. Pour ce faire, il a prévalu d'orienter un des objectifs de la recherche communautaire vers l'élargissement de nos connaissances sur la mise en œuvre et les propriétés en service des aciers, telles que la tenue aux sollicitations dynamiques alternées, la résistance au fluage, la corrosion et la fragilisation par l'hydrogène, etc. Les producteurs hors d'Europe

disposaient de plus d'expériences en la matière: en 1974, la production de tôles à haute résistance traitées thermiquement par trempe et revenu était cinq fois plus élevée au Japon que dans la Communauté.

Un programme communautaire exécuté dans quatre pays s'est occupé des propriétés d'emploi des tôles à haute résistance de grande épaisseur, telles qu'elles sont utilisées dans les centrales électriques. Les résultats des recherches ont pu dégager des principes directeurs pour la mise en œuvre la plus adéquate, en particulier pour le formage et le soudage de ces tôles. D'autres bases importantes pour la sécurité en service ont pu être établies, en ce qui concerne la résistance à la fatigue, la résistance au fluage et la sécurité contre la rupture fragile. Ces bases ont fortement influencé la normalisation et les prescriptions de mise en œuvre pendant les dernières années.

A titre d'exemple pour les efforts de recherche déployés dans le domaine des tôles à haute résistance, il convient de rappeler brièvement un programme coopératif CECA sur la poursuite du développement de tôles à haute résistance, soudables et d'épaisseur moyenne (20 à 60 mm).

Propriétés des aciers disponibles

C'est particulièrement dans la zone des épaisseurs moyennes que les tôles à haute résistance trouvent une utilisation largement répandue. Les nuances européennes d'acier sont disponibles dans une zone de limites d'élasticité comprises entre 360 et 700 N/mm². Un dialogue intensif entre utilisateurs et producteurs peut faciliter et promouvoir le choix de ces aciers contre une forte concurrence américaine et surtout japonaise. L'objectif du programme partiel de la BSC et du CSM était d'approfondir les connaissances sur les possibilités de mise en œuvre et les propriétés d'emploi des différents aciers disponibles et, de cette façon, de faciliter à l'utilisateur la mise en œuvre de ces aciers.

Dans le programme de la BSC, on a étudié 30 nuances d'acier. Il s'est agi aussi bien d'aciers normalisés, ou élaborés par laminage contrôlé qu'également d'aciers trempés et revenus. Le point d'impact des travaux a été l'aptitude au soudage et la sécurité à la rupture fragile des joints soudés.

On a défini pour toutes les nuances leur susceptibilité à la formation de fissures sous le cordon après soudage, dans des conditions particulières de ce soudage. Un des principaux facteurs apparaît ici comme étant la trempabilité de l'acier; pour une même aptitude à la trempe, une faible teneur en carbone possède un effet bénéfique. Pour les

aciers fortement alliés, on a établi les bases pour les conditions les plus favorables du soudage. Également les recherches dans l'optique d'un soudage correct sans formation de fissures à chaud ont fait connaître que la teneur en carbone, en premier lieu, les teneurs en soufre et en phosphore, dans une moindre mesure, influençaient la susceptibilité à la fissuration à chaud. On a établi des directives permettant d'estimer cette susceptibilité de fissurer à chaud. D'autres essais de rupture fragile exécutés sur des éprouvettes de grandes dimensions constituées de joints soudés et comportant des défauts rapportés ont conduit à des indications précieuses sur l'influence du métal d'apport de soudure et du procédé de soudage.

Dans le cadre du programme partiel exécuté par le CSM, on a étudié des tôles de 40 mm d'épaisseur, de limite d'élasticité comprise entre 400 et 500 N/mm² et traitées suivant trois procédés différents: laminage contrôlé, normalisé (limite d'élasticité comprise entre 410 et 450 N/mm²) et trempé-revenu (limite d'élasticité comprise entre 560 et 570 N/mm²). Des essais sur éprouvettes de grandes dimensions, proches de la pratique, devaient en particulier montrer dans quelle mesure se modifiaient les propriétés au cours de la mise en œuvre, par exemple par le soudage, le formage plastique à froid et le recuit de détensionnement. On a ainsi trouvé de nouvelles connaissances avant tout dans le domaine de la corrosion fissurante sous tension à l'état formé et à l'état soudé. Dans la zone des limites d'élasticité au-delà de 450 N/mm², les aciers trempés et revenus ont particulièrement montré d'excellentes propriétés d'emploi.

Nouvelles nuances d'acier

Un autre programme partiel à l'intérieur de la recherche communautaire a été exécuté par Creusot-Loire et par le VDEh. Il comportait une étude systématique des aciers faiblement alliés, trempés et revenus, à haute limite élastique: au total 84 coulées d'essai présentaient des compositions chimiques du métal qui couvraient pratiquement l'ensemble du domaine qui entre en ligne de compte pour l'élaboration de tels aciers.

Les compositions ont été soigneusement fixées suivant le schéma de base suivant:

Creusot-Loire: Teneurs constantes en Mo et différentes teneurs en C, Mn, Ni, Cr. Aucune addition de V.

VDEh: Teneurs constantes en C et Mn, différentes teneurs en Ni, Cr, Mo, V.

Dans le programme des travaux, on a exécuté, pour une zone d'épaisseurs de tôle de 15 à 60 mm, de très nombreux essais de trempabilité, de traction

après revenu à différentes températures, de rupture fragile, etc. L'exploitation des résultats des essais avait pour objectif de comprendre l'influence des éléments d'alliage ou de combinaison de ces éléments, ainsi que l'influence du traitement thermique sur les propriétés des aciers. La *figure 84* montre l'exemple d'un résultat partiel pris dans les coulées d'essai de Creusot-Loire. On reconnaît l'influence

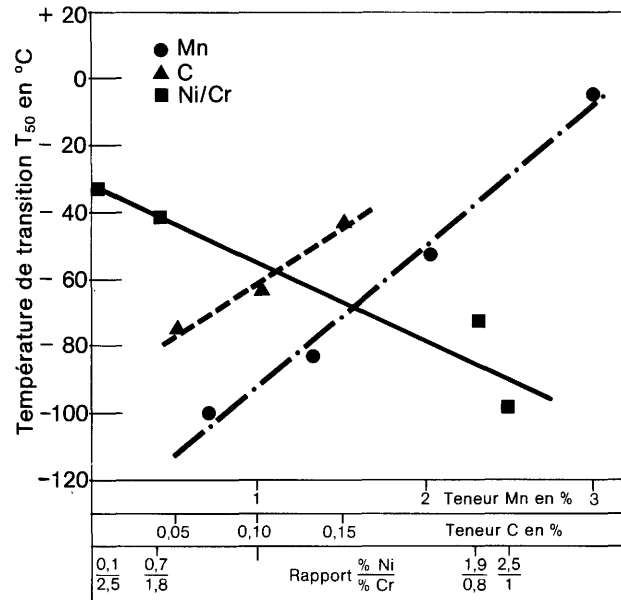


Figure 84: Influence des éléments d'alliage sur la température de transition T50

des éléments carbone, manganèse, nickel et chrome sur la résistance à la rupture fragile déterminée à partir d'éprouvettes de résilience.

Les résultats permettent de déduire, pour chaque zone d'épaisseur, la composition de l'acier, chaque fois la plus favorable sur le plan des coûts, pour satisfaire les exigences spécifiques posées au préalable à l'encontre des propriétés de cet acier. Bien entendu, pour le choix de la composition, il faut considérer en outre les autres propriétés d'emploi, dans le cas présent en particulier l'aptitude au soudage. Celle-ci a été étudiée à fond pour les coulées d'essai et on a montré les influences des éléments d'alliage. Citons comme exemple, l'influence favorable du nickel sur la ténacité de la zone affectée thermiquement et sur la susceptibilité à la fissuration à froid sous cordon, ainsi que l'influence fragilisante, dans deux cas, de teneurs en manganèse dépassant environ 1,3% et d'autres influences encore.

Développement technique

La recherche communautaire a apporté de nombreuses connaissances nouvelles et ce, au moment

d'un intensif développement technique à l'intérieur de la Communauté européenne vers des produits de plus hautes performances. Le symposium qui a été tenu au début de 1977 sur la recherche CECA dans ce domaine a provoqué un échange animé d'expériences entre utilisateurs et producteurs.

Le développement technique des procédés de trempe et revenu fait également des progrès. Une recherche CECA exécutée par l'Irsid a étudié le traitement thermique des tôles par trempe directe à partir de la chaude de laminage, procédé qui, épargnant les coûts et l'énergie, possède de bonnes perspectives d'avenir. L'utilisation industrielle de ce procédé a déjà débuté.

Résistance à la fatigue des constructions soudées

Le comportement de l'acier soumis à des sollicitations dynamiques alternées est une importante propriété d'emploi. Pour les structures soudées, la résistance à la fatigue des joints soudés est d'une importance particulière. La comparaison des prescriptions de dimensionnement dans ce domaine en vigueur dans les différents pays européens amène aux conclusions suivantes :

- les contraintes admissibles pour les joints soudés soumis à des sollicitations de fatigue s'écartent fortement les unes des autres et ce même quand il s'agit de joints simples et clairement définis;
- aucune des prescriptions en vigueur ne donne la valeur des contraintes admissibles pour les joints soudés confectionnés avec les plus récents aciers de construction à grain fin et à plus haute résistance, correspondant à l'Euro-norme 113.

L'établissement de données certaines sur la résistance à la fatigue, pour différentes conditions de mises en charge et différents joints soudés, exige des délais très longs et nécessite des dispositifs d'essai très coûteux. C'est là que se trouve un champ d'action idéal pour une recherche coopérative de grande envergure. Ce n'est que par ce moyen que l'on peut parvenir, dans des délais relativement courts, à des prescriptions uniformes de dimensionnement. Ceci était donc l'objectif et le thème de deux recherches coopératives encouragées par la CECA et qui ont été exécutées dans les années 70 par cinq pays. Les résultats de la deuxième recherche, lesquels résument également l'exploitation de tous les essais sont brièvement exposés ci-après.

Programme des essais

Les essais ont été réalisés dans les laboratoires ci-dessous :

Belgique: Centre de recherches métallurgiques (CRM) à Liège

France: Institut de recherches de la sidérurgie française (Irsid) à St-Germain-en-Laye

Allemagne: Laboratoire pour la résistance en service des ouvrages (LBF) à Darmstadt;
Max Planck-Institut pour la recherche sidérurgique (MPI) à Düsseldorf

Italie: SA Dalmine — Laboratoire de recherches à Dalmine, Bergame

Pays-Bas: École technique supérieure — Laboratoire Stevin à Delft.

Pour la fabrication des éprouvettes soudées par trois différents instituts de recherche sur la soudure, on a employé les aciers de construction à grain fin normalisés Fe E 355 et Fe E 460 et des tôles de 12 et 20 mm d'épaisseur. La *figure 85* donne la forme des éprouvettes soumises aux essais. Les joints avec cordons d'angle ne transmettant pas les efforts (Type K2) ont été soudés à partir de tôles de 12 mm d'épaisseur par soudage en gouttière et cordons verticaux montants, ainsi qu'à partir de tôles de 20 mm d'épaisseur par soudage en gouttière.

Les joints en croix avec cordons d'angle transmettant les efforts (Type K4) ont été confectionnés à partir de tôles de 12 et 20 mm d'épaisseur. Des joints soudés bout à bout longitudinaux et transversaux par rapport à la direction des efforts et confectionnés à partir de tôles de 20 mm d'épaisseur simulaient les croisements de semelles de poutres.

Les éprouvettes soudées en tôle de 12 mm d'épaisseur et les éprouvettes entaillées ont été testées par la méthode dite des « marches d'escalier » (staircase), afin de déterminer la résistance à la fatigue pour $2 \cdot 10^6$ cycles de charge avec trois conditions de mise sous contrainte. Les éprouvettes de 12 mm d'épaisseur ont également subi des essais de fatigue de courte durée (oligocycliques) soit en contrôle de charge, soit en contrôle de déformation. Les éprouvettes soudées plus importantes (200 mm de largeur), confectionnées à partir de tôles de 20 mm d'épaisseur ont été testées sous charge pulsatoire pour les comparer à des éprouvettes plus petites (12·60 mm). Les vitesses de propagation de la fissure le long du cordon de soudure, dans le métal de base et dans la zone affectée thermiquement ont été déterminées à l'aide d'éprouvettes à entaille centrale.

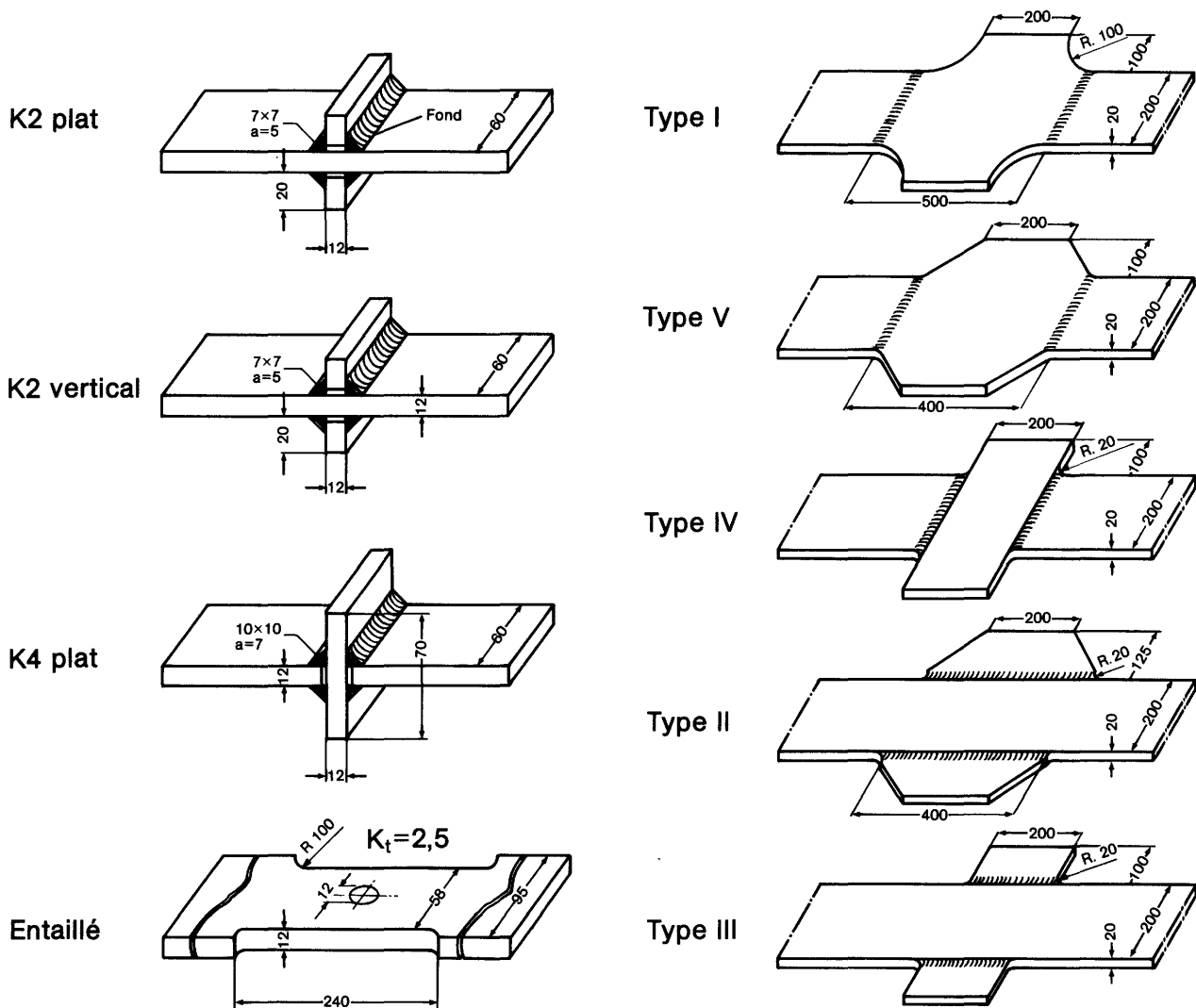


Figure 85: Spécimens d'échantillons

Bases pour les prescriptions de dimensionnement

Les deux recherches coopératives ont apporté aux fins d'exploitation une masse extraordinairement importante de résultats d'essai. Sur éprouvettes entaillées, la résistance à la fatigue de l'acier Fe E 460 est 1,22 fois plus élevée que celle de l'acier Fe E 355, ce qui correspond à peu près à la différence entre les limites d'élasticité. Au contraire, sur éprouvettes soudées, on a trouvé pratiquement les mêmes résistances à la fatigue pour les deux nuances d'acier. Ce n'est que dans le domaine des sollicitations statiques de base élevées que l'on a pu atteindre des contraintes maximales plus fortes pour l'acier Fe E 460. La figure 86 donne une synthèse des résultats des essais en fonction du type de sollicitations.

Les paramètres du soudage ont une influence prédominante sur les propriétés de résistance à la fatigue des joints soudés. Par exemple, pour les éprouvettes du type K2, les divers modes d'apport

du cordon de soudure peuvent amener des différences atteignant jusqu'à 30% pour la résistance à la fatigue. Les différences dimensionnelles des éprouvettes jouent également un rôle certain.

Si l'on compare entre eux les deux aciers soumis aux essais, il ne se présente un intérêt pour l'emploi de l'acier à plus haute résistance que dans les cas suivants :

- quand les joints soudés présentent une forme judicieuse et sont confectionnés avec soin;
- quand il n'est prévu qu'un petit nombre de cycles de charge et que l'on peut alors admettre de plus fortes contraintes;
- quand la charge oscillante se superpose à une sollicitation statique de base élevée.

Le résultat final de cette recherche communautaire a été la mise sur pied de bases pour l'établissement de prescriptions européennes uniformes de dimensionnement pour les joints soudés soumis à des sollicitations cycliques.

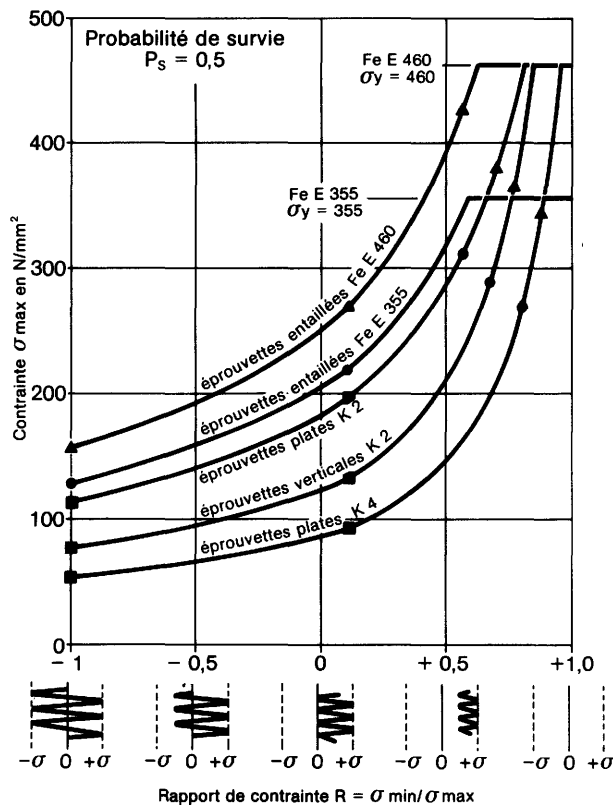


Figure 86: Influence des types de sollicitations

Soudabilité

La CECA peut prétendre avoir créé, dans les 10 dernières années, un cadre approprié pour la coopération européenne dans le domaine du soudage de l'acier. Les instituts de soudure des utilisateurs d'acier, les centres de développement des producteurs d'acier et les universités contribuent pareillement au développement de cette propriété d'emploi si importante pour l'utilisation de l'acier.

Les objectifs généraux sont multiples :

- Développement de nouveaux aciers soudables: concurrencée par les offres en provenance des pays hors d'Europe, la sidérurgie européenne doit aussi bien développer de nouvelles qualités d'acier plus performantes que de disposer en même temps d'une expérience suffisante pour leur mise en œuvre.
- Amélioration des techniques de transformation: il s'agit de mettre l'utilisateur européen en mesure de réaliser, avec les aciers modernes, des constructions soudées qui satisfont à de hautes exigences de sécurité à des prix raisonnables.
- Amélioration des normes et des techniques de contrôle: des réglementations rationnelles de

mise en œuvre et de contrôle aident à promouvoir l'utilisation de l'acier.

- Développement des techniques de soudage: les nouveaux procédés de soudage abaissent les coûts de mise en œuvre, mais créent en même temps de nouvelles exigences envers la soudabilité des aciers et les techniques de mise en œuvre.

Ces thèmes ont été répercutés dans plusieurs programmes coopératifs, encouragés par la CECA et exécutés avec la participation d'un grand nombre d'institutions européennes concernées par le soudage de l'acier. Le court aperçu ci-après illustre cette action.

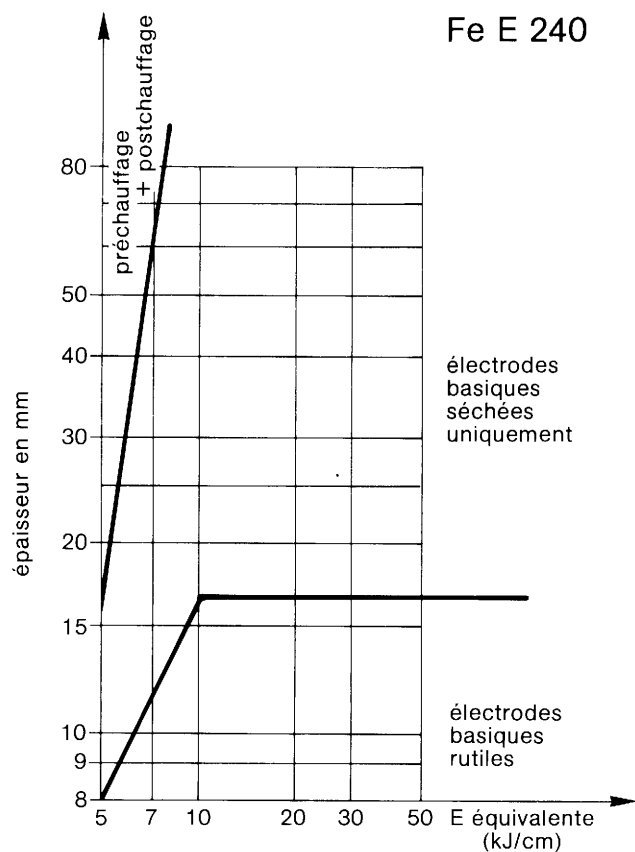
Zone affectée thermiquement

La chaleur dégagée par le soudage modifie une mince zone du métal de base adjacent à la zone fondue dans sa structure et ses propriétés. La tendance à la fissuration sous cordon est un des problèmes liés avec les transformations de structure dans cette zone. Les paramètres les plus importants qui commandent cette tendance sont les conditions de soudage, en particulier la vitesse de refroidissement et les contraintes internes qui en résultent, l'hydrogène qui diffuse hors de la zone fondue, ainsi d'ailleurs que la composition de l'acier.

En dehors de travaux très étendus sur l'allure de la transformation des aciers, les programmes communautaires comportent des recherches sur l'origine des fissures sous cordon et les techniques d'essai qui leur sont liées. Parmi les nombreuses méthodes de mesure, l'essai par implants s'est révélé comme étant particulièrement approprié. Il donne des résultats significatifs en comparaison entre différents laboratoires et avec d'autres méthodes d'essai. Les producteurs et les utilisateurs disposent ainsi d'une méthodologie d'essai rendant possible une adaptation entre la composition de l'acier et les conditions de soudage et permettant de la sorte d'assurer la confection de joints soudés sans risque de fissures à froid. Un résultat de recherche particulièrement important pour l'utilisateur a été l'établissement de corrélations approchant la pratique entre la géométrie du cordon de soudure, l'apport thermique du soudage, l'épaisseur de la tôle et la vitesse de refroidissement du cordon de soudure.

La figure 87 donne, à titre d'exemples, des diagrammes simplifiés utilisables directement par les utilisateurs d'acier. Ils déterminent la valeur limite inférieure de l'énergie apportée par le soudage à respecter afin d'éviter des fissures à froid sous cordon.

Une autre propriété importante de la zone affectée thermiquement a été étudiée: la ténacité des structures formées dans cette zone. Celles-ci doivent



deuxième aspect qui a été étudié de façon approfondie en effectuant de très nombreuses séries d'essais s'étendant aussi sur des éprouvettes de grandes dimensions. Les comparaisons entre de telles méthodes d'essai coûteuses et les essais de résilience classiques ont fourni les bases pour une méthodologie d'essai économiquement praticable et pour des prescriptions pouvant servir au contrôle et à l'agrément des constructions soudées.

Augmenter l'apport thermique lors du soudage signifie augmenter la productivité et la rentabilité du processus de soudage. Par contre, cette augmentation conduit à des structures peu ductiles dans la zone affectée thermiquement. De nouveaux procédés de soudage à haut apport thermique exigent ou bien un traitement thermique ultérieur du cordon de soudure ou bien l'emploi d'un acier adapté à ces conditions de soudure. Les travaux de recherche vers cette dernière possibilité ont abouti au développement d'un nouvel acier allié au titane ayant déjà trouvé des applications industrielles.

Zone fondue

Dans ces travaux de recherches également, l'accent a été mis sur le comportement et les propriétés de la zone fondue en fonction des conditions de soudage et des compositions du métal de base et du métal d'apport. Les recherches ont conduit par exemple à établir des formules pour déterminer la dureté de la zone fondue par soudage avec une seule ou suivant plusieurs passes. On a pu, en outre, optimiser différents procédés de soudage sous poudre protectrice pour ce qui concerne leur effet sur les propriétés de la zone fondue. C'est ainsi que, sur la base des plus récents résultats des recherches, on a pu montrer que la limite élastique et la ténacité de la zone fondue pouvaient être améliorées de manière décisive en agissant sur la teneur en oxygène et sur la structure. La *figure 88* représente cette dépendance. Ainsi se trouve tracée une voie pleine de promesses pour améliorer les qualités des joints soudés. Pour le cas de la zone fondue, se pose aussi le problème fondamental d'une évaluation rationnelle de la sécurité contre la rupture. Dans cette optique, des recherches ont aussi montré que l'essai de résilience si largement pratiqué donne un classement de valeur identique à celui obtenu à l'aide d'essais de mécanique de rupture nettement plus compliqués.

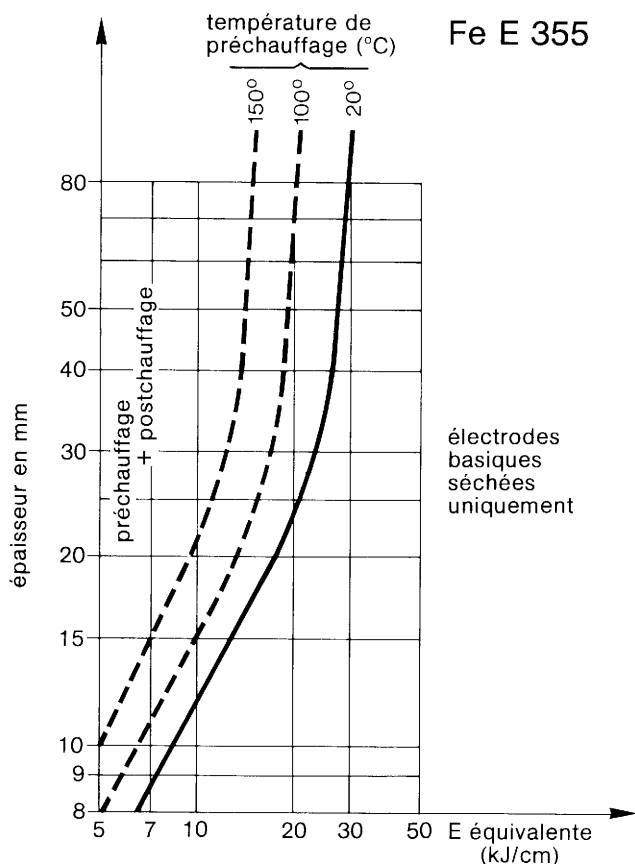


Figure 87: Recommandations de soudage de Fe E 240 et Fe E 355

Contraintes résiduelles de soudure

d'une part rester suffisamment déformables, elles doivent d'autre part présenter une nécessaire sécurité contre la rupture fragile. C'est surtout ce

Les traitements thermiques appliqués de manière courante pour relaxer les contraintes créées par le soudage ont été étudiés d'une façon approfondie

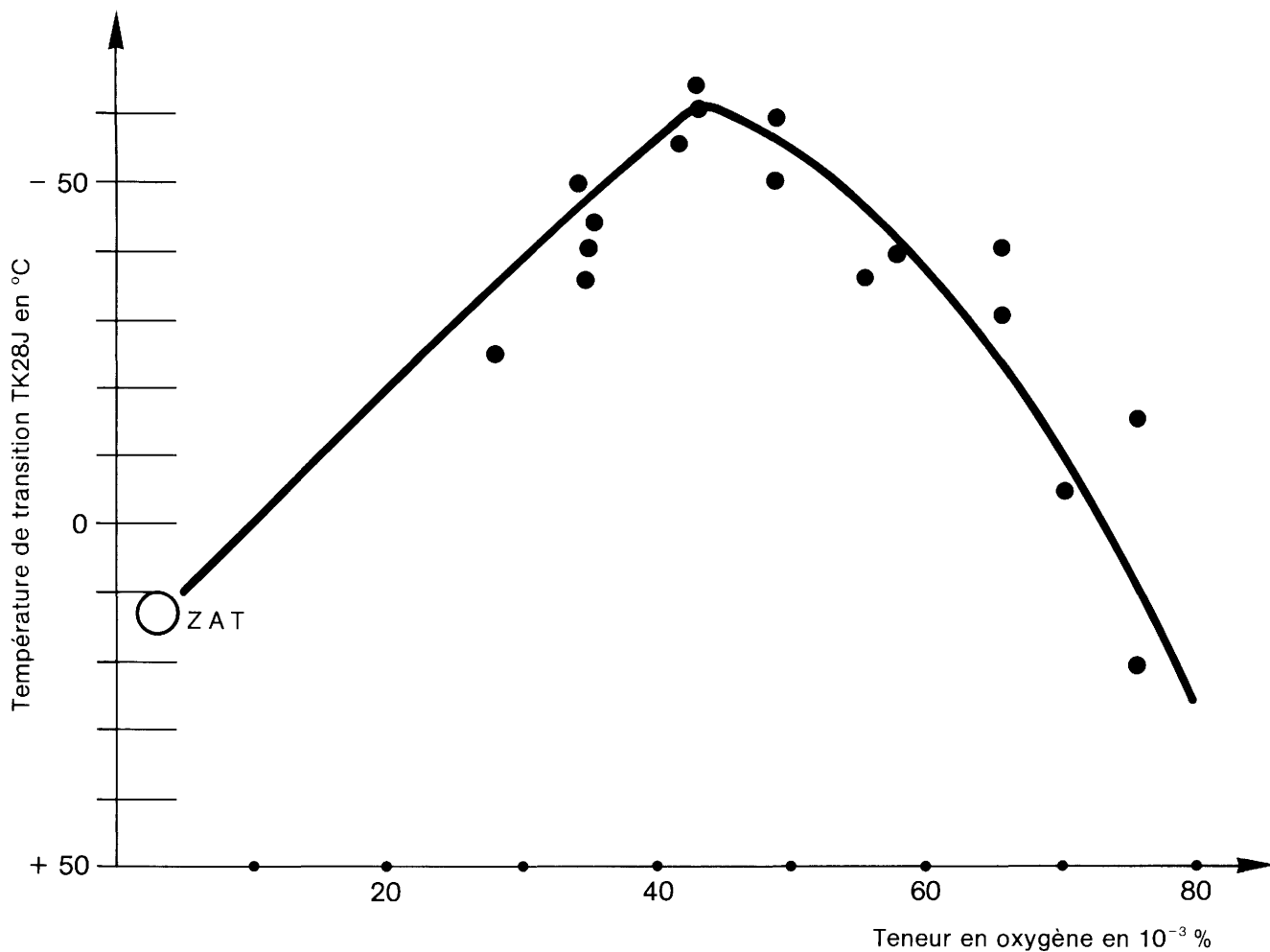


Figure 88: Influence de la teneur en oxygène sur la ténacité de la zone fondue

quant à leur efficacité et à leurs effets sur les propriétés des joints soudés. Cette relaxation dépend du type de structure présent. Pour des aciers du type Fe 510 par exemple, un traitement de relaxation à 550°C suffit pour réduire substantiellement les contraintes. Des températures plus basses peuvent également être efficaces, si la durée du traitement thermique est suffisamment longue. Pour quelques aciers, il existe un certain danger de fissuration pendant le recuit de détensionnement. Après mise au point d'une technique d'essai appropriée, on a étudié l'influence de la composition de l'acier sur ce type de fissuration. Différents oligoéléments, comme P, As, Sb et Sn n'ont pas d'influence aux teneurs habituelles. Il a été possible de déterminer l'influence des structures, ainsi que d'établir des recommandations pour l'exécution du recuit de relaxation des contraintes.

Arrachement lamellaire

Avec la tendance à des constructions soudées de plus en plus compliquées, mettant en œuvre des

épaisseurs de tôles plus fortes, on a constaté plus fréquemment pendant les années 70, une forme de rupture qui est la conséquence des sollicitations élevées dans le sens de l'épaisseur du métal. Cette rupture se manifeste par des arrachements lamellaires en dessous du cordon de soudure (lamellar tearing). Ce phénomène est en relation avec l'anisotropie des propriétés du métal résultant du laminage. De nombreuses méthodes d'essai avaient été proposées pour quantifier la tendance à l'arrachement lamellaire des produits laminés. Un programme de recherches coopératives subventionné par la CECA a permis de procéder à une comparaison et à une estimation de ces différentes méthodes d'essai. L'essai de traction dans le sens de l'épaisseur des tôles est apparu comme étant particulièrement bien adapté aux buts recherchés. Les modalités d'exécution ont pu être uniformisées et incorporées dans les réglementations nationales pour la classification des aciers selon une exigence minimum de la striction à la rupture. D'autre part, les recherches ont apporté de nouvelles bases sur les paramètres d'influence de ce phénomène et, de la sorte, des orientations nouvelles pour la fabrica-

tion d'aciers particulièrement isotropes. La *figure 89* représente l'influence de la longueur totale des inclusions sur la striction à la rupture dans le sens de l'épaisseur. Avec le développement de procédés modernes pour l'élaboration d'aciers à très basses teneurs en inclusions ou d'aciers à inclusions métallurgiquement contrôlées, on a pu mettre sur le marché de nouvelles nuances d'acier répondant à de hautes exigences quant à leur isotropie.

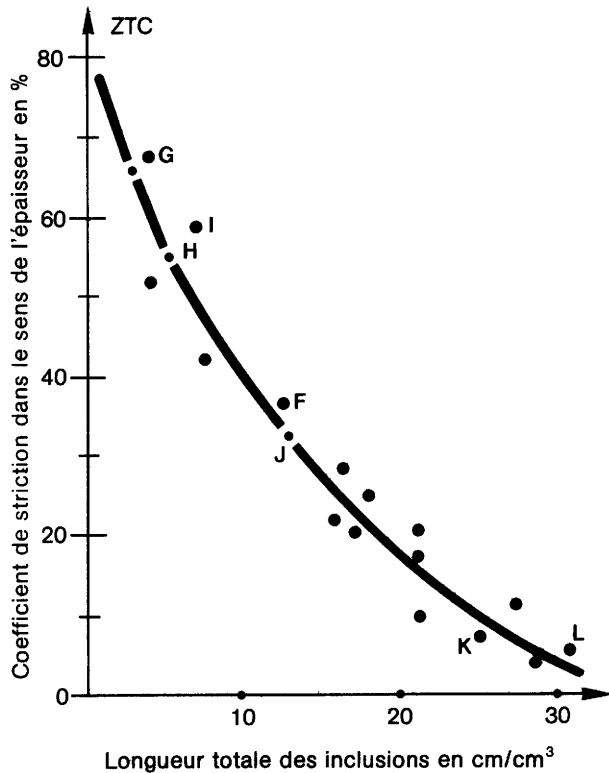


Figure 89: Influence de la longueur totale d'inclusion sur le coefficient de striction lors de l'essai de traction dans le sens de l'épaisseur

Emboutissabilité

Les recherches coopératives encouragées par la CECA dans le domaine de l'aptitude au formage des tôles fines laminées soit à chaud, soit à froid, concernent en premier lieu l'industrie automobile. Cet important utilisateur d'acier se trouve confronté avec la forte concurrence des produits importés des pays hors d'Europe; par ailleurs, l'utilisation de l'acier dans cette industrie est menacée par des produits de substitution, par exemple par les matières plastiques.

Une autre stimulation pour de nouveaux développements se trouve dans la situation énergétique. La *figure 90* montre que la consommation d'essence des véhicules automobiles dépend fortement de leur poids. La tendance à diminuer ce poids, liée en outre à des considérations plus récentes sur l'augmentation de la sécurité routière, conduit forcée-

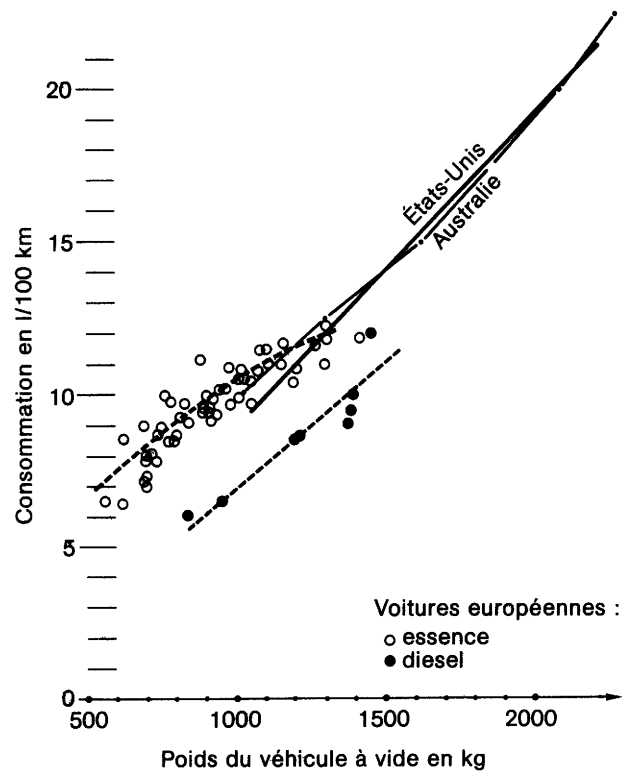


Figure 90: Influence du poids du véhicule sur sa consommation

ment à développer et à mettre en œuvre de nouvelles nuances d'acier à plus haute résistance.

La CECA a mis un très fort accent sur la nécessité d'une collaboration européenne dans ces domaines. De vastes programmes coopératifs ont été exécutés pendant ces 10 dernières années, d'autres se poursuivent à l'heure actuelle. Parmi les travaux de développement des dernières années, quelques résultats de recherches seront brièvement cités à titre d'exemple; il s'agit essentiellement du quatrième programme coopératif exécuté de 1976 à 1979.

Propriétés de déformation des bandes laminées à chaud et à froid

Dans tous les programmes, un rôle essentiel est tenu par le développement et la mise en œuvre dans l'industrie automobile de qualités de tôles fines à haute résistance. La *figure 91* montre les possibilités d'emploi de tels aciers. Les tôles fines laminées à chaud peuvent être utilisées pour une série d'éléments qui doivent absorber l'énergie ou transmettre la puissance et qui entrent dans les parties motrices et dans le châssis des véhicules. Dans un programme de recherches coordonné entre cinq pays, on a étudié une série de problèmes fondamentaux.

Les recherches exécutées par le VDEh à Düsseldorf concernaient la question de savoir dans quelles

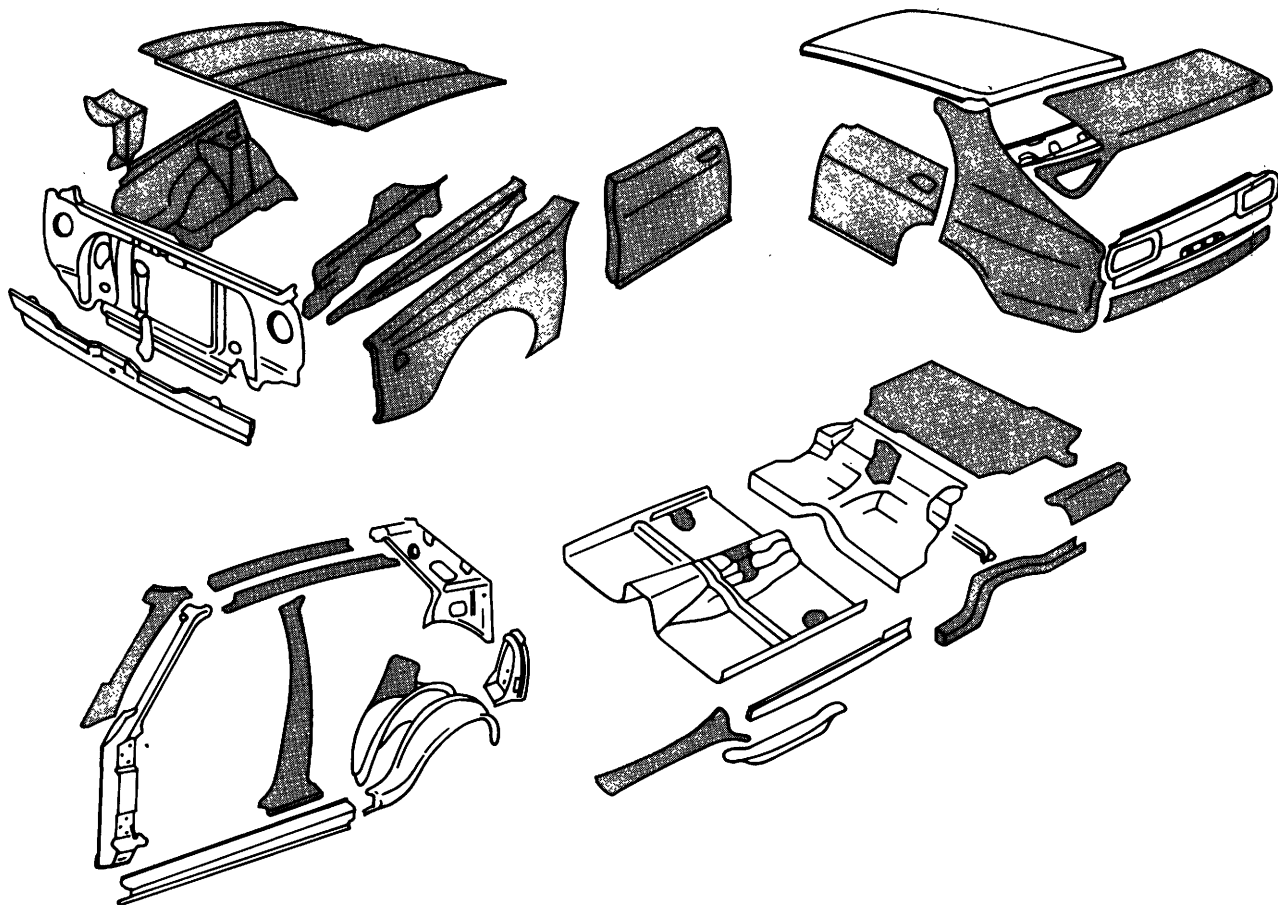


Figure 91 : Exemple de composants d'automobile pouvant être fabriqués à partir d'aciers à haute limite élastique

conditions spécifiques d'élaboration et de mise en œuvre, un contrôle des sulfures était également opportun pour les tôles fines laminées à chaud ou à froid. Pour ce faire, ont été étudiées les propriétés de formage des aciers doux et des aciers alliés au niobium, avec ou sans action sur les sulfures à l'aide du zirconium, ainsi que des aciers alliés au titane dans les zones de limite élastique allant de 170 jusqu'à 600 N/mm² et pour des épaisseurs de tôle comprises entre 1 et 4 mm. Il en est résulté qu'également pour ce domaine d'épaisseurs, la susceptibilité à la fissuration sous entaille était diminuée par un contrôle des sulfures. Différentes pièces embouties, confectionnées à échelle semi-industrielle et à grande échelle ont confirmé que le degré de contrôle des sulfures est avant tout d'importance pratique, lorsque de fortes sollicitations de déformation apparaissent au voisinage des arêtes de coupe et des trous estampés. Quand l'épaisseur de la tôle et la limite élastique augmentent, la susceptibilité à la fissuration croît aussi. La *figure 92* explique quelques-unes de ces relations.

Le laminage à froid partage en fragments plus petits les inclusions sulfureuses allongées, pré-

sentes dans le métal. Des réductions à froid élevées font apparaître un contrôle métallurgique des sulfures d'autant plus superflu que l'épaisseur de la tôle est plus faible. Dans l'acier décarbure sous vide, le soufre se présente, après le laminage à chaud et à froid, essentiellement sous la forme d'inclusions rondes ou légèrement allongées de sulfures ou d'oxy-sulfures. Dans ce cas, une action sur la formation des sulfures en vue d'améliorer l'aptitude au formage à froid n'est pas nécessaire. D'autres recherches pour évaluer la formabilité des bandes à chaud et à froid par détermination de la zone limite d'entrée en plasticité et de la profondeur limite d'emboutissage ont apporté une image plus nette sur les relations entre les propriétés du métal et les déformations critiques admissibles dans la pratique industrielle lors de la fabrication de pièces embouties.

Au CSM de Rome, on a recherché en premier lieu l'influence des conditions de fabrication sur le comportement des tôles fines laminées à froid lors de l'estampage et du poinçonnage. Ici aussi, on a remarqué l'influence de la formation des sulfures sur la susceptibilité à la fissuration pour les aciers

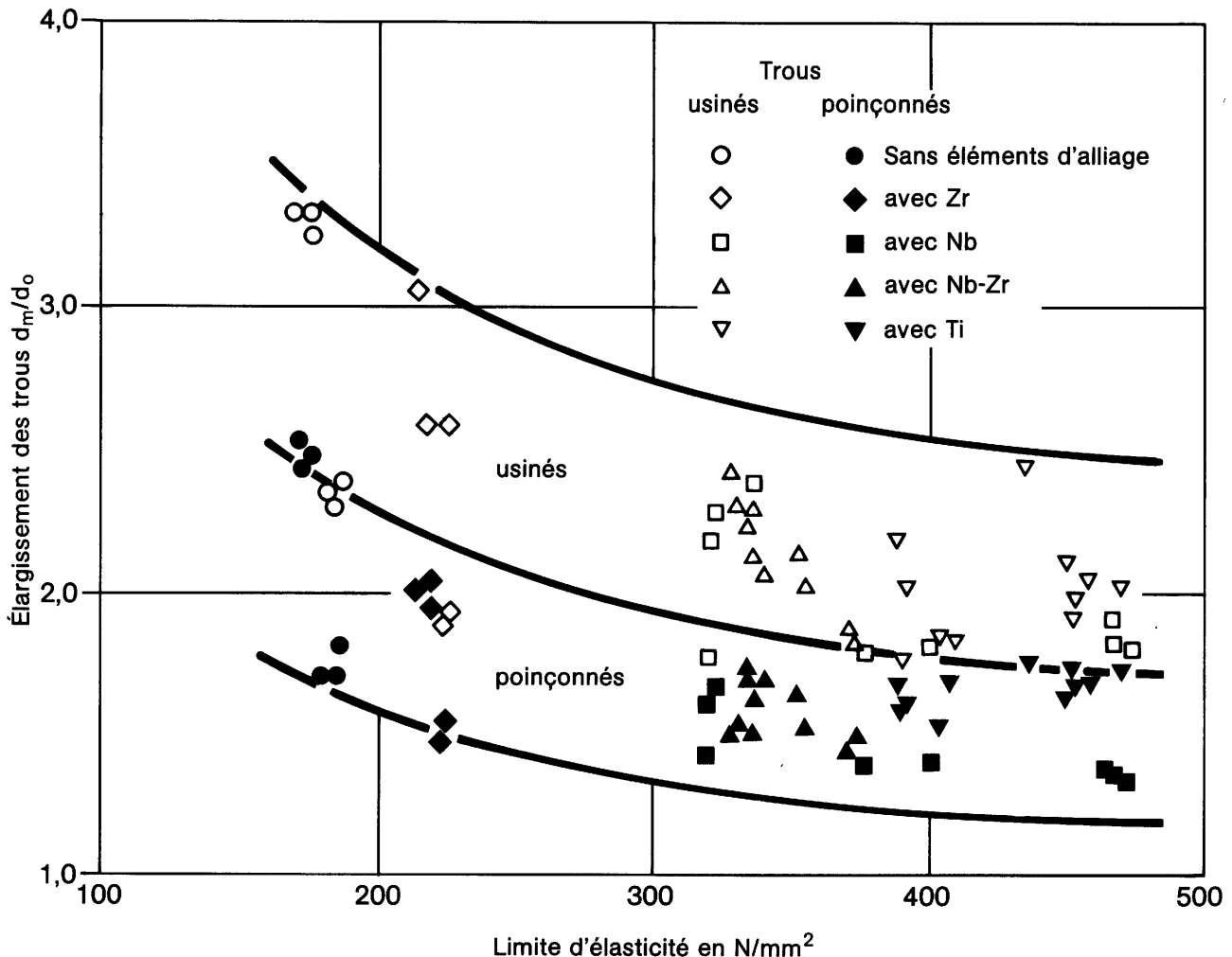


Figure 92: Influence de la limite d'élasticité (position de l'échantillon perpendiculaire à la direction de laminage) sur l'élargissement de trous dans les bandes à froid avec et sans micro-alliages

avec différentes teneurs en soufre, phosphore et carbone et additions de terres rares. Des procédés très coûteux d'élaboration des aciers comme la décarburation, la désulfuration, les procédés pour contrôler la forme des sulfures, etc., n'apparaissent cependant pas indispensables pour obtenir de bons résultats dans la pratique.

Les travaux de recherches exécutés par le CRM se sont concentrés sur la définition des propriétés de formage des tôles fines laminées à chaud. Le comportement des bandes à chaud dans les zones fortement sollicitées avec de fortes concentrations de tension est représenté au mieux par des essais de traction sur éprouvettes entaillées. La striction ainsi observée caractérise bien la formabilité limite obtenue sur des éprouvettes de grandes dimensions.

Plus la limite élastique est élevée et plus il est difficile d'obtenir de bonnes propriétés de formage. Le programme partiel exécuté par la BSC avait pour objectif de donner un aperçu sur les directions possibles de développement à suivre pour la fabrication de bandes à froid de grande résistance et de bonne aptitude au formage. Pour ce faire, on a

transformé en bandes à froid avec différentes méthodes de fabrication des aciers d'essai avec diverses teneurs en titane, niobium, vanadium, carbone, manganèse, phosphore et silicium. Les possibilités présentées ont permis d'établir une échelle des nuances d'acier dont les coûts d'élaboration dépendent de la formabilité et de la résistance souhaitées. Les producteurs et les utilisateurs peuvent maintenant estimer l'intérêt économique des différentes solutions possibles.

Nouveaux procédés de recuit

Le traitement thermique à la suite du laminage à froid est pratiqué en général dans des fours à cloche à recuire. Cependant le développement des fours à recuire à passage continu a fait d'énormes progrès ces dernières années, particulièrement au Japon. L'importance technique et économique de ce procédé pour la fabrication des nuances à haute résistance destinées à l'emboutissage profond est indéniable, ceci d'autant plus si on peut traiter par cette technologie des aciers doux pour emboutissage profond présentant une bonne formabilité.

Dans un programme partiel de l'Irsid à Saint-Germain-en-Laye, on a recherché les bases, relevant de la métallurgie physique, qui sont en relation avec les cycles de recuit rapides. Des vitesses élevées de chauffage provoquent un retard du début de la recristallisation. Il s'ensuit un affinement du grain. La structure et les propriétés peuvent être améliorées si l'on réussit à maintenir la matrice ferritique le plus possible sans impuretés et à limiter à un minimum la teneur en éléments d'alliage.

Problèmes techniques de mise en œuvre

Ces problèmes sont aussi importants pour les producteurs de tôles que pour les utilisateurs. Un modèle mathématique pour décrire la répartition locale des contraintes et des déformations — tel qu'il a été élaboré par le CRM dans un projet de recherche — simplifie l'adaptation de l'outillage de presse aux nouveaux aciers à haute résistance. La tendance à la formation de plis peut être évaluée quantitativement en fonction de la nuance d'acier et des conditions de leur mise en œuvre.

Un autre exemple est constitué par un travail de recherches sur les qualités de surface des tôles laminées à froid, en ce qui concerne le phénomène du grippage pendant le travail à la presse. A partir d'analyses des profils de rugosité, on a pu définir un nouveau paramètre L_m de l'état de la surface. Celui-ci décrit une configuration de la surface caractérisée par la présence de plateaux-porteurs qui favorisent le glissement sur l'outillage de presse. Des essais comparatifs sur des tôles dont le comportement en presse était connu ont confirmé la validité du paramètre L_m . Ces essais ont montré en outre que la présence de ségrégations aux joints des grains diminuait la tendance au grippage.

La *figure 93* montre qu'avec l'aide de la rugosité et de la configuration en plateaux L_m , il est possible de bien décrire le comportement des tôles pendant l'emboutissage.

Ces résultats ont déjà trouvé une vaste application pratique, en particulier dans l'industrie automobile.

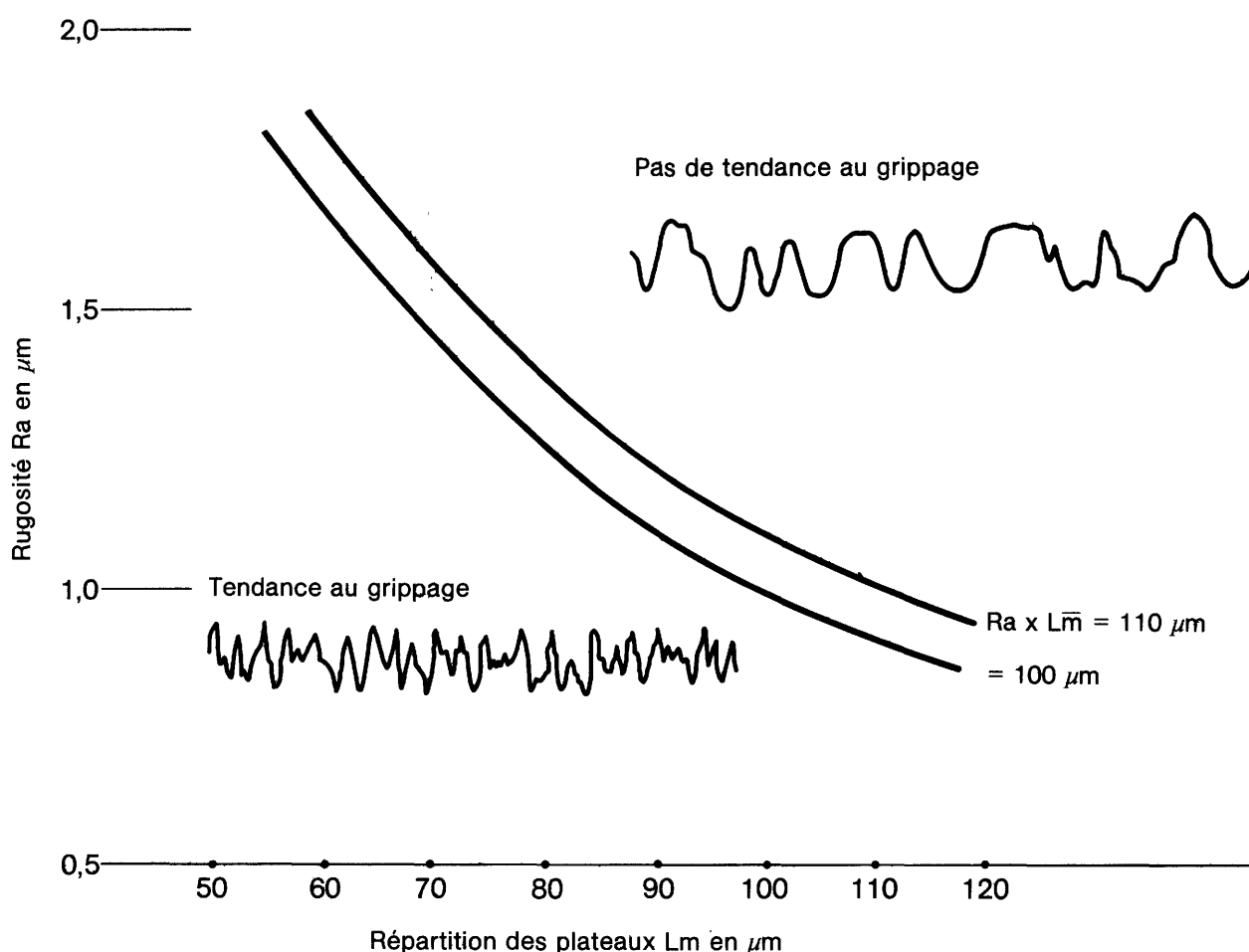


Figure 93: Influence de la rugosité Ra et de la répartition des plateaux L_m sur la tendance au grippage

7. Avenir de la recherche dans la Communauté européenne

Ce bref aperçu, illustré par quelques exemples de recherches communautaires, sur l'activité dans le domaine de l'acier pendant les dix dernières années, doit inciter à réfléchir sur ce sujet.

Même en présence des succès indéniables de la recherche sidérurgique communautaire, l'évaluation critique du niveau technologique et de la capacité concurrentielle au milieu de la crise persistante reste une indispensable nécessité. Il convient aussi de réfléchir aux espoirs qui peuvent être liés à une recherche communautaire. Bien sûr, il serait faux de vouloir surestimer l'apport de cette recherche à l'innovation technique. Ce n'est que par une concurrence permanente entre les recherches que les meilleures solutions parviennent à une percée industrielle dans les délais les plus brefs.

Les points d'impact d'une politique d'encouragement consistent davantage dans les impulsions pour intensifier l'activité de recherche sur un large front et ce dans tous les pays de la Communauté. Le centrage des objectifs de recherche sur les mutations structurelles de l'industrie sidérurgique apparaît ici comme une injonction capitale de la politique de recherche pour les prochaines années.

La volonté tendue vers une collaboration technique et vers des efforts communs de recherche à l'intérieur de la Communauté européenne s'est renforcée — ce qui est également un des effets de la politique de recherche de la CECA. Poursuivre dans cette voie apparaît comme une nécessité, et cette voie est une de celles qui mènent à l'intégration européenne.

8. Sources des renseignements

Contrats passés avec la CECA et articles publiés

Exploitation des mines de fer — Cokéfaction — Production de la fonte — Réduction directe

Exploitation des minerais de fer
— Contrat 6210-10/1/101
— Industrie Minérale nov. 1980

Fabrication du coke de haut fourneau
— Contrat 7210-AA 2/201

Utilisation de coke moulé au haut fourneau
— Contrat 6210-AA/502
— Stahl und Eisen 1980 n^{os} 15 et 18

Comportement du coke dans le haut fourneau
— Contrat 7210-AA 8/801

Propriétés des composants du lit de fusion pour les
hauts fourneaux de grande taille
— Contrat 7210-AA/401

Application de gaz réducteurs dans le haut
fourneau
— Contrats 6210 66, 6210-AA 2/201
— Rapports métallurgiques du CRM 1980 n^o 56

Comportement du zinc et des métaux alcalins dans
le haut fourneau
— Contrat 6210-AA/3/305

Mélanges réfractaires pour rigoles de coulée au
haut fourneau
— Contrat 6210-AA/101

Utilisation du gaz de haut fourneau comme com-
bustible en sidérurgie
— Contrat 7210-EA/601

Réduction directe
— Stahl und Eisen 1976 n^o 3

Élaboration de l'acier — Coulée et solidification

Automatisation des aciéries à l'oxygène
— Contrat 6210-58/5/052

Automatisation des aciéries électriques
— Contrat 7210-CA/105 et 125
— Stahl und Eisen 1980 n^o 10

Propriétés des arcs électriques
— Contrat 6210-93/8/801

Procédé de refusion sous laitier électroconducteur
— Contrats 6210-CA/103, 6210-CA 8/802
— Stahl und Eisen 1973 n^o 14

Coulée et solidification
— Contrat 6210/50, (1^{er}, 2^e et 3^e programmes com-
munautaires)

Contrôle métallurgique du processus et améliora-
tions apportées à la coulée continue
— Contrats 7210-CA/204, 7210-CA/407

Produits réfractaires en aciérie
— Contrat 6210-CA/2/201

Technique des laminoirs — Traitement thermique

Four électrique de réchauffage des brames
— Contrat 6210-EA/3/302

Contre-flexion des cylindres de laminoirs
— Contrat 6210-71/3/201

Procédés de refroidissement dans les laminoirs
— Contrat 6210-EA/3/201

Automatisation des trains à larges bandes à chaud
— Contrat 6210-53/3/031
— Stahl und Eisen 1976 n° 2

Diminution des fluctuations de largeur des larges bandes à chaud
— Contrat 6210-EA/1/101
— Stahl und Eisen 1980 n° 12

Automatisation des trains tandem à froid
— Contrats 6210-65/1/012, 6210-EA/4/402
— Conférence internationale sur le laminage, Tokyo, 1980

Réglage de la planéité dans les laminoirs à froid
— Contrats 6210-EA/301, 6210-EA/1/102, 7210-EA/109
— Stahl und Eisen 1977 n° 21

Procédé de décapage électrolytique neutre continu
— Contrat 7210-EA/403

Procédés de mesure — Techniques d'analyse

Procédés de contrôle par ultrasons
— Contrats 6210-60/0/70, 6210-GA/3/303, 6/601, 7210-GA/6/604, 6210-60/8/802, 7210-GB/801
— Circulaire d'informations techniques 1977 n° 10
— Journées d'information sur la recherche CECA des 2 et 3 septembre 1981

Méthodes de sondage électromagnétique
— Contrat 6210-64/1/011
— Stahl und Eisen 1975 n° 12
— Contrats 6210-GA/3/306, 6210-60/0/70, 7210-GA/119

Méthodes de mesures optiques
— Contrat 7210-GA/119

Contrôle de l'état de surface des bandes laminées à froid
— Contrats 6210-60/1/101, 6210-60/6/601, 7210-GA/8/804, 7210-GA/1/111

Surveillance des installations sidérurgiques
— Contrat 6210-2/8/801

Techniques d'analyse
— Contrats 6210-78/2/201, 7210-GA/115, 7210-GA/313/114/208/805, 6210-GA/308/405, 7210-GA/315/407

Propriétés d'emploi et techniques d'utilisation

Structures marines
— Contrats 7210-KB/801/802/803/301/102/602, 6210-42/4/041, 6210-KE/802
— Conférence CECA du 5 au 8 octobre 1981 à Paris

Conduites pour le transport de gaz à grandes distances
— Contrats 6210-46/103/104/401/601, 7210-KE/105

Tenue au feu des structures en acier
— Contrats 6210-29, 7210-SA/108/304
— Fiche de renseignements 467 du Centre d'informations pour l'utilisation de l'acier à Düsseldorf

Stations européennes d'essais de corrosion
— Contrat 6210-90/8/801
— Rapports métallurgiques du CRM 1980 n° 57

Tôles en aciers à haute résistance
— Contrat 6210-KH/101/102/801/401/301

Résistance à la fatigue des constructions soudées
— Contrat 6210-45/101/201/301/401

Soudabilité
— Contrat 6210-93/101/102/103/401/261/301
— Circulaire d'informations techniques 1977 n° 1
— Collection ATS-OTUA 1980 — Conseils pour le soudage des aciers
— Soudage et techniques connexes nov.-déc. 1980

Emboutissabilité
— Contrats 6210-KC/101/201/301/401/601/801, 7210-KC/303/204/103/401/601, 6210-KC/2/203

2167
Communautés européennes — Commission

EUR 7904 — 10 années de recherche acier Ceca

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes

1983 — 106 p., nomb. ill. (part. coul.) et graph. — 21,0 × 29,7 cm

Série Recherche technique Acier

DE, EN, FR, IT

ISBN 92-825-3109-0

N° de catalogue: CD-NB-82-002-FR-C

Prix publics au Luxembourg, TVA exclue

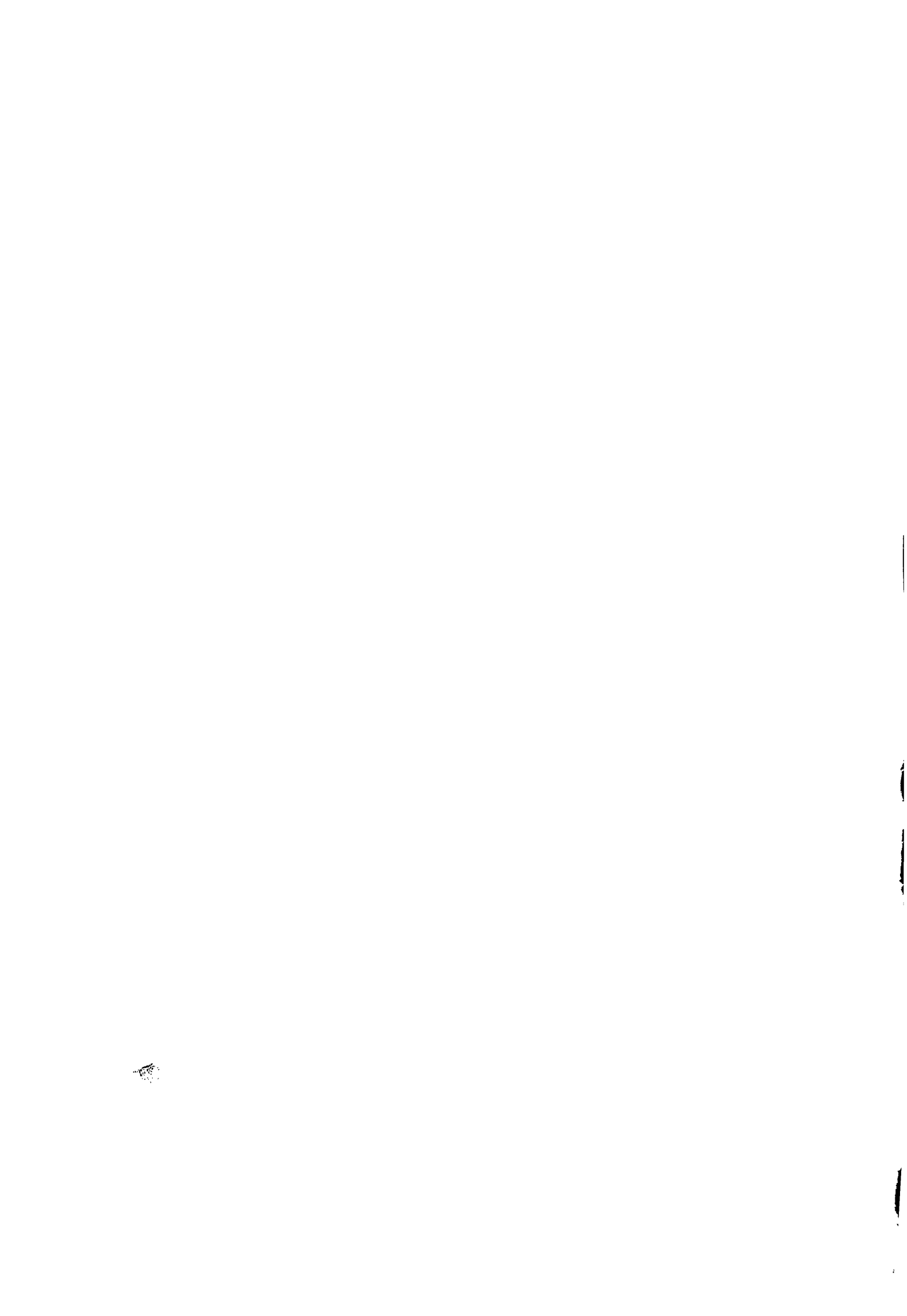
Écu 13,31 BFR 600 FF 88

Depuis la création de la CECA jusque fin 1981, l'aide financière octroyée à la recherche carbo-sidérurgique s'est élevée à 505 millions d'Écus. De ce montant, la recherche «Acier» a bénéficié d'un soutien financier égal à 200 millions d'Écus.

Pendant la décennie 1971-1980, la Commission a apporté une aide financière voisine de 130 millions d'Écus, répartie sur 660 contrats de recherche.

L'objet de la publication est de présenter, d'une manière succincte, un certain nombre de résultats de travaux de recherche menés durant cette dernière décennie et qui ont abouti à une application industrielle ou commerciale.

Les travaux et leurs résultats sont présentés suivant la classification habituelle des secteurs de recherche sidérurgique.



**Salgs- og abonnementskontorer · Vertriebsbüros · Γραφεία πωλήσεως
Sales Offices · Bureaux de vente · Uffici di vendita · Verkoopkantoren**

Belgique — België

Moniteur belge — Belgisch Staatsblad
Rue de Louvain 40-42 — Leuvensestraat 40-42
1000 Bruxelles — 1000 Brussel
Tél 512 00 26

Sous-dépôts — Agentschappen .

Librairie européenne — Europese Boekhandel
Rue de la Loi 244 — Wetstraat 244
1040 Bruxelles — 1040 Brussel

CREDOC

Rue de la Montagne 34 - Bte 11
Bergstraat 34 - Bus 11
1000 Bruxelles — 1000 Brussel

Danmark

Schultz Forlag
Montergade 21
1116 København K
Tlf (01) 12 11 95

Underagentur:

Europa Bøger
Gammel Torv 6 — Postbox 137
1004 København K
Tlf. (01) 15 62 73

BR Deutschland

Verlag Bundesanzeiger
Breite Straße — Postfach 10 80 06
5000 Köln 1
Tel. (0221) 20 29-0
(Fernschreiber . Anzeiger Bonn 8 882 595)

Greece

G C Eleftheroudakis S.A.
International bookstore
4 Nikis street
Athens (126)
Telex 219410 elif gr

Sub-agent for Northern Greece .

Molho's Bookstore
10 Tsimiski Street
Thessaloniki
Tel 275 271
Telex 412885 limo

France

*Service de vente en France des publications des
Communautés européennes*
Journal officiel
26, rue Desaix
75732 Paris Cedex 15
Tél (1) 578 61 39

Ireland

Government Publications
Sales Office
G P O Arcade
Dublin 1

or by post

Stationery Office
Dublin 4
Tel. 78 96 44

Italia

Libreria dello Stato
Piazza G. Verdi, 10
00198 Roma
Tel. (6) 8508
Telex 611008 ipzsro I

Licosa S.p.A.
Via Lamarmora, 45
Casella postale 552
50121 Firenze
Tel 57 97 51
Telex 570466 licosa I
CCP 343509

Nederland

Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf
Christoffel Plantijnstraat
Postbus 20014
2500EA 's-Gravenhage
Tel (070) 78 99 11

United Kingdom

H M Stationery Office
P.O. Box 569
London SE1 9NH
Tel (01) 928 69 77 ext 365

Sub-agent

Alan Armstrong & Associates Ltd
European Bookshop
London Business School
Sussex Place
London NW1 4SA
Tel (01) 723 3902

España

Mundi-Prensa Libros, S A
Castelló 37
Madrid 1
Tel. (91) 275 46 55
Telex 49370-MPLI-E

Portugal

Livraria Bertrand, s a r l
Rua João de Deus - Venda Nova
Amadora
Tél. 97 45 71
Telex 12709-litran-p

Schweiz - Suisse - Svizzera

FOMA
5, avenue de Longemalle
Case postale 367
CH 1020 Renens - Lausanne
Tél (021) 35 13 61
Télex 25416

Sous-dépôt
Librairie Payot
6, rue Grenus
1211 Genève
Tél. 31 89 50

Sverige

Librairie C.E. Fritzes
Regeringsgatan 12
Box 16356
103 27 Stockholm
Tel 08-23 89 00

United States of America

European Community Information Service
2100 M Street, N.W
Suite 707
Washington, D.C 20 037
Tel (202) 862 95 00

Canada

Renouf Publishing Co., Ltd.
2182 St. Catherine Street West
Montreal, Quebec H3H 1M7
Tel (514) 937 3519

Japan

Kinokuniya Company Ltd
17-7 Shinjuku 3-Chome
Shinjuku-ku
Tokyo 160-91
Tel (03) 354 0131

Grand-Duché de Luxembourg

*
**

Andre lande · Andere Länder · Άλλες χώρες · Other countries · Autres pays · Altri paesi · Andere landen

Kontoret for De europæiske Fællesskabers officielle Publikationer · Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften ·
Υπηρεσία Έπίσημων Έκδόσεων των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων · Office for Official Publications of the European Communities ·
Office des publications officielles des Communautés européennes · Ufficio delle pubblicazioni ufficiali delle Comunità europee ·
Bureau voor officiële publikaties der Europese Gemeenschappen

L-2985 Luxembourg · 5, rue du Commerce · Tel. 49 00 81

AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports scientifiques et techniques publiés par la Commission des Communautés européennes sont signalés dans le périodique mensuel «**euro-abstracts**». Pour souscrire un abonnement (1 an: 2 400 BFR), prière d'écrire à l'adresse ci-dessous.

Prix publics au Luxembourg, TVA exclue
Écu 13,31 BFR 600 FF 88



OFFICE DES PUBLICATIONS OFFICIELLES
DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

L-2985 Luxembourg

ISBN 92-825-3109-0



9 789282 531099