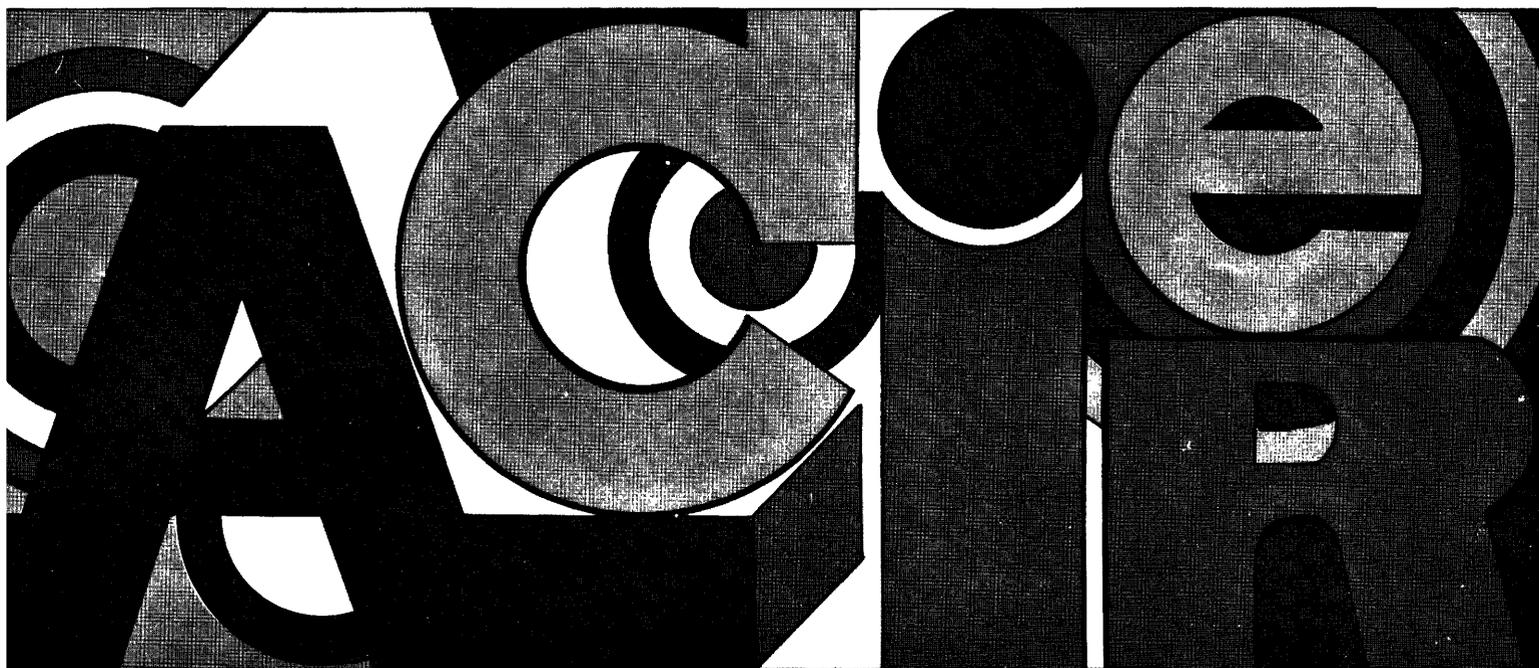


communauté européenne du charbon et de l'acier
la commission

recherche technique « acier »

**affinage des fontes phosphoreuses en une phase
avec décrassage en cours de soufflage**



mars 1973

eur 4941 d,f

communauté européenne du charbon et de l'acier
la commission

recherche technique « acier »

**affinage des fontes phosphoreuses en une phase
avec décrassage en cours de soufflage**

(Convention n° 6210-23/2/021)

rapport final

mars 1973

eur 4941 d,f

AVERTISSEMENT

La Commission des Communautés européennes n'est pas responsable de l'emploi qui sera fait des informations contenues dans le présent ouvrage.

COMPOSITION DU COMITE EXECUTIF

Président : (à tour de rôle)

Allemagne : M. Kalla (VDEh, Düsseldorf)
M. Steinmetz (Krupp-Hüttenwerke AG, Bochum)

Benelux : M. Decker (C.R.M., Liège)

France : M. Trentini (I.R.S.I.D., Maizières-les-Metz)

Italie : M. Ramacciotti (C.S.M., Roma)

RESUME DES TRAVAUX EFFECTUES ET PRESENTATION
DES PRINCIPALES CONCLUSIONS

par

P. NILLES et Y. NOEL

C.R.M.

Le présent rapport final se compose d'un résumé et de six annexes.

Dans le résumé, les travaux effectués sont décrits et les principaux résultats obtenus sont discutés.

Dans les annexes, le lecteur trouvera les descriptions détaillées des installations nécessitées par la recherche ainsi que l'ensemble des résultats obtenus.

Pages

1	Annexe 1 : Essais sur le convertisseur LD-KALDO ; résultats de la première campagne.
39	Annexe 2 : Essais sur le convertisseur LD-KALDO ; résultats de la seconde campagne.
73	Annexe 3 : Description de la station de mesure installée à l'aciérie LD-AC de Chertal (Cockerill).
153	Annexe 4 : Détermination de la vitesse de décarburation par mesure de la température des fumées.
179	Annexe 5 : Comportement dynamique du convertisseur 1 de l'aciérie LD-AC de Chertal (COCKERILL).
207	Annexe 6 : Enseignements tirés d'une campagne de prélèvements d'échantillons de métal et de scorie en cours de soufflage LD-AC Phase 1.

Introduction

Les buts poursuivis par la présente recherche ont été définis dans la convention 6210-23-2-021 signée entre la CECA et le C.R.M. Celle-ci stipule que la recherche comporte trois parties, à savoir :

- essais d'extrapolation et études des caractéristiques du débordement de la scorie produite dans une cornue LD-KALDO de l'usine Cockerill-Ougrée-Providence à Marchienne-au-Pont ;
- essais de soufflage avec et sans débordement sur le convertisseur expérimental du C.R.M. (fonte hématite).
- étude sur convertisseur industriel LD-AC classique, équipé de capteurs de mesures, de la société Espérance-Longdoz à Chertal, des réactions métallurgiques avant débordement ; recherches sur le recyclage de la scorie retenue dans le convertisseur.

Dans la présente introduction, nous résumons les travaux effectués et les résultats obtenus. Le lecteur trouvera les détails dans les six rapports repris en annexe.

A. ESSAIS SUR LE CONVERTISSEUR LD-KALDO

Rappelons d'abord que des essais effectués en 1963 par le C.R.M. sur sa cornue expérimentale avaient montré qu'en effectuant un décrassage au cours de l'affinage des fontes phosphoreuses, il était possible de convertir ces fontes en une seule phase et d'atteindre des productivités équivalentes à celles de l'affinage des fontes hématites. Les résultats métallurgiques obtenus étaient semblables à ceux du procédé LD-AC en deux phases avec décrassage intermédiaire.

Avant de pouvoir porter un jugement valable sur ce procédé, il était indispensable d'effectuer des essais similaires sur une cornue industrielle.

Une demande d'aide financière fut introduite auprès de la Haute Autorité de la C. E. C. A. qui marqua son intérêt pour une telle recherche et accorda l'aide demandée.

Des contacts furent pris avec différentes aciéries, tant au Benelux que dans les autres pays de la C. E. C. A. en vue de trouver une cornue suffisamment inoccupée pour pouvoir servir aux essais.

Toutes les usines contactées ayant un besoin urgent d'acier à l'oxygène, il ne fut pas possible d'arriver à, un accord.

Les brevets du C. R. M. prévoyaient plusieurs modalités pour effectuer le décrassage continu, parmi lesquelles les deux suivantes semblaient particulièrement intéressantes:

- Percée d'un trou de débordement au-dessus de la ceinture: cette solution avait été utilisée sur le convertisseur expérimental.
- Basculement du convertisseur et de sa lance en position inclinée (par exemple à 45°) de façon à permettre un écoulement de la scorie par le bec sans interrompre le soufflage.

Cette dernière solution pouvait très bien être simulée sur le convertisseur LD-KALDO de COCKERILL-Marchienne. En effet, il était possible

- de former la scorie mousseuse en position verticale,
- de continuer le soufflage en position KALDO (la scorie déborde),
- et de terminer le soufflage de nouveau en position verticale.

COCKERILL-Marchienne voulut bien mettre sa cornue LD-KALDO à la disposition du C.R.M. pour effectuer une trentaine de coulées.

Au cours d'une première campagne d'essais qui eut lieu en 1967, quinze coulées furent élaborées pour mettre au point la technologie du procédé (voir annexe I). Les résultats obtenus au cours de cette phase peuvent être résumés de la façon suivante :

- 1) Les essais effectués avec des fontes phosphoreuses ont démontré la possibilité de réaliser sur une cornue industrielle un débordement continu d'une scorie vendable.
- 2) Les analyses de l'acier produit ont été comparables à celles du procédé LD-AC en deux passes. Dans certaines conditions, des teneurs particulièrement basses en soufre et en azote ont été observées.
- 3) Les rendements fer moyens ont été assez médiocres ; cependant, les facteurs grâce auxquels il devait être possible de l'améliorer ont été mis en évidence.

En 1968, une seconde campagne de 16 coulées fut entreprise (annexe 2). Elle permit d'accomplir des progrès sensibles tant au point de vue qualité qu'au point de vue rendement fer. Pour pratiquement toutes les coulées élaborées au cours de cette campagne, les teneurs finales furent égales ou inférieures à 0,017 % pour le soufre, 0,019 % pour le phosphore et 0,0020 % pour l'azote. Une désulfuration par la phase gazeuse, nettement plus élevée que celle des procédés classiques, explique les basses teneurs en soufre alors que les remarquables teneurs en azote sont à mettre en relation avec la protection continue du bain par la scorie débordante.

Il est ainsi démontré que le procédé proposé permet d'allier une haute productivité à une excellente qualité de l'acier produit.

Du fait de l'entraînement de billes métalliques par la scorie débordante et d'une scorification de fer plus élevée, le rendement fer reste inférieur d'environ 1,5 % à celui du procédé LD-AC. Par contre, la mise au mille de mitrilles est supérieure de 50 kg par tonne de fonte à celle de ce procédé.

Les essais ont montré que ce procédé exige plus que tout autre un contrôle efficace du déroulement des réactions. Ainsi seraient minimisées les pertes en fer par granules dues à des débordements parfois intempestifs.

Pour cette raison, le Comité Exécutif de la Recherche, réuni à Marchienne le 18.6.1969, donna son accord au C.R.M. de porter tout son effort sur l'étude de l'évolution des réactions au cours de l'affinage des fontes phosphoreuses. En accord avec la convention passée entre le C.R.M. et la C.E.C.A., ces essais eurent lieu sur la cornue LD-AC de l'aciérie de Chertal de la société COCKERILL. Les informations ainsi recueillies seraient non seulement indispensables pour une industrialisation éventuelle du procédé étudié mais serviraient également à un meilleur contrôle de l'affinage LD-AC.

Avant de décrire les essais effectués dans ce sens à COCKERILL-Chertal (chapitre C), nous dirons un mot de quelques coulées de débordement avec fonte hématite.

B. ESSAIS EN FONTE HEMATITE SUR CONVERTISSEUR DE 400 KG DU C.R.M.

Le C.R.M. dispose d'un four électrique de 400 kg qui en quelques minutes peut être transformé en un convertisseur LD. A cet effet, on fait pivoter le couvercle et les électrodes du four et on pose sur ce dernier un chapeau muni d'une lance à oxygène.

Afin d'obtenir des indications sur le décrassage en cours de soufflage pour les fontes hématites, 5 coulées d'essai et 5 coulées témoins de 350 kg ont été élaborées. La fonte a été fondue au four électrique et ensuite l'affinage a été opéré au moyen d'oxygène pur et de chaux en morceaux. Pour les coulées avec décrassage au cours de soufflage, le débordement de scorie a été effectué par la porte du four électrique.

L'analyse moyenne de la fonte s'établissait comme suit :

C	=	4,300 %
Si	=	0,600 %
P	=	0,066 %
S	=	0,022 %
Mn	=	0,600 %

VII

Les enfournements des dix coulées ont été identiques et ils s'établissent comme suit :

Fonte	: 350 kg
Mitrailles	: 18 kg
Chaux	: 22,5 kg
Spath	: 1,3 kg

Les essais ont montré que tout comme pour la fonte phosphoreuse, il est possible d'obtenir un débordement continu de scorie au cours du soufflage. Il importe de provoquer le moussage suffisamment tôt ce qui signifie qu'il faut veiller à ce que la dissolution de la chaux s'effectue sans retard.

La comparaison des analyses d'acier confirme l'amélioration des résultats métallurgiques grâce au décrassage en cours de soufflage.

	Nombre	Analyse en fin d'affinage		
		P (10^3)	S (10^3)	N (10^4)
Coulées témoin	5	10,6	12,3	58
Coulées débordement	5	7,2	11,5	30

Les scories débordées titraient en moyenne 20 % de fer.

Comme pour la fonte phosphoreuse, les analyses de phosphore, soufre et azote sont améliorées. Les teneurs en azote sont assez élevées du fait que la porte du four électrique a été ouverte à plusieurs reprises pour prendre des échantillons. Il se confirme néanmoins que le moussage abondant nécessaire au débordement protège le bain contre les entrées d'azote.

Ces résultats démontrent l'intérêt de l'emploi de scories transitoires lors de l'affinage des fontes hématites.

C. ESSAIS SUR LE CONVERTISSEUR DE 150 T DE COCKERILL CHERTAL

Rappelons que les essais sur le convertisseur LD-AC visaient à mieux connaître l'évolution des réactions métallurgiques au cours du soufflage. Le but final est la mise au point d'une technique efficace de contrôle de l'affinage.

C1 - Station de mesures (annexe 3).

Afin de suivre l'évolution des réactions dynamiques métallurgiques, il était nécessaire de doter le convertisseur étudié du plus grand nombre possible de capteurs de mesure ; il fallait également se mettre en mesure d'enregistrer simultanément les données de manière à pouvoir les traiter à posteriori sur ordinateur.

Une cabine de mesures a été installée au niveau du bec du convertisseur ; tous les signaux de mesures énumérés ci-dessous y étaient concentrés et enregistrés sur data logger à raison d'un cycle complet de scrutation toutes les 3 secondes:
Mesures effectuées :

Débit et pression d'oxygène à la lance

Hauteur de lance

Analyse des fumées (CO, CO₂, O₂, H₂O)

Débit des fumées

Température des fumées

Pression des fumées dans la hotte

Poids de chaux fine injectée

Poids des autres additions

Emission acoustique du convertisseur

Rayonnement de la flamme.

Une attention toute particulière a été apportée d'une part à la conduite du débit de chaux, dont les fluctuations s'étaient révélées préjudiciables à l'étude de la dynamique du processus, et d'autre part, à la précision de mesure des grandeurs intervenant dans le calcul de la vitesse de décarburation (analyse des gaz et débit des fumées).

Un premier résultat de cet effort est la mise en évidence d'une relation serrée entre la vitesse de décarburation et la température des fumées (annexe 4). Cette relation permet de concevoir un capteur rapide et précis de la vitesse de décarburation dans lequel la température des fumées (capteur rapide) est corrigée constamment par l'analyse des gaz (capteur précis).

C2 - Etude du comportement dynamique du processus (annexe 5)

Trois campagnes de perturbations ont été effectuées. Au cours de deux d'entre elles, les perturbations étaient forcées : l'opérateur maintenait constants le débit d'oxygène et la hauteur de lance pendant 2 minutes, puis il modifiait volontairement l'une de ces deux grandeurs ; ce nouvel état était maintenu pendant une nouvelle période de deux minutes, puis une nouvelle variation était produite.

Au cours de la troisième campagne, aucune perturbation systématique n'a été effectuée mais les perturbations naturelles ont été observées.

Pour ces différentes périodes, les fonctions de transfert optimales ont été recherchées pour les liaisons "débit d'O₂ - vitesse de décarburation" et "hauteur de lance - vitesse de décarburation".

Parmi 5 types de filtres utilisés pour traiter les données, deux ont été retenus sur la base des résultats obtenus, à savoir :

- un filtre du premier ordre,
- un ensemble de deux filtres du premier ordre, en structure parallèle (réponse de type inverse).

De ces essais, on peut conclure que

- l'effet premier des grandeurs d'action sur le convertisseur est quasi-immédiat (délai de 0 à 3 secondes) ;
- la mise en évidence d'une réponse de type inverse est conforme à l'idée suivant laquelle, une fois perturbé, un convertisseur serait soumis à des oscillations amorties, qui tendent à le ramener à un nouvel état stable ;
- les gains statiques observés croissent au cours de la première phase de l'opération ;
- quand la hauteur de lance est supérieure à 3 mètres, les valeurs des gains statiques chutent fortement ;
- une relation a pu être mise en évidence entre le gain statique Δ vit. décarb./ Δ QO2 et les valeurs estimées des teneurs en oxygène et en fer de la scorie. Toute variation de QO2 entraîne une modification des caractéristiques du jet et influe sur l'émulsion ; toutefois, une même variation conduit à un gain statique plus élevé lorsque la scorie est pauvre en fer.

C3 - Etudes métallurgiques (annexe 6)

Au cours des campagnes de mesures ci-dessus, un effort particulier fut également fait du côté des analyses du métal et de la scorie. En plus des échantillons de fonte en poche, d'acier et de scorie aux différents rabattements, des prélèvements de métal et de scorie ont été effectués après enfournement de la fonte et en cours de soufflage sans interrompre celui-ci.

Il a ainsi été possible d'étudier les réactions entre la scorie retenue et la fonte lors de l'enfournement et de suivre l'évolution des principales réactions tout au long de l'affinage.

Il va sans dire que la mise au point d'un dispositif permettant d'effectuer des prélèvements répétés au cours de l'affinage dans un convertisseur LD-AC a nécessité une longue mise au point.

Pour ce qui est des réactions à l'enfournement, il apparaît que les variations de l'analyse de la fonte sont assez dispersées et il est difficile d'en déterminer l'ampleur à l'avance ; de plus, on doit craindre qu'après versage de la fonte, la composition de celle-ci ne soit pas homogène. Ceci complique évidemment le contrôle de l'affinage du fait que l'on connaît mal le point de départ.

Les prélèvements effectués en cours de soufflage ont montré que l'évolution de la composition du bain est étroitement liée à celle de la scorie. Il a été possible de mettre en évidence comment les conditions de soufflage affectent le partage de l'oxygène entre le carbone et la scorie.

L'application des résultats que nous avons obtenus permet de définir les évolutions optimales de la réaction de décarburation et de l'oxydation de la scorie qui conduisent de façon reproductible aux meilleurs résultats métallurgiques tout en évitant des incidents.

Conclusions

On peut affirmer que les objectifs de la recherche ont été atteints. En effet :

- il a été possible de vérifier sur un convertisseur industriel de 35 t que le procédé d'affinage des fontes phosphoreuses en une phase avec décarburage en cours de soufflage conduit à d'excellents résultats métallurgiques tout en améliorant la productivité par rapport aux procédés en deux phases.

Avant de juger définitivement le procédé, il conviendrait cependant d'effectuer des essais sur un convertisseur spécialement conçu pour cette technique ; ceci permettrait notamment de comparer l'usure de réfractaires à celle du procédé LD-AC classique.

- les essais de mesure et de prélèvement sur un convertisseur LD-AC de 150 tonnes ont permis d'acquérir un grand nombre de nouvelles connaissances quant à l'évolution des réactions en relation avec les variations de la hauteur de lance et du débit d'oxygène. Ces connaissances facilitent la mise au point d'une stratégie de contrôle de l'affinage des fontes phosphoreuses. Elles sont non seulement utiles pour la maîtrise du débordement mais elles intéressent tout autant les aciéristes LD-AC préoccupés de l'optimisation de leur processus.

+

+

+

AFFINAGE DES FONTES PHOSPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

ESSAIS SUR LE CONVERTISSEUR LD-KALDO

Rapport Technique
relatif à la première campagne

par

P. NILLES P. DAUBY E. DENIS



TABLE DES MATIERES.

<u>ESSAIS AVEC DECRASSAGE EN COURS DE</u>	<u>Pages</u>
<u>SOUFFLAGE SUR LA CORNUE LD-KALDO.</u>	
<u>I. GENERALITES</u>	4
<u>II. RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES</u>	6
1. <u>Analyse du métal en fin d'affinage</u>	6
a) <u>Phosphore</u>	6
b) <u>Désulfuration</u>	8
c) <u>Relation carbone oxygène</u>	9
d) <u>Teneur en azote</u>	9
2. <u>Analyse de la scorie qui déborde</u>	10
<u>III. RESULTATS OPERATIONNELS</u>	10
1. <u>Enfournements</u>	11
2. <u>Bilan fer</u>	12
a) <u>Entraînement de granules de fer</u>	12
b) <u>Scorification du fer</u>	13
c) <u>Conclusion</u>	13
3. <u>Bilan thermique</u>	14
a) <u>Comparaison LD-KALDO/Débordement</u>	14
b) <u>Comparaison LD-AC/Débordement</u>	14
<u>IV. EXEMPLE D'UNE COULEE AVEC DECRASSAGE EN COURS</u>	
<u> DE SOUFFLAGE.</u>	15
<u>V. TENUE DES REFRACTAIRES</u>	15
<u>CONCLUSIONS</u>	16

ESSAIS AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE SUR
LA CORNUE LD-KALDO.

I. GENERALITES.

Durant le second semestre de l'année 1967, quinze coulées d'essais avec décrassage en cours de soufflage ont été effectuées sur la cornue LD-KALDO de COCKERILL-UGREE-PROVIDENCE.

Une première coulée faite à titre de vérification des installations de contrôle, etc.... a été suivie de quatorze autres charges réparties sur quatre journées de travail.

1ère journée	:	4 coulées	n° 45623 à 45626.
2ème journée	:	3 coulées	n° 45690 à 45692.
3ème journée	:	3 coulées	n° 45906 à 45908.
4ème journée	:	4 coulées	n° 46018 à 46021.

La technique opératoire utilisée lors de ces essais peut être résumée par le schéma repris à la figure 1. On distingue les étapes suivantes :

- 1) Après avoir mesuré la température et prélevé un échantillon de la fonte à sa sortie du mélangeur,
- 2) on enfourne la fonte et les mitrailles, la dernière scorie de la coulée précédente étant retenue ;
- 3) on prélève un nouvel échantillon de fonte en cornue afin d'avoir une première estimation des réactions "fonte-scorie" accompagnant l'enfournement.

4) on entame alors l'affinage qui est conduit en une seule phase. Au point de vue soufflage proprement dit, cette phase peut être subdivisée en 3 périodes de travail :

- Un soufflage vertical qui correspond en quelque sorte au début de la première phase du procédé classique LD-AC et qui, une fois la scorie suffisamment mousseuse, est suivi d'un
- passage en position inclinée pendant lequel on continue à souffler de l'oxygène tout en laissant la scorie mousseuse déborder par le bec. Cette période correspond au décrassage en fin de première phase LD-AC. Pendant le débordement, on a prélevé des échantillons de scorie ; parfois même, on a interrompu le soufflage afin de prendre des échantillons de métal et de mesurer la température. Lorsque le poids de scorie débordée est jugé suffisant, on redresse la cornue et on continue le
- soufflage vertical jusqu'à la fin de l'élaboration. Ici encore, on retrouve les conditions de la seconde phase classique du procédé LD-AC; on prélève des échantillons de métal, de scorie et on mesure la température.

Pendant le débordement, la cornue est inclinée en position KALDO. Il importe que pendant cette période la décarburation ne soit pas ralentie. Or, la lance KALDO cylindrique a un diamètre de 90 mm et le débit d'oxygène est de 80 Nm³/min. La vitesse de l'oxygène à la sortie de la lance, qui correspond à ces conditions de soufflage est égale à 210 m/sec. Un tel jet n'est pas susceptible d'activer à lui seul la décarburation.

En effet, la figure 2 montre la disposition de la lance de soufflage, de la cornue et du niveau du bain en position inclinée. L'extrémité de la lance se trouve à 1,80 m du niveau du bain suivant l'axe du jet. Dans ces conditions, le jet pénètre jusqu'à une profondeur qui représente seulement 65 % de l'épaisseur de la couche de scorie. Le poids de cette scorie est estimé à 6,5 t ou à 0,75 t/m² de surface du bain métallique en position inclinée(3).

(3) La pénétration du jet a été calculée à partir de relations qui tiennent compte du débit d'oxygène, de la géométrie de la tuyère et de la hauteur de lance (cf. E. DENIS, Metallurgical Reports, C.N.R.M. n° 8, 1966, pp. 17-23).

On en conclut que, même si le poids de scorie devait être moins important ou la force de pénétration du jet plus grande, le jet ne pourra jamais pénétrer jusqu'à une profondeur suffisante du métal pour y entretenir les réactions comme dans le procédé LD-AC.

Il en résulte donc la nécessité de recourir à une rotation modérée de la cornue afin de remédier à l'inefficacité du jet de la lance KALDO.

II. RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES.

1. Analyse du métal en fin d'affinage.

Les essais du procédé avec décrassage en cours de soufflage ont donc été effectués sur la cornue LD-KALDO. Il est important de remarquer à ce sujet que cette cornue ne possède pas de trou de coulée. Ceci nous a amené à devoir adopter la technique de blocage du laitier propre à cette cornue. Avant la mise en poche, on stabilise le laitier restant en cornue par des ajoutes de chaux tout en soufflant l'oxygène. Ceci a évidemment pour effet d'améliorer l'analyse de l'acier liquide avant coulée de sorte que l'analyse de l'acier au bassin ne pourra pas être considérée comme représentative d'essais qui seraient effectués sur une cornue purement verticale. Notre examen se limitera donc aux résultats en fin de soufflage.

a) Phosphore.

Lors des premières coulées, les teneurs en phosphore étaient assez élevées. Au fur et à mesure que les opérateurs se familiarisaient avec la nouvelle technique, les résultats se sont cependant considérablement améliorés ; la figure 3 montre cette diminution de la teneur en phosphore qui, comme il fallait s'y attendre, va d'ailleurs de pair avec la teneur en P_2O_5 de la scorie finale. Au vu de cette figure, on peut dire que lors de la première journée, la quantité de scorie décrassée était insuffisante. Lors de la quatrième journée d'essais, la teneur en P_2O_5 était la plus basse et la teneur moyenne en phosphore à l'arrêt était de 0,020 %.

A titre de comparaison, nous signalerons les résultats moyens d'une série de coulées en deux phases, exclusivement verticales réalisées en 1965 sur la même cornue (4). Pour cette série tout comme pour nos essais, on a utilisé uniquement de la chaux en roche.

La teneur en phosphore des coulées en deux phases était de 0,022 % en moyenne à l'arrêt final pour une teneur en fer de la scorie de 29 %. Elle était donc tout à fait comparable aux coulées avec débordement.

Pour les coulées en deux phases, le rapport entre le phosphore obtenu (P_a) et le phosphore en équilibre avec la scorie ($P_{\text{éq}}$) était de 1,93. Pour les coulées avec débordement, le rapport $P_a/P_{\text{éq}}$ était de 1,84 en moyenne lors de la quatrième journée. L'équivalence entre les deux procédés se manifeste donc aussi ici.

Les écarts à l'équilibre que nous venons de citer sont relativement élevés si on les compare à ceux de l'aciérie LD-AC de Chertal où le rapport $P_a/P_{\text{éq}}$ est de 1,4 en moyenne (5).

Deux facteurs peuvent expliquer cette différence :

- Le volume spécifique de la cornue LD-KALDO n'est que de 0,63 m³/t sur revêtement neuf, ce qui est défavorable à un moussage abondant de la scorie et à une bonne déphosphoration finale.
- Tant pour les coulées en deux phases que pour les coulées avec débordement, les opérateurs de MARCHIENNE manquent de pratique du fait qu'ils se servent toujours de la rotation en fin d'affinage.

Au vu des résultats que nous avons déjà obtenus lors des quelques coulées effectuées, nous pensons pouvoir affirmer qu'il sera possible d'atteindre pour le procédé avec décrassage en cours de soufflage, des teneurs en phosphore équivalentes à celles obtenues pour le procédé classique en deux phases avec décrassage intermédiaire.

(4) J. LEDUNE et P. NILLES,
Journal of Metals - April 1966 - pp. 485/490.

(5) J.P. COHEUR et P. NILLES,
Metallurgical Reports C.N.R.M. - n° 12 - Septembre 1967, pp.43/56.

b) Désulfuration.

Sur la figure 4, nous avons porté le rapport $(S)/[S]$ en fonction de l'excès de base dans la scorie. La même figure reprend également cette relation telle qu'elle a été trouvée pour les procédés LD, LD-AC, LD-KALDO et Thomas (5). On voit que les coefficients de partage du soufre obtenus au cours de nos essais correspondent bien à la droite théorique de Grant et Chipman (6) et qu'ils ne semblent pas moins bons que ceux du procédé LD-AC classique avec chaux en poudre.

La figure 5 reprend la courbe de fréquence des teneurs en soufre réalisées jusqu'à présent. Sur la même figure, nous avons reporté les fréquences cumulées des teneurs en soufre de la fonte.

Le tableau suivant indique les moyennes des teneurs en soufre de la fonte et de l'acier élaboré, ainsi que les mises de chaux des quatre journées d'essais.

Journée	% S _{Fonte}	% S _{Acier}	Chaux kg/TA
1	0,034	0,017	112
2	0,031	0,010	104
3	0,043	0,025	106
4	0,044	0,025	95
Total	0,040	0,020	104 (*)

La désulfuration est en moyenne de 50 %, ce qui peut être considéré comme normal pour de la chaux en roche. Soulignons les excellentes teneurs en soufre réalisées lors de la seconde journée (0,010). Ce point mérite d'être examiné au cours des prochains essais.

(6) GRANT et CHIPMAN,
Sulphur Equilibria between Liquid Iron and Slags,
Trans. A.I.M.E., 1946, V. 167, pp. 134-154.

(*) Chaux à 88 % CaO

c) Relation carbone oxygène.

Tous les procédés d'affinage à l'oxygène pur donnent lieu en fin d'affinage à des relations hyperboliques entre les teneurs en carbone et en oxygène. Citons notamment les procédés LD, LD-AC, LD-KALDO (5) et également l'affinage continu de l'IRSID (7).

La figure 6 montre que le procédé avec débordement ne fait pas exception à la règle. Les points expérimentaux se placent en effet autour des courbes que nous avons déterminées précédemment pour les procédés LD-KALDO et LD-AC (5).

En ce qui concerne la relation entre l'activité de l'oxyde de fer et le carbone (figure 7), nous avons porté nos points autour de la droite trouvée par l'IRSID pour l'affinage continu (7). On observe une très bonne concordance entre les résultats obtenus de part et d'autre.

d) Teneur en azote.

La figure 8 représente les fréquences cumulées des teneurs en azote observées en fin d'affinage.

La valeur médiane s'élève à 18.10^{-4} % et la moyenne à 20.10^{-4} %.

Récemment, le C.N.R.M. a comparé entre eux les différents procédés d'affinage en ce qui concerne l'azote (5) et il avait observé pour tous les procédés travaillant en fonte phosphoreuse des teneurs moyennes de 0,0025 %.

Il est bien possible que le fait de supprimer l'arrêt intermédiaire soit favorable à la teneur en azote.

Signalons encore qu'au cours de la deuxième journée qui était particulièrement favorable au point de vue désulfuration, les teneurs en azote de l'acier à l'arrêt étaient toutes comprises entre 0,0015 et 0,0018 %.

(7) cf. Rapports IRSID pour le Comité Exécutif (RC 21 - Février 1968).

2. Analyse de la scorie qui déborde.

Les essais sur la cornue expérimentale avaient montré que si la formation de la scorie est bien contrôlée, il est possible de faire déborder une scorie dont la teneur en fer n'est pas trop élevée et dont la teneur en P_2O_5 est suffisante pour les besoins agronomiques.

Sur la figure 9a, nous avons représenté les analyses des scories prélevées au cours du débordement sur la cornue LD-KALDO. Les valeurs moyennes des quatre journées ont été indiquées sur la figure 9b. Sur ces deux figures, nous avons également reporté la droite établie lors des essais sur la cornue expérimentale.

Pour les journées 1, 3 et 4, l'accord est très bon entre les essais industriels et les essais sur petite cornue.

Lors de la deuxième journée, les conditions de travail ont été nettement plus oxydantes que sur la cornue expérimentale. Ceci pourrait expliquer les excellents résultats obtenus tant au point de vue soufre qu'au point de vue azote.

Il est remarquable de constater que les teneurs en P_2O_5 ont été très élevées au cours de la deuxième journée, malgré les teneurs élevées en fer.

On conçoit qu'une étude théorique poussée soit nécessaire pour définir les conditions de soufflage qui conduisent aux meilleurs résultats à tous les points de vue.

III. RESULTATS OPERATIONNELS.

Notons tout d'abord que les essais effectués jusqu'à présent sont à considérer essentiellement comme des essais d'orientation. Les résultats que nous parcourrons ci-dessous ne sont donc que provisoires et visent à mettre en évidence les points à retenir pour les essais ultérieurs.

Dans le chapitre ci-dessous, nous examinerons tout d'abord les enfournements avec leurs mises au mille puis, après avoir analysé les bilans fer et thermique, nous donnerons le détail d'une charge.

1. Enfournement.

On trouvera aux figures 10A à 10C les diagrammes de fréquence des mises au mille fonte, mitrailles, et également chaux, réalisées au cours de nos essais.

Le tableau 1 compare les principales mises au mille réalisées pendant les essais avec celles correspondant à des élaborations LD-AC 2 phases (type Dudelange) ou LD-KALDO en une phase (MARCHIENNE).

Pour la comparaison exacte des mises au mille de mitrailles, il faut tenir compte du fait que lors de nos essais, nous ne disposions pas de la priorité par rapport aux cornues Thomas, dans lesquelles la cornue LD-KALDO est imbriquée, de sorte que systématiquement nous avons dû viser en fin d'élaboration des températures élevées (1660°C en moyenne) pour pouvoir attendre la poche.

Si on désire comparer les mises au mille mitraille, il est donc nécessaire de les ramener toutes à la même température de 1610°C. On arrive alors aux chiffres suivants en kg par tonne de fonte :

Débordement	470
LD-KALDO 1 phase	430
LD-AC 2 phases	385

La scorification supplémentaire de fer explique la différence observée pour les mises au mille mitrailles entre les coulées avec débordement et les coulées LD-KALDO en une phase (cf. ci-dessous, le paragraphe bilan thermique). La rapidité d'élaboration explique le gain des deux premiers procédés par rapport au procédé LD-AC.

2. Bilan fer.

Le tableau 1 indique une différence d'environ 5,5 % de rendement fer en défaveur des essais avec débordement. Ceci veut dire que pour ces derniers, on a perdu environ 65 kg de fer par tonne d'acier de plus qu'en LD-AC ou LD-KALDO.

La question qui se pose est de savoir comment on peut expliquer cette perte supplémentaire de fer et comment on pourra y remédier lors des prochains essais.

L'examen des enfournements réalisés ainsi que des analyses de divers échantillons prélevés au cours des essais indique que les pertes en fer s'expliquent de la manière suivante :

- Pertes supplémentaires par entraînement de granules de fer : 47 kg/t acier.
- Pertes supplémentaires par scorification de Fe : 18 kg/t ac

Examinons ces 2 points plus en détails.

a) Entraînement de granules de fer.

La teneur en granules de fer de la scorie décrassée étant assez élevée, nous avons décidé, pour les 5 dernières coulées, d'interrompre le soufflage immédiatement après la fin du débordement afin de prélever des échantillons de métal et de mesurer la température du bain.

Le tableau 2 résume la situation à cet instant-là.

A la figure 11, nous avons reporté en fonction de la température en fin de débordement, le poids en kg par tonne d'acier des granules de fer emportés (*). Le nombre restreint de points n'empêche cependant pas de remarquer que plus la température est basse, plus la quantité de granules est élevée. On doit penser que plus la scorie est pâteuse, plus elle entraîne de granules de fer en empêchant la déca-

(*) Ce poids a été déterminé sur la base du pourcentage de granules dans les échantillons de scorie et à partir de la quantité de scorie décrassée.

b) Scorification du fer.

Si l'on se reporte à la figure 12, qui donne, en fonction de la température en fin de débordement, la teneur en fer de la scorie, on observe que la scorification du fer, elle aussi, est défavorisée par des basses températures ; sans doute, la scorie, si elle ne peut atteindre une fluidité suffisante par une température convenable, nécessite-t-elle une scorification plus importante du fer.

c) Conclusions de l'examen du rendement fer.

Les 2 remarques ci-dessus nous font donc penser qu'il faut viser au débordement une température d'au moins 1560°C. Il semble en effet que dans ces conditions de travail, on puisse à la fois diminuer la teneur en granules et en fer oxydé de la scorie.

Lors des essais effectués jusqu'à présent, toutes les mitrilles ont été enfournées avant le soufflage, vu qu'aucune trémie à minerai n'était disponible.

Pour les essais futurs, nous réserverons une partie des additions refroidissantes pour la période de soufflage après débordement et nous espérons ainsi réduire considérablement les pertes en fer observées jusqu'à présent et améliorer d'autant le rendement de l'opération. La figure 13 relative aux cinq coulées ci-dessus mentionnées nous montre d'ailleurs quelle influence on peut attendre de la température pendant le débordement sur le rendement fer.

3. Bilan thermique.

a) Comparaison LD-KALDO/Débordement.

Nous avons dit plus haut que les mises de mitrailles pour les coulées avec débordement et les coulées LD-KALDO en une phase étaient respectivement de 470 et 430 kg/t fonte.

L'examen des bilans thermiques permet d'expliquer cette différence par les deux postes suivants :

- Augmentation de la mise de mitrailles pour les coulées avec débordement due à une scorification supplémentaire de 22 kg de fer par tonne de fonte	+ 70 kg
- Diminution de la mise de mitrailles, car temps de coulée à coulée plus long, soit une perte de 30°C environ ou en mitrailles	- 30 kg
	Différence	+ 40 kg

b) Comparaison LD-AC/Débordement.

Si on se place dans les conditions idéales, c'est-à-dire temps d'attente très courts et teneur en fer de la scorie égale à 15 %, on peut prévoir pour le procédé avec débordement une mise au mille de mitrailles de 440 kg par tonne de fonte contre 385 kg/tf pour le procédé LD-AC en deux phases.

Cette augmentation s'explique par la suppression de l'arrêt intermédiaire (20 kg/tf) et par la scorification supplémentaire de fer (35 kg de mitrailles/tf).

Rappelons que déjà sur la cornue expérimentale, nous avons trouvé une différence de 54 kg par tonne de fonte en faveur du procédé avec débordement (2).

IV. EXEMPLE DE COULEE AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE.

Le tableau III reprend tous les chiffres relatifs à la dernière coulée effectuée. Il n'appelle pas de commentaires particuliers, mais il résume bien la discussion des résultats effectuée dans le présent rapport.

V. TENUE DES REFRACTAIRE.

Il est difficile, dans l'état actuel des recherches, de donner une estimation assez représentative de la tenue des réfractaires. Le nombre de charges élaborées est en effet assez restreint.

CONCLUSIONS.

Les essais effectués au cours de la présente campagne avec les fontes phosphoreuses ont démontré la possibilité de réaliser sur une cornue industrielle un débordement continu d'une scorie vendable.

Les analyses de l'acier produit sont comparables à celles du procédé LD-AC en deux phases. Dans certaines conditions, les teneurs particulièrement basses en soufre (0,010 %) et en azote (0,0015 %) ont été observées.

Les rendements fer moyens ont été assez médiocres ; cependant, nous avons pu mettre en évidence les facteurs grâce auxquels il sera possible d'améliorer ce rendement.

Il n'est pas encore possible d'établir le prix de revient de l'acier élaboré, vu le faible nombre de coulées effectuées. Nous sommes cependant d'avis que le bénéfice réalisé grâce à l'accroissement de la productivité et à l'augmentation de la mise au mille de mitrilles sera plus élevé que les pertes financières dues à la diminution du rendement fer.

Signalons pour terminer que nos essais ont incité l'équipe qui s'occupe du procédé LD-KALDO à rechercher une productivité analogue à celle rendue possible par le débordement. Leurs efforts ont abouti à la mise au point d'une technique LD-KALDO en une phase, qui conduit à une productivité équivalente à celle du procédé LD travaillant en fonte hématite et qui permet d'élaborer l'acier à l'oxygène hors fonte phosphoreuse à un prix intéressant. C'est, pensons-nous, un aspect "marginal" de la recherche sur lequel il convient d'attirer l'attention.

T A B L E A U I.

MISES AU MILLE PAR TONNE D'ACIER LIQUIDE EN POCHE REALISEES PENDANT LES ESSAIS
ET COMPARAISON AVEC LES ELABORATIONS CLASSIQUES.

	Décrassage en cours de soufflage			LD-AC en 2 phases	LD-KALDO en 1 phase
	Moyenne	Médiane	Dernière coulée	Moyenne	Moyenne
%o Fonte	829	817	787	800	773
%o Mitrailles	358	359	366	307	335
%o chaux (*)	104	104	87	95	95
%o (Fonte + Mitrailles)	1187	1176	1153	1107	1108
%o Rendement fer (%) (**)	88,3	89	91	94,5	94,5

(*) La chaux titrait 88 % CaO et + 2,6 % SiO₂

(**) Le rendement est défini par la formule

$$\frac{\text{Poids d'acier}}{\text{Fer de la fonte (93,5\%)} + \text{Fer des mitrailles (100\%)}}$$

T A B L E A U I I.

SITUATION EN FIN DE DEBORDEMENT.

N° de coulée	T° après débordement	Scorie débordée			Métal après débordement		Acier Arrêt 10 ⁻³ % P	Rendement fer %
		kg granules	% Fe	% P ₂ O ₅	10 ⁻³ % C	10 ⁻³ % P		
46019	1495	68	24,5	14,8	1073	64	20	84
45908	1510	69	25,3	17	1625	233	31	84,9
46018	1520	66	24,9	19	716	79	25	87,4
46020	1530	51	21,4	15,7	662	36	19	88,7
46021	1550	36	20,3	17,5	437	39	17	91

T A B L E A U I I I .

EXEMPLE D'UNE COULEE AVEC DECRASSAGE DE LA SCORIE EN COURS DE SOUFFLAGE.

N° Coulée 46021	C 10 ⁻³ %	P 10 ⁻³ %	Si 10 ⁻³ %	Mn 10 ⁻³ %	S 10 ⁻³ %	N2 10 ⁻⁴ %	O 10 ⁻³ %	CaO %	SiO2 %	MnO %	P2O5 %	Fe %	T° °C	$\frac{Pd}{P_{\text{éq}}}$
Fonte en poche	3630	1850	420	140	54	8	--	--	--	--	--	--	1210	--
Scorie débordée	--	--	--	--	--	--	--	49,20	6	1,9	18,5	17,3	--	--
	--	--	--	--	--	--	--	46,10	5,7	1,6	17,4	19,5	--	--
	--	--	--	--	--	--	--	44	5,2	1,9	16,4	23,9	--	--
Métal après débordement	437	39	--	100	33	30	12	--	--	--	--	--	1550	4,03
Scorie finale	--	--	--	--	--	--	--	45,6	2,6	1,8	6,4	31,7	--	--
Arrêt	43	17	--	50	24	18	77	--	--	--	--	--	1625	1,67
Acier après stabilisation	38	11	--	40	21	23	73	--	--	--	--	--	1590	--
Acier bassin	175	23	--	610	24	48	23	--	--	--	--	--	--	--

Consommation par tonne d'acier :

Fonte	=	787 kg
Mitrailles	=	366 kg
Chaux	=	87 kg
Oxygène	=	62,5 Nm3
Rendement fer	=	91 %

MODE OPERATOIRE POUR LES COULEES AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

=====

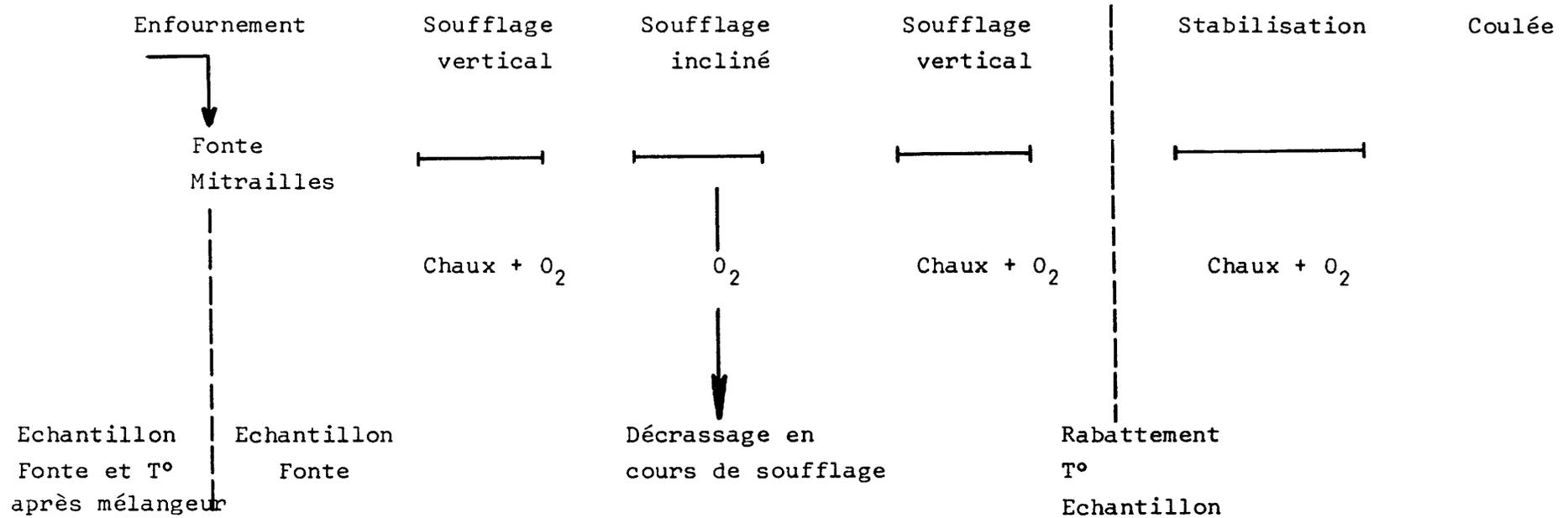


Fig. 1

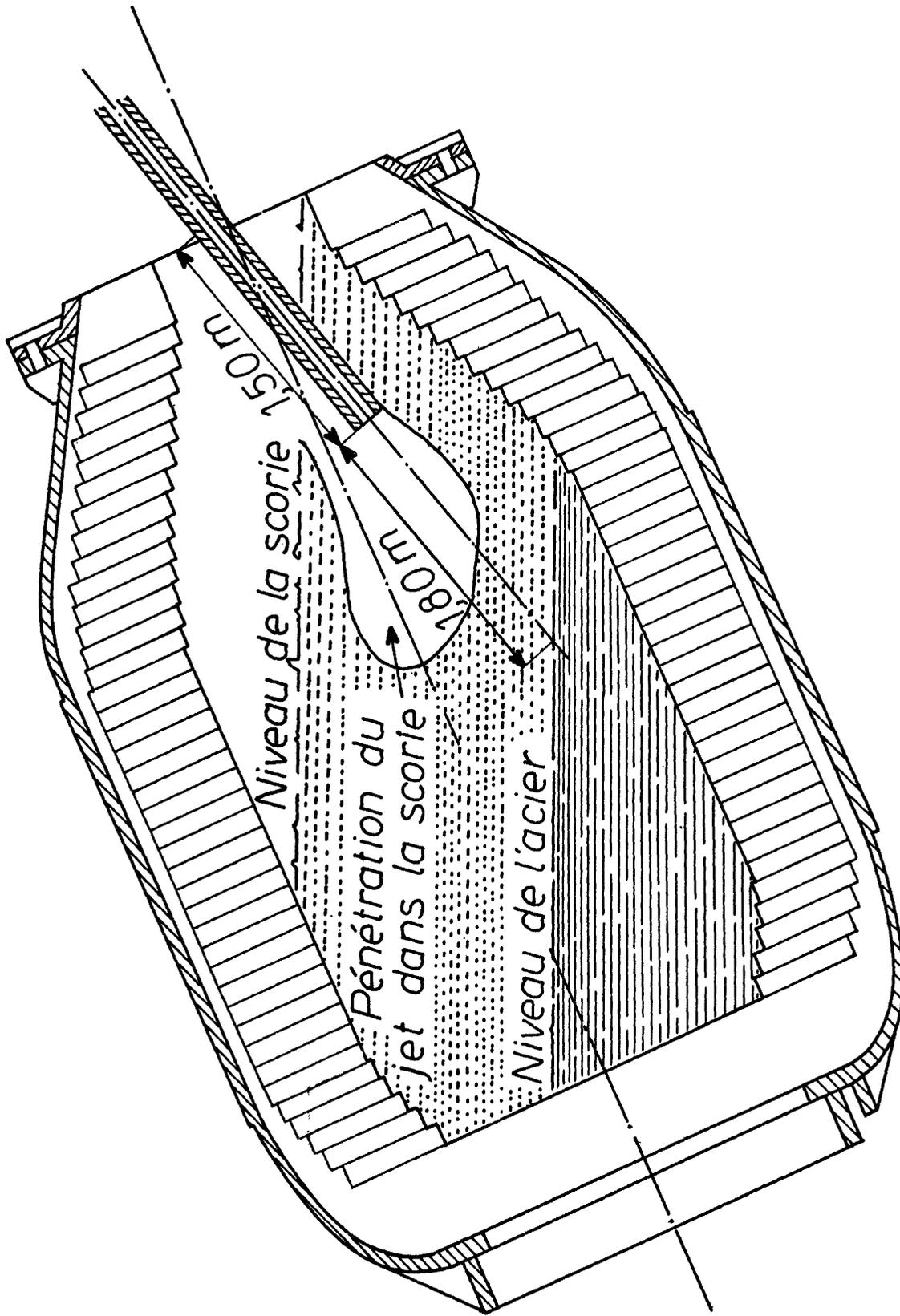


Fig. 2 : Cornue LD-KALDO de 35 tonnes en position inclinée

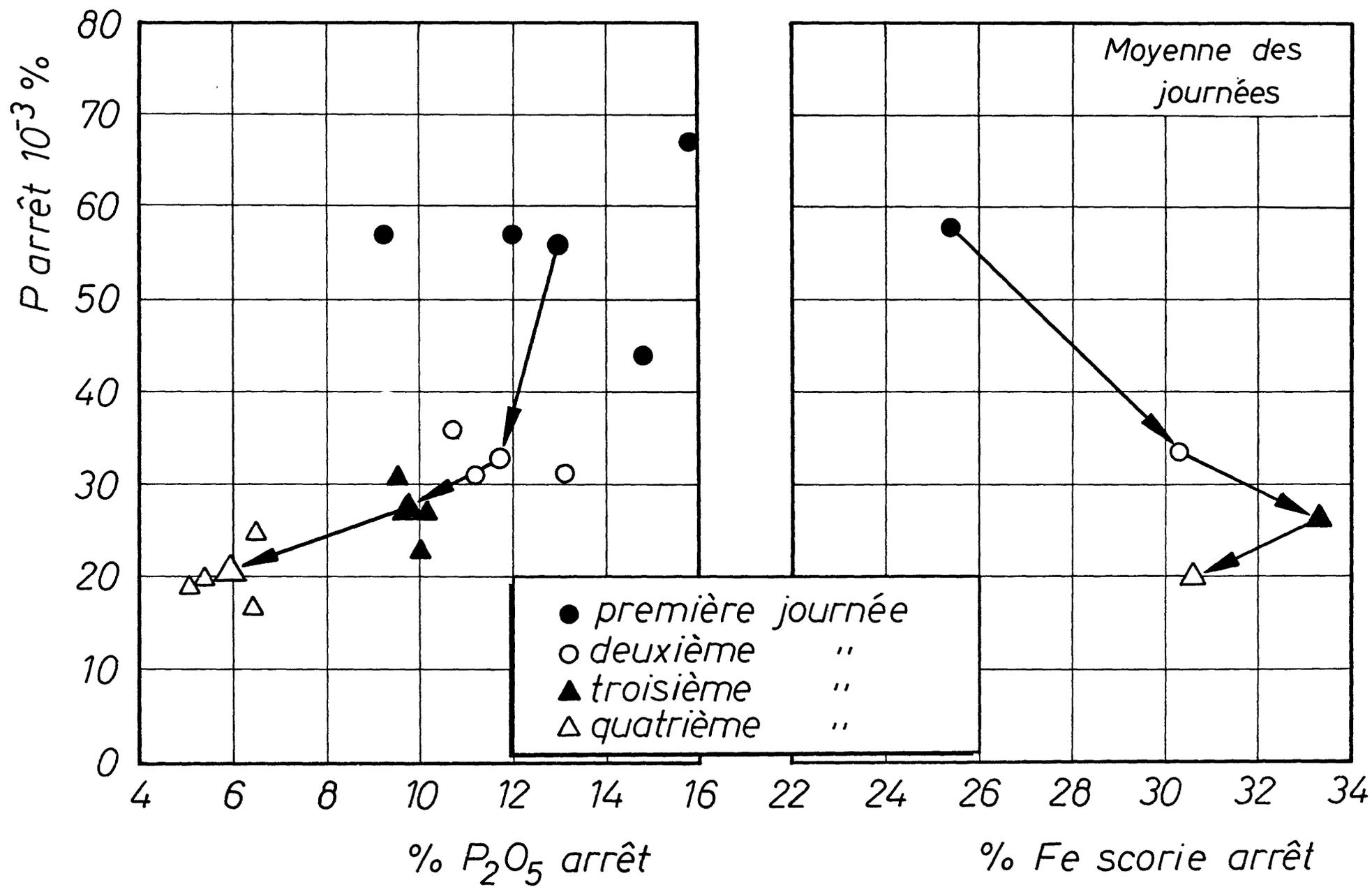


Fig.3 a

Fig.3 b

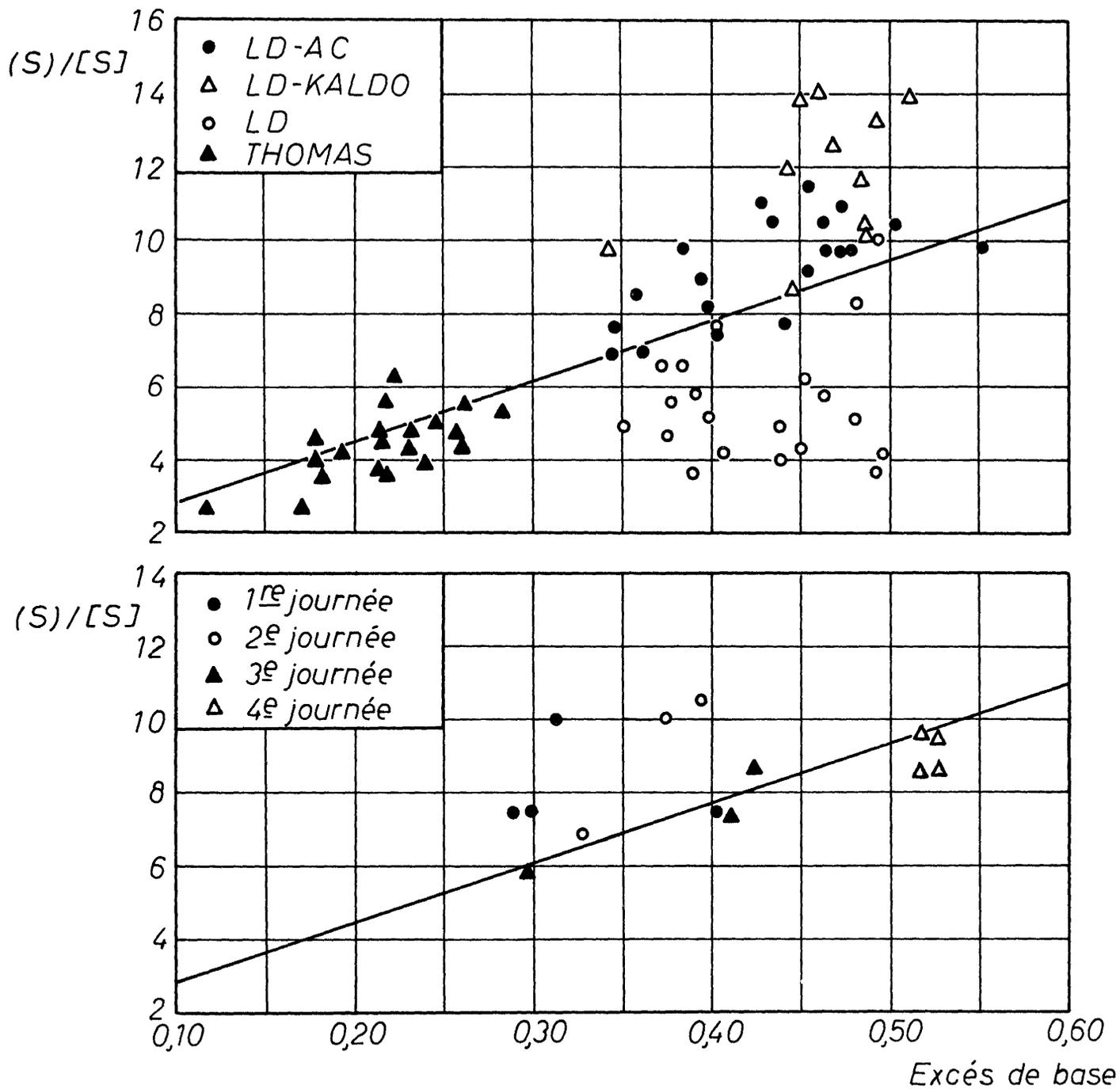


Fig. 4

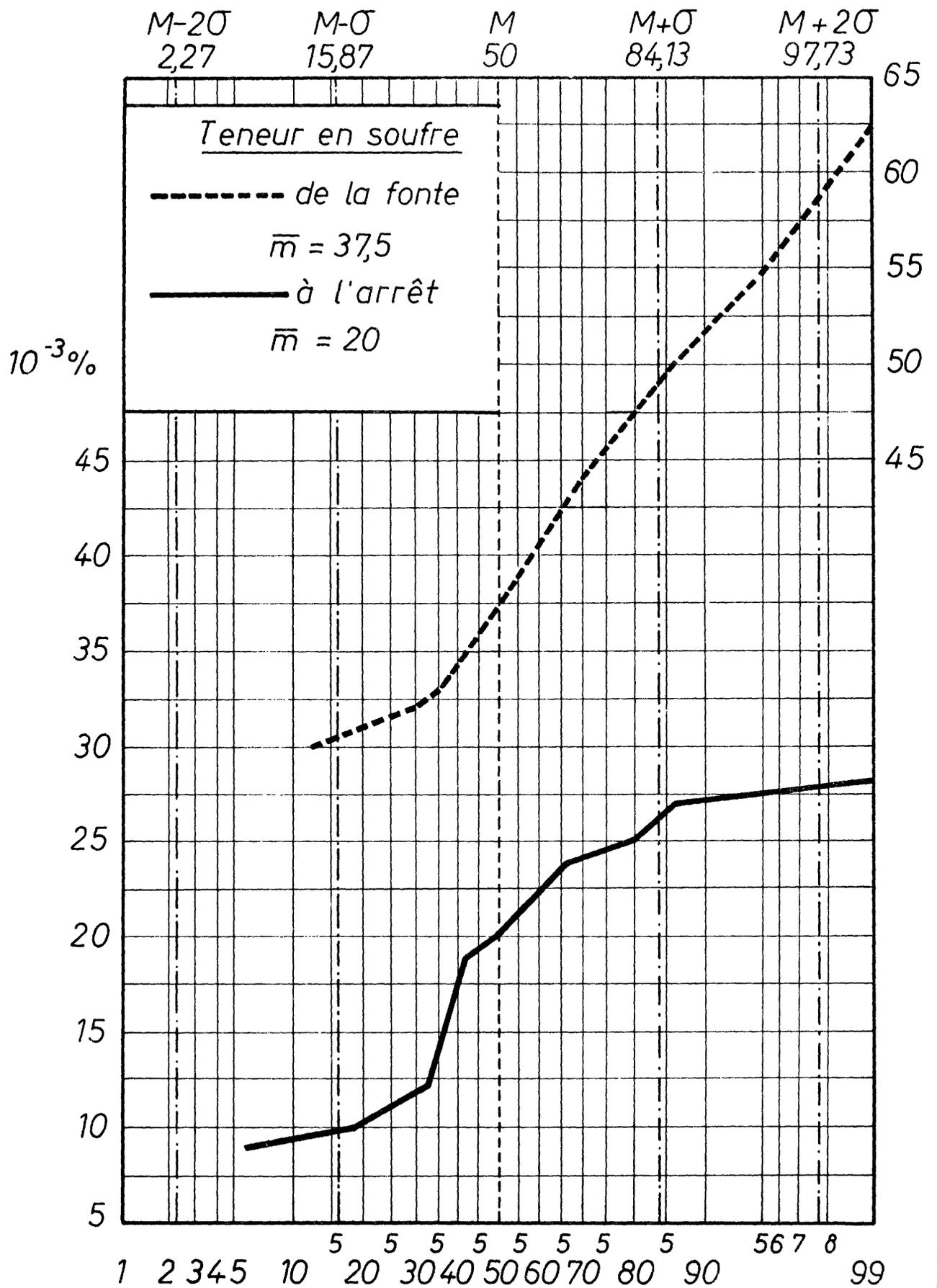


Fig. 5

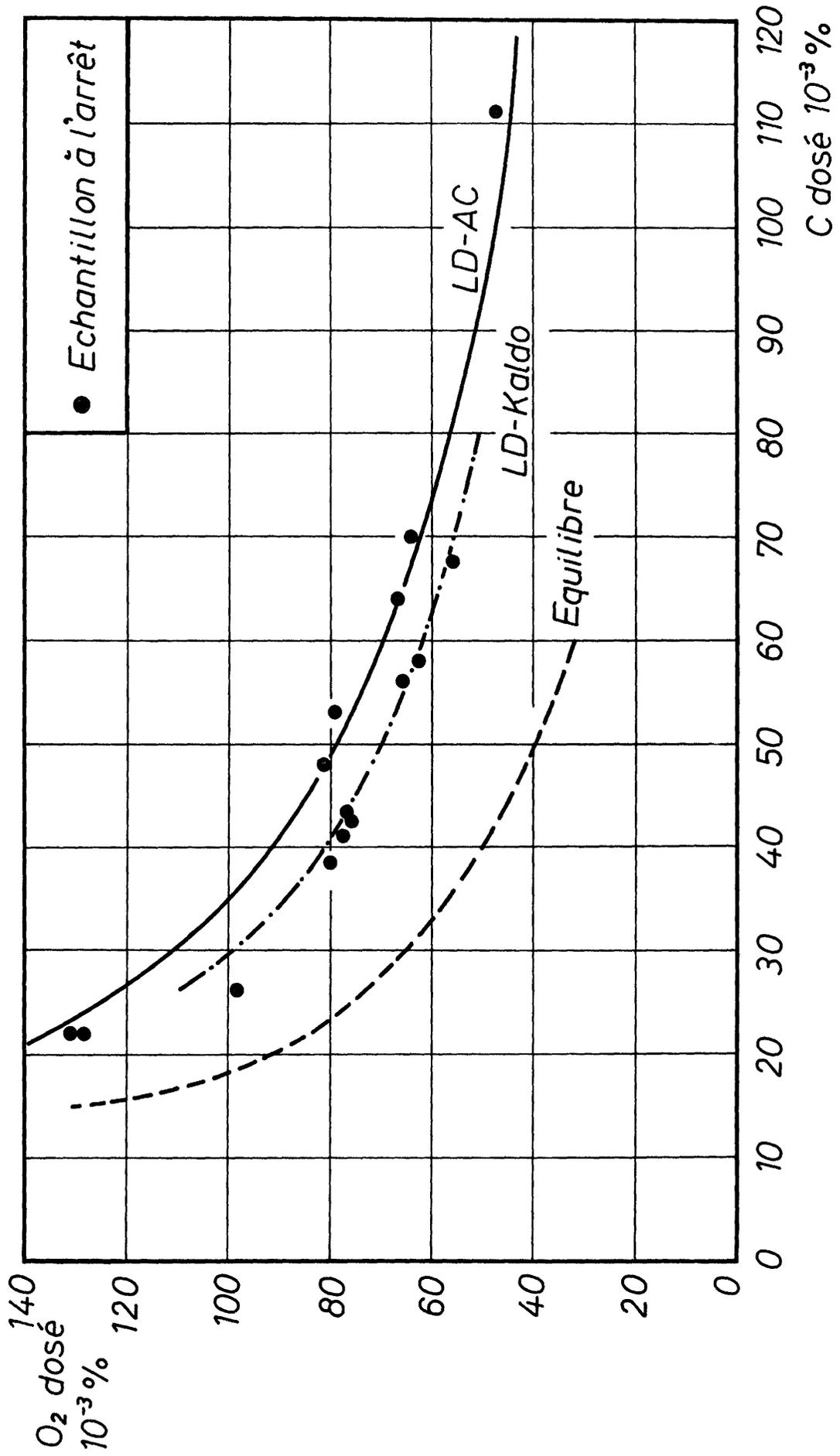


Fig.6

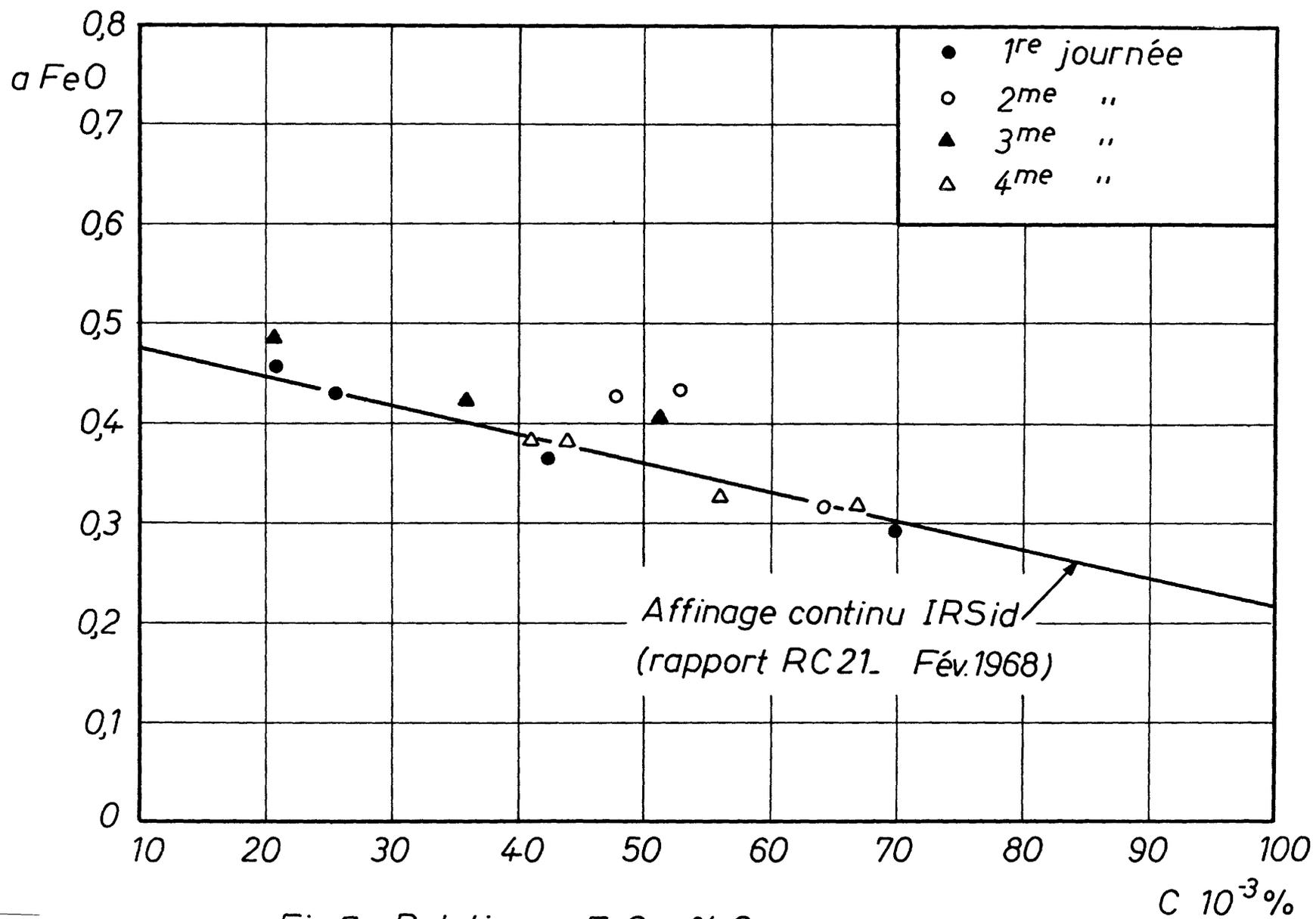


Fig. 2. Relation $a_{FeO} - \% C$

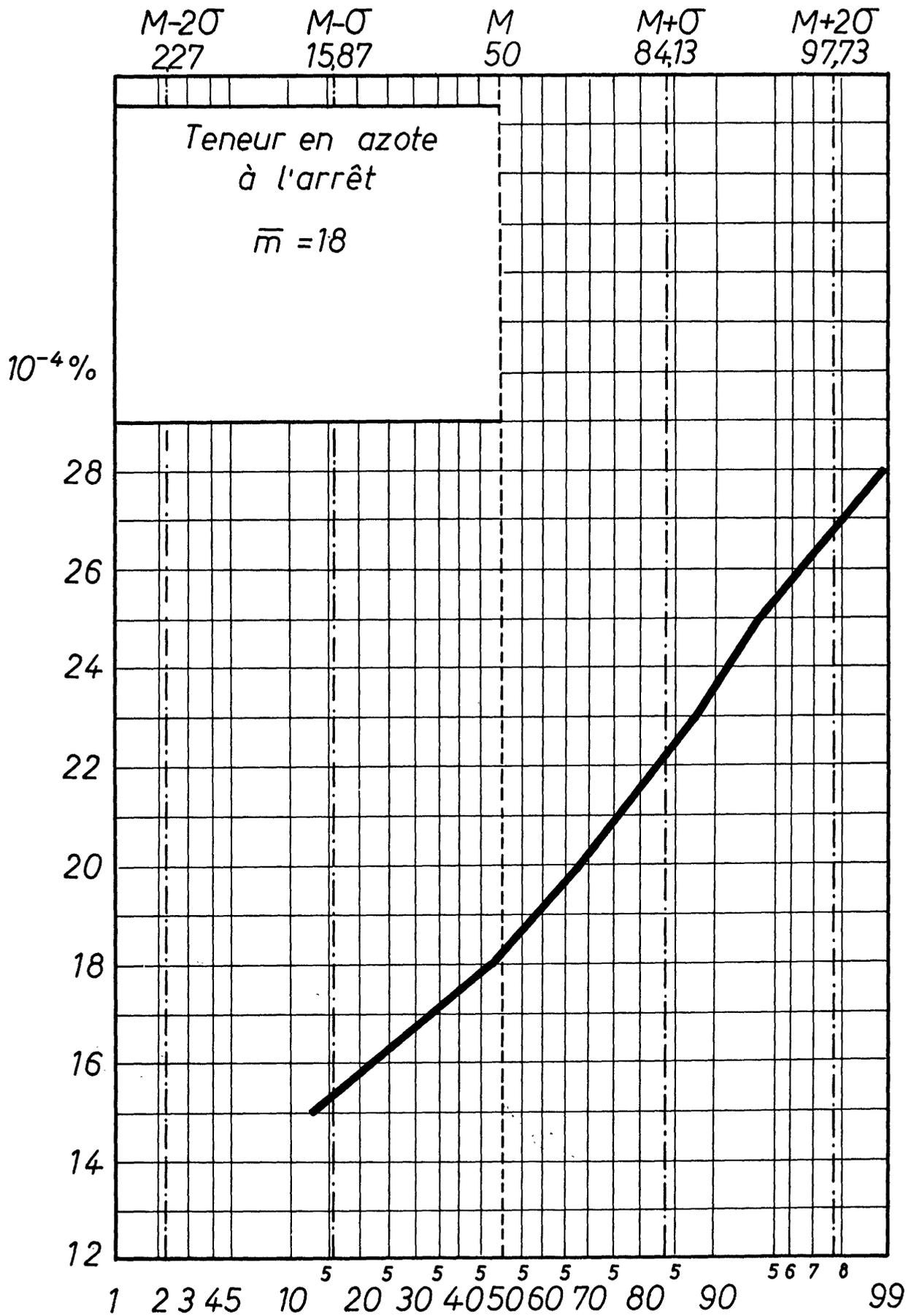
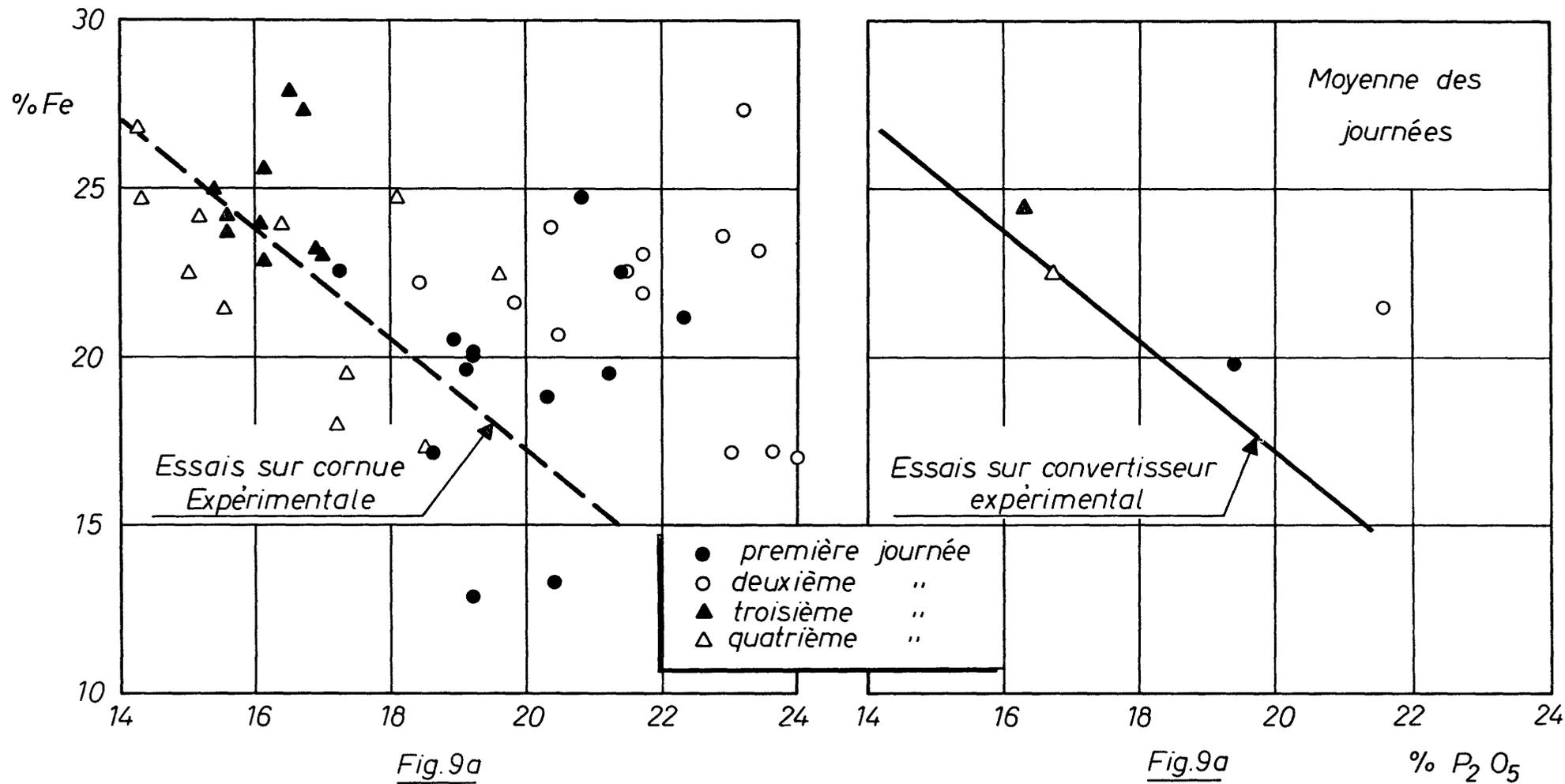


Fig.8



Relation Fe; P₂O₅ dans les scories décrassées en cours de soufflage

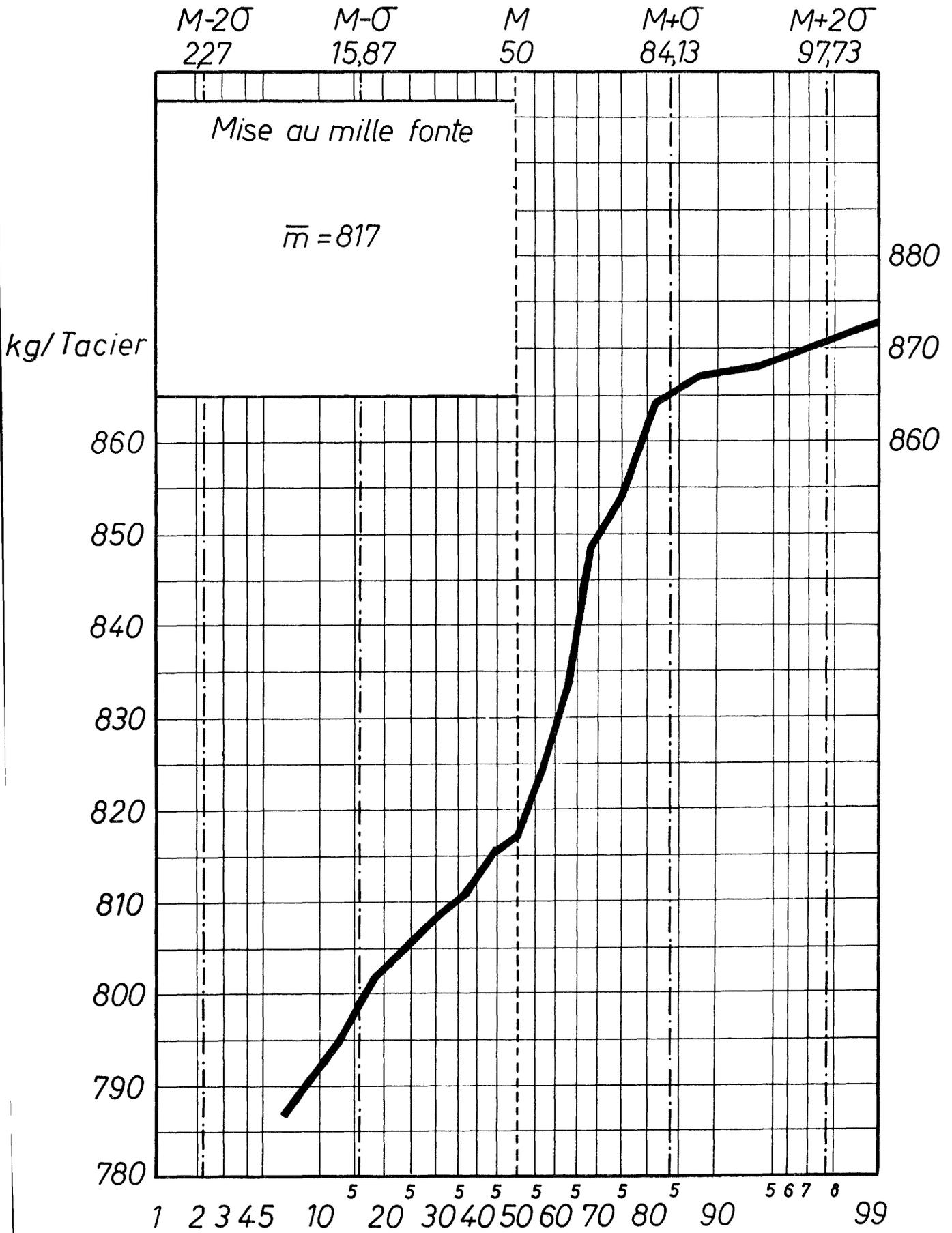


Fig.10a

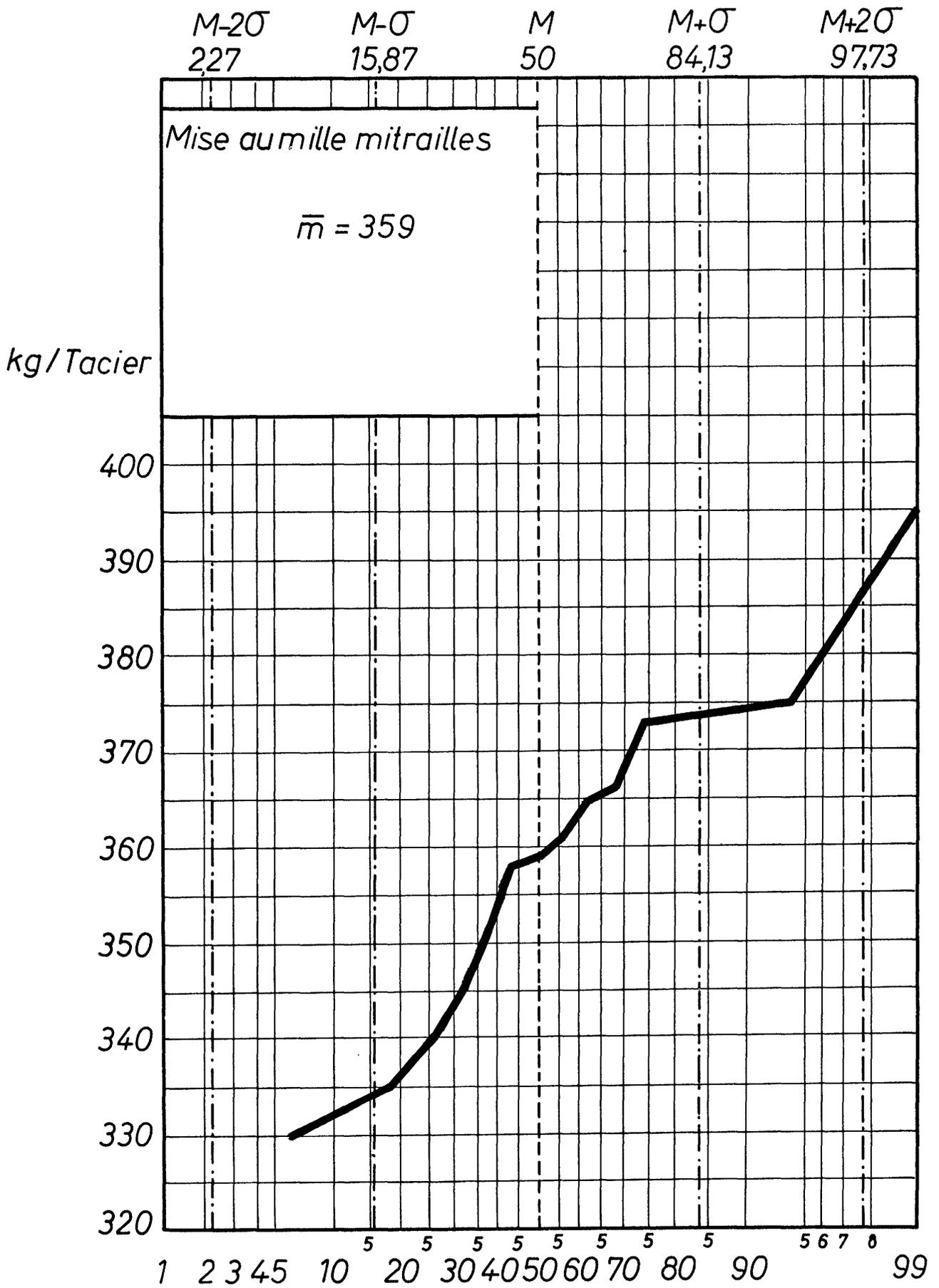


Fig. 10 b

$M-2\sigma$	$M-\sigma$	M	$M+\sigma$	$M+2\sigma$
2,27	15,87	50	84,13	97,73

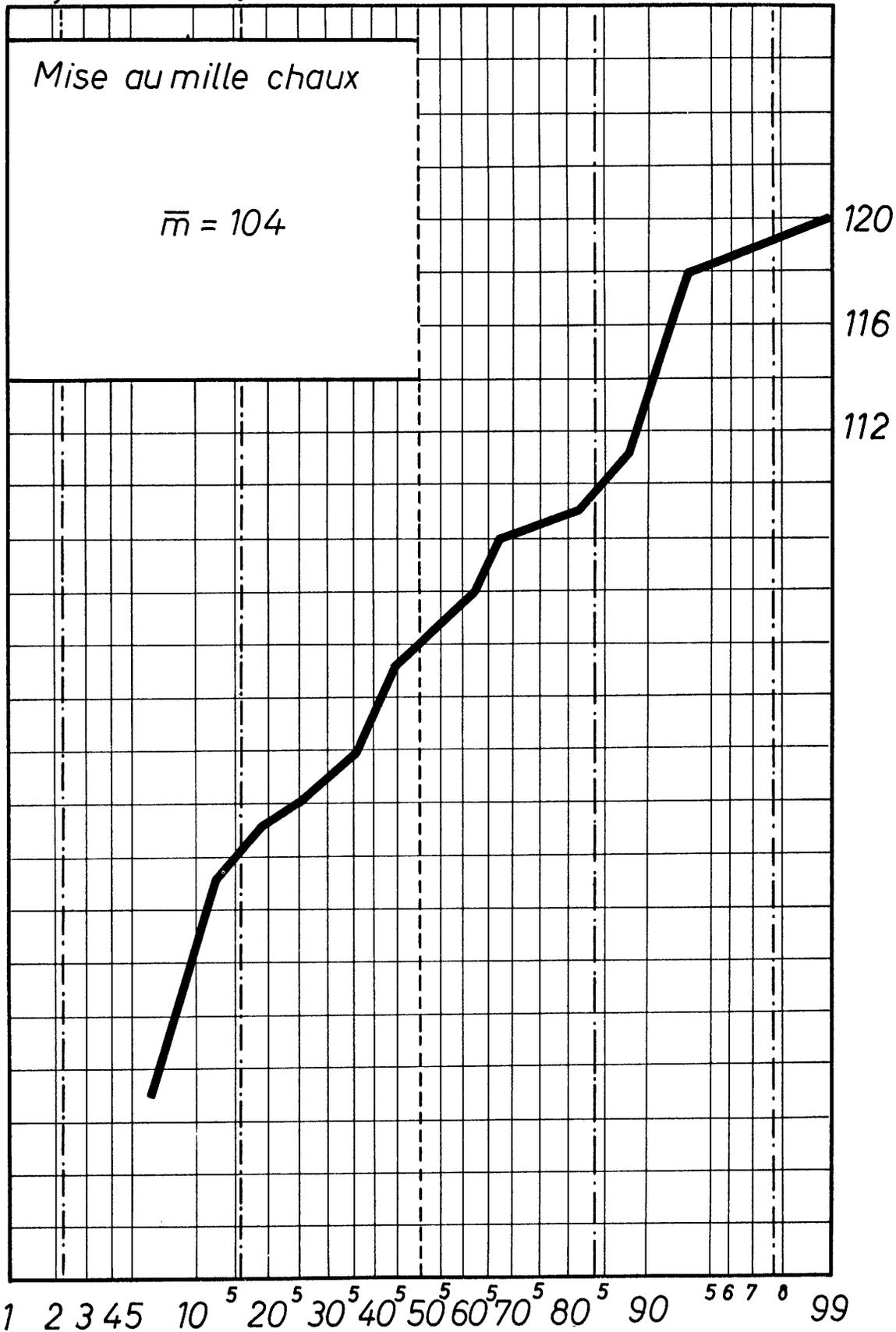


Fig. 10c

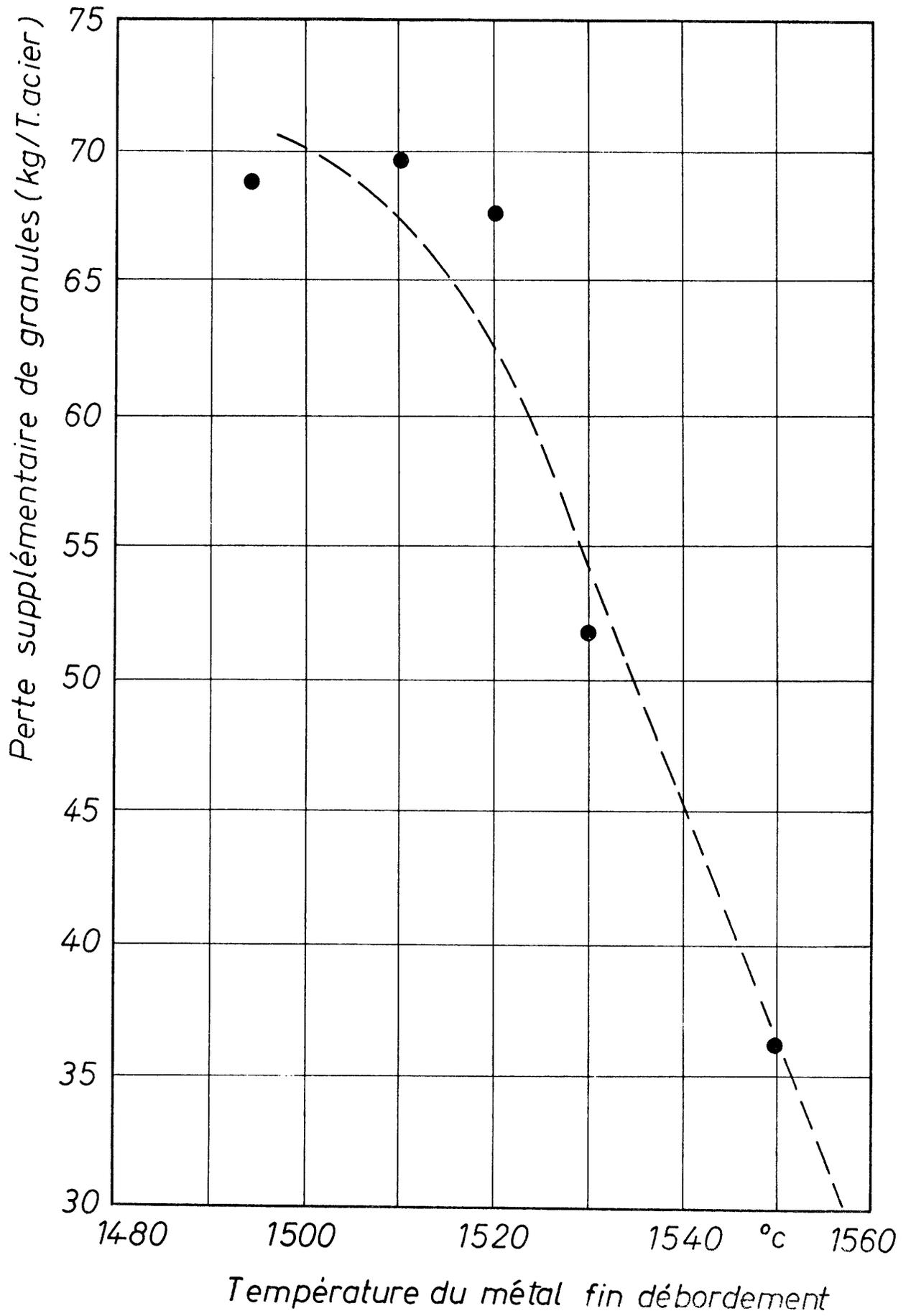


Fig.11

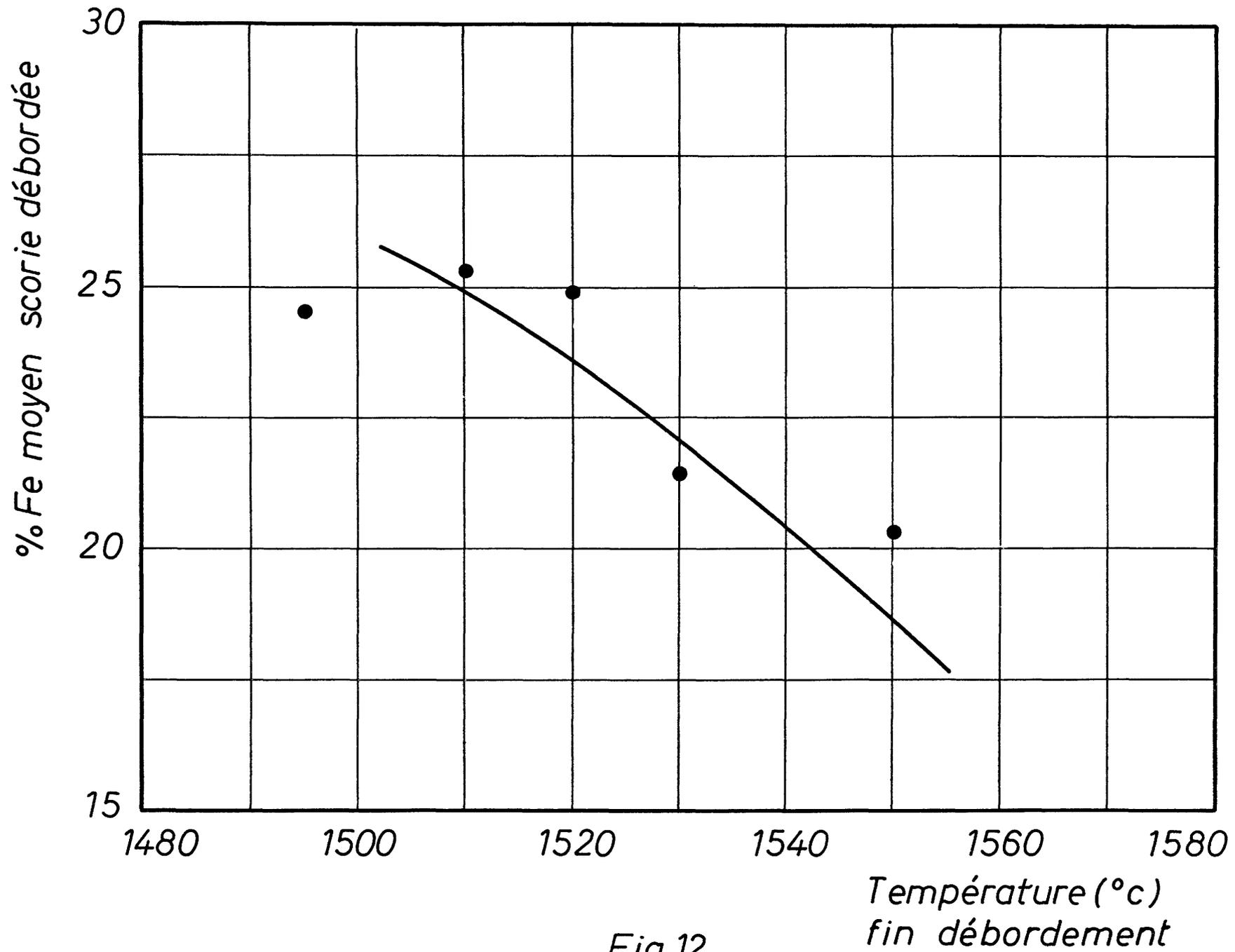


Fig.12

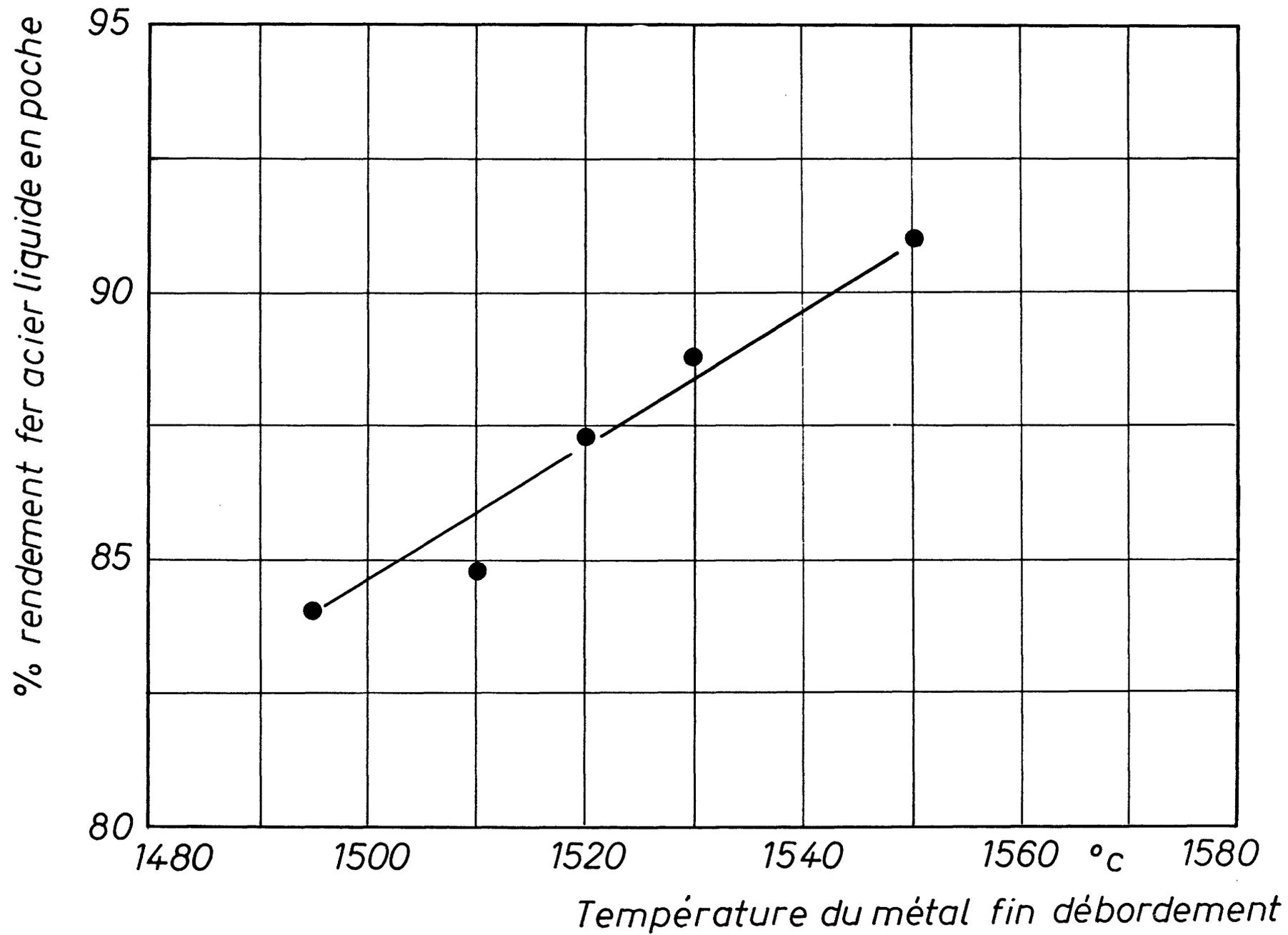


Fig. 12

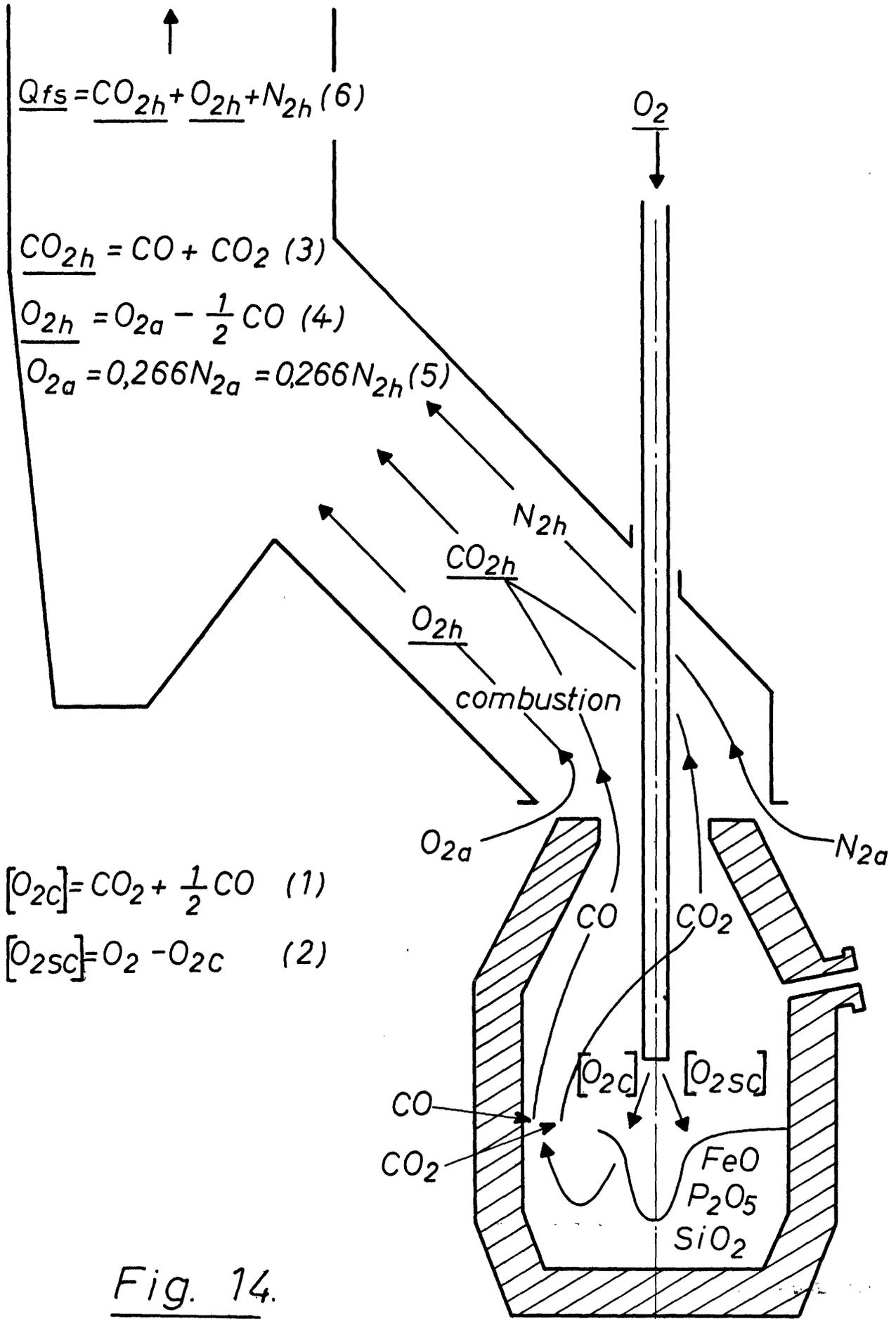


Fig. 14.

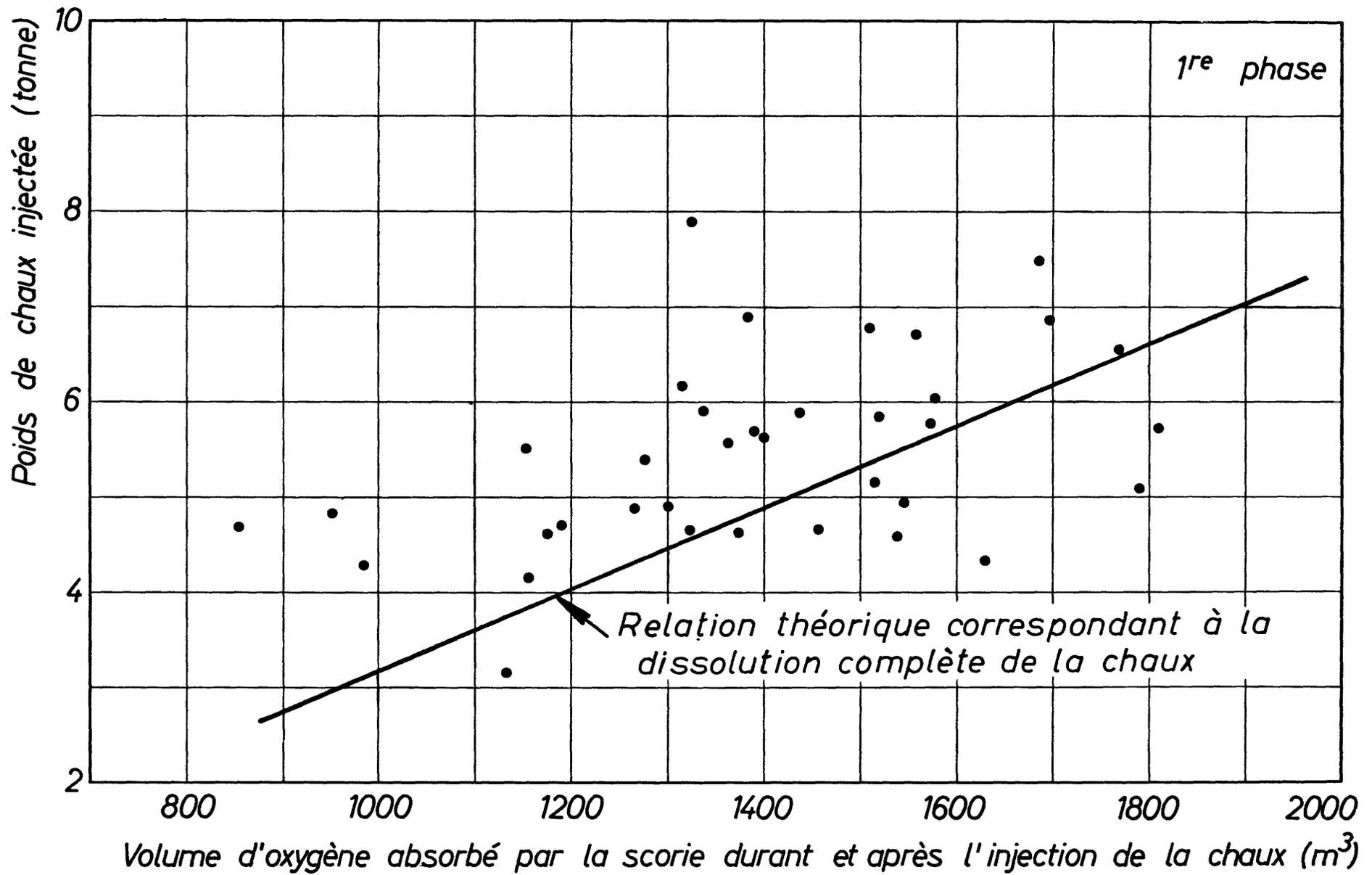


Fig.15.

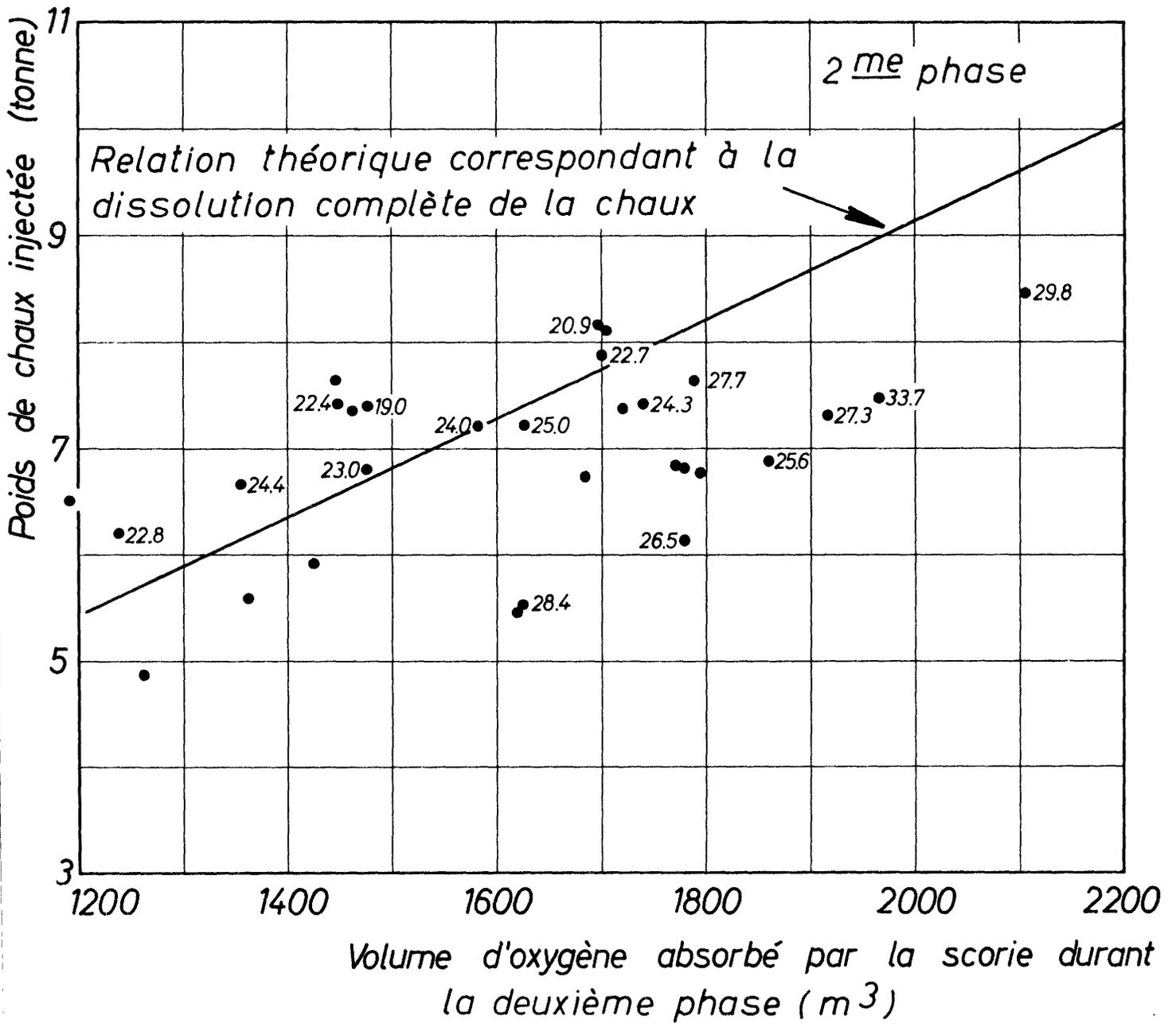
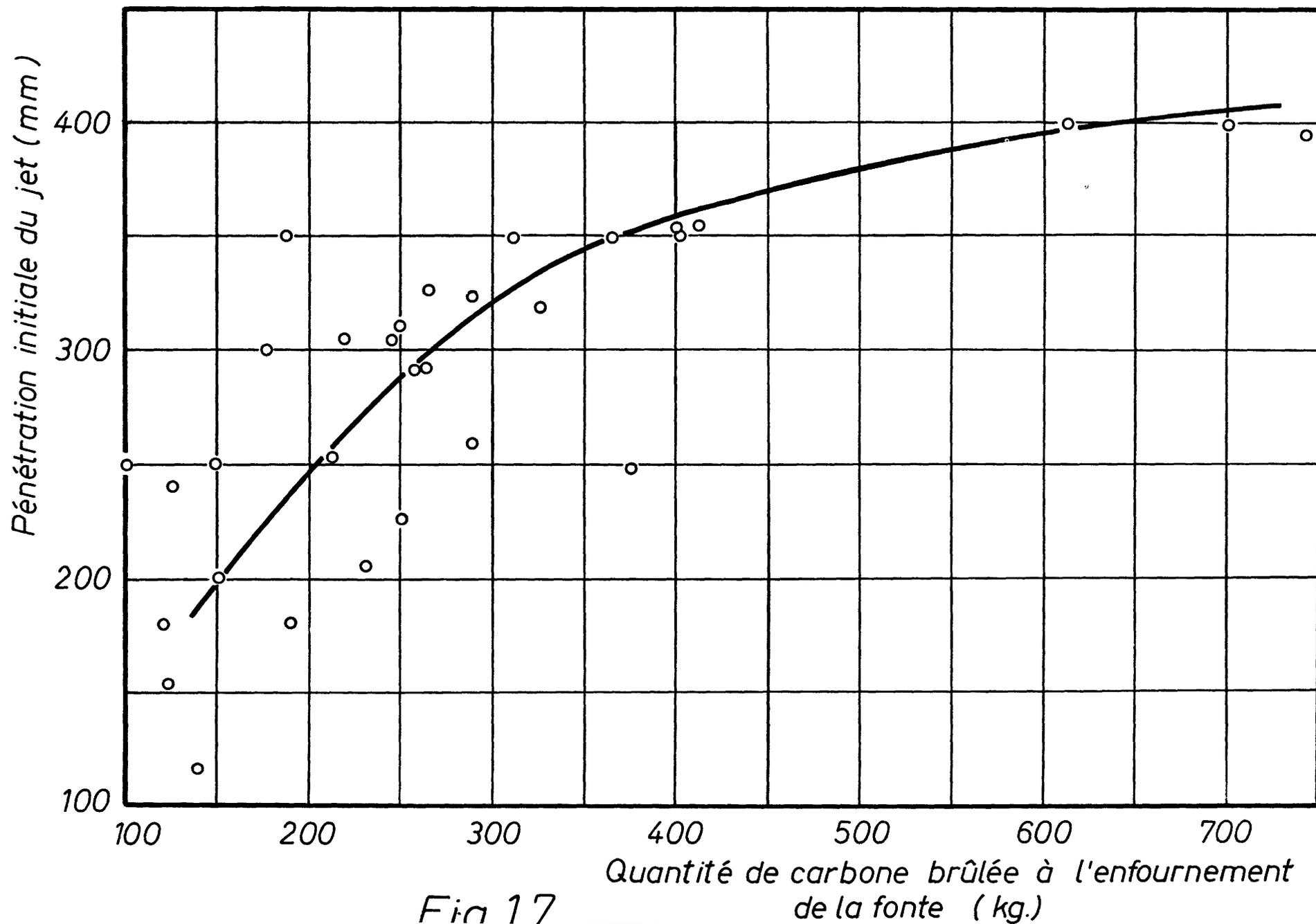


Fig. 16



AFFINAGE DES FONTES PHOPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

ESSAIS SUR LE CONVERTISSEUR LD-KALDO

Rapport Technique
relatif à la seconde campagne

par

P. NILLES

P. DAUBY

E. DENIS

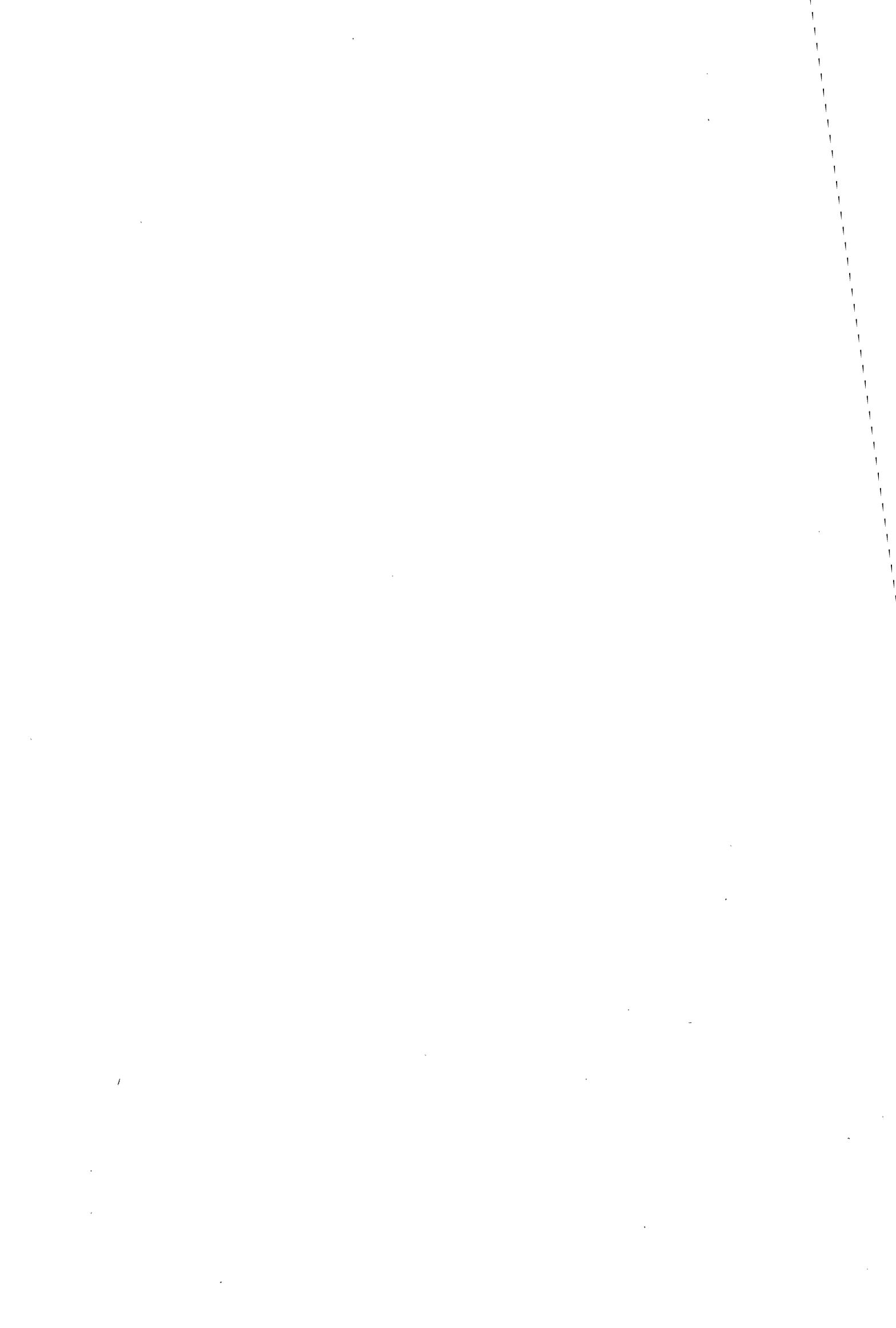


TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
I. <u>GENERALITES</u>	42
II. <u>RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES</u>	42
1. <u>Température à l'arrêt</u>	42
2. <u>Teneurs en phosphore</u>	43
3. <u>Teneur en soufre</u>	44
4. <u>Teneur en azote</u>	45
5. <u>Résumé P, S, N</u>	46
6. <u>Analyse de la scorie débordée</u>	47
III. <u>RESULTATS TECHNIQUES</u>	48
1. <u>Enfournements</u>	48
2. <u>Bilan fer</u>	50
3. <u>Comparaison avec le bilan fer du procédé LD-AC</u>	51
4. <u>Considérations économiques</u>	53
a) <u>Frais d'enfournement métalliques</u>	53
b) <u>Frais de transformation</u>	53
c) <u>Amortissements et intérêts</u>	54
IV. <u>CONCLUSIONS</u>	54
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	56

I. GENERALITES.

Durant le second semestre de l'année 1968, 16 coulées d'essai avec décrassage en cours de soufflage ont été effectuées sur la cornue LD-KALDO de 35 tonnes de la S.A. COCKERILL-UGREEE-PROVIDENCE.

Le mode de soufflage utilisé a été celui décrit dans le rapport technique précédent. Rappelons qu'il consiste en un soufflage vertical d'environ 11 minutes (débit d'oxygène : 100 Nm³/min) suivi d'un soufflage en position inclinée au cours duquel la scorie déborde (6 à 7 minutes ; DO₂ = 90 Nm³/min). Après ce débordement, la cornue es ramené en position verticale pour terminer l'affinage (4 min ; DO₂ = 110 Nm³/min).

Les 16 coulées d'essais se répartissent de la façon suivante

1ère journée	:	3 coulées n° 51210 à 51213
2ème journée	:	2 coulées n° 51223 et 51224
3ème journée	:	6 coulées n° 51650 à 51655
4ème journée	:	5 coulées n° 51665 à 51669

II. RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES.

1. Température à l'arrêt.

Au cours de la première campagne d'essais, pendant le débordement, les températures du métal avaient été assez basses (1500-1550°C), ce qui avait eu un effet défavorable sur le rendement fer.

Pour cette raison, il avait été décidé d'augmenter ces températures lors de la seconde campagne.

Vu nos possibilités limitées de refroidissement après le débordement, les températures à l'arrêt se sont situées pour cette campagne en moyenne à 1640°C.

2. Teneurs en phosphore.

Sur la figure 1a, nous avons rappelé schématiquement l'évolution de la teneur en phosphore à l'arrêt en fonction de la teneur en fer de la scorie telle qu'elle avait été observée au cours des 4 journées d'essais de 1967. Sur cette même figure, nous avons représenté par des points les teneurs réalisées lors de la campagne de 1968 : on constate un net progrès par rapport à la première série ; les nouveaux points sont situés très près de la courbe d'équilibre à 1650°C proposée par vom ENDE et ses collaborateurs (2).

Les figures 1b et 1c permettent de comparer nos résultats obtenus avec de la chaux en roche 10-20 mm, avec ceux que vom ENDE (2) a observés sur une cornue LD-AC avec de la chaux en poudre. On constate que les résultats sont à peu près équivalents.

Afin d'évaluer les teneurs en phosphore que nous aurions obtenues si les coulées avaient été rabattues à 1600°C, nous avons ramené toutes nos valeurs à cette température en supposant que l'écart à l'équilibre serait conservé. Sur la figure 1d, nous avons reporté ces teneurs en phosphore par rapport à la courbe d'équilibre à 1600°C. On remarque que nos valeurs sont tout à fait comparables à celles qu'obtiennent aujourd'hui les aciéries LD-AC.

Au bassin, la teneur moyenne en phosphore est de 0,017 % pour les aciers doux et de 0,021 % pour les aciers recarburés. Il faut noter que la coulée en poche est faite par le bec après figeage du laitier.

En résumé, il est permis de dire que les teneurs en phosphore que nous avons réalisées en 1968 au moyen de chaux classée sont comparables à celles obtenues dans les cornues LD-AC travaillant avec de la chaux en poudre.

3. Teneur en soufre.

Au cours de la campagne précédente, la désulfuration en cornue avait été en moyenne de 50 %. Pour une mise de chaux de 104 kg/t acier (CaO = 88 %), nous avons obtenu un soufre acier égal à 0,020 % au départ d'une fonte tenant en moyenne 0,040 % S. Par ailleurs, la seconde journée de cette première série d'essais (3 coulées) avait permis l'obtention de teneurs en soufre acier de 0,010 % au départ d'une fonte à 0,031 %, soit près de 67 % de désulfuration.

Au cours de la présente campagne, ce dernier taux de désulfuration a été atteint pour l'ensemble des coulées. La figure 2 montre en effet que pour un soufre fonte de 0,042 %, le soufre acier est en médiane de 0,0145 %, soit une désulfuration de 65 %. Pour une coulée seulement, la première de la campagne, le soufre à l'arrêt était supérieur à 0,017 %. Notons que la mise de chaux était de 97 kg/t acier (CaO = 94 %).

Lorsqu'on examine les teneurs en soufre atteintes lors de nos essais de 1968, et qu'on les compare à celles obtenues au convertisseur LD-AC, on peut dire que 2 à 4 millièmes de soufre sont éliminés en plus dans notre cas, et ce, malgré l'utilisation de chaux en roche.

Cette différence peut s'expliquer soit par une meilleure désulfuration par la scorie, soit par une meilleure désulfuration par voie gazeuse.

Sur la figure 3a, nous avons porté les rapports $(S)/[S]$ en fonction de l'excès de base ; la figure 3b tient compte d'une correction de température (2) et donne les $(S)/[S]$ correspondant à 1600°C. La figure 3c enfin montre les valeurs du rapport $(S)/[S]$ du procédé LD-AC à 1600°C (3). On peut dire qu'en ce qui concerne le partage du soufre entre scorie et métal, les deux procédés sont à peu près équivalents. On a en effet les valeurs moyennes suivantes :

	Excès de base	Coefficient de partage du soufre ramené à 1600°C
Procédé C.N.R.M.	0,43	9,8
Procédé LD-AC (3)	0,43	9,3

Pour une teneur en soufre de la scorie égale à 0,150 %, ces chiffres conduisent à un gain de 0,001 % S en faveur du procédé avec débordement. L'amélioration du coefficient de partage ne suffit donc pas à expliquer la différence observée entre notre procédé et le procédé LD-AC.

Les figures 4 et 5 extraites d'une étude de J.P. COEUR (4) sont relatives à la désulfuration par voie gazeuse.

La quantité de soufre passée dans les gaz a été mesurée en continu (fig. 4)

- pendant des coulées avec débordement ;
- pendant des phases KALDO et
- pendant un soufflage purement vertical.

La figure 5 montre qu'au cours d'une phase KALDO ou pendant le débordement, c'est-à-dire quand la majeure partie de l'oxygène est transférée au métal par l'intermédiaire de la scorie, la désulfuration est plus de dix fois supérieure à celle mesurée dans les procédés de soufflage LD et LD-AC où la majeure partie de l'oxygène est transférée au métal au point d'impact du jet d'oxygène. Nous pensons donc que la meilleure désulfuration observée avec notre procédé doit être attribuée à une meilleure désulfuration par voie gazeuse.

La figure 5 montre en effet que quand la scorie n'est pas assez mousseuse pour déborder (courbe D), la désulfuration est analogue à celle des procédés purement verticaux.

4. Teneur en azote.

A l'arrêt, toutes les teneurs en azote à l'arrêt se situent entre 15 et $23 \cdot 10^{-4}$ %. La figure 6 représente le diagramme de fréquences relatif aux seize coulées élaborées en 1968 : la médiane se situe à $18,5 \cdot 10^{-4}$ %, chiffre bien en accord avec les $18 \cdot 10^{-4}$ % observés en 1967.

Si on exclut la première coulée de deux des journées d'essais, ainsi qu'une coulée rabattue prématurément ($C = 0,247 \%$), aucune teneur ne dépasse $20.10^{-4} \%$.

A titre de comparaison, les figures 7 et 8 reproduisent les teneurs en azote des aciéries LD-AC de PEINE et de A.T.H. à RUHRORT. A PEINE (5), la valeur médiane de l'azote est de $27.10^{-4} \%$ pour la chaux en poudre ; à RUHRORT (6), cette valeur se situe à environ 25.10^{-4} pour les aciers à bas carbone. Rappelons également qu'à l'aciérie LD-AC de CHERTAL, une valeur de $25.10^{-4} \%$ avait été signalée (7).

Malgré le fait que nos coulées aient été élaborées avec de la chaux classée et que les températures finales étaient très élevées, les teneurs en azote sont nettement meilleures.

Ceci est confirmé par la figure 9 où nous avons représenté en fonction de la teneur en carbone à l'arrêt, l'évolution des teneurs en azote observées lors d'essais effectués à RUHRORT sur de la fonte phosphoreuse avec différents types de lances. Sur la même figure 9, nous avons indiqué les teneurs en azote que nous avons réalisées sur la cornue de MARCHIENNE. Nous pensons que l'abaissement de l'azote observé est dû au fait que le décrassage en cours de soufflage permet de mousser plus longtemps et de protéger ainsi plus efficacement le bain (8).

5. Résumé P - S - N.

Au tableau I, nous avons regroupé les teneurs en phosphore, soufre et azote obtenues à l'arrêt pour toutes les coulées que nous considérons comme normales, c'est-à-dire qui correspondent au rabattement, aux critères suivants :

Température : 1560 - 1650°C
% Fe scorie : $\gt 20 \%$
% carbone : $\ll 0,150 \%$

On voit que les teneurs moyennes et les fourchettes totales ($\pm 3 \sigma$) sont :

Soufre : $12,5 \pm 4 \cdot 10^{-3}$ % soit max. $16,5 \cdot 10^{-3}$ %
 Phosphore : $14,5 \pm 5 \cdot 10^{-3}$ % soit max. $19,5 \cdot 10^{-3}$ %
 Azote : $19,7 \pm 1 \cdot 10^{-4}$ % soit max. $20,0 \cdot 10^{-3}$ %

Nous estimons que ce sont les résultats que l'on peut normalement atteindre avec notre procédé.

TABLEAU I.

Teneurs en soufre, phosphore et azote obtenues à l'arrêt.

N° Coulée	S (10^{-3} %)	P (10^{-3} %)	N (10^{-4} %)
51223	17	15	20
51651	10	17	18
51653	11	16	20
51654	9	11	20
51655	13	10	20
51668	12	13	20
51669	15	20	20
Moyenne	12,4	14,6	19,7
Fourchette 3	4	5	1

6. Analyse de la scorie débordée.

Sur la figure 10, nous avons indiqué par journée d'essai, les moyennes des teneurs en P2O5 et Fe de la scorie débordée. La partie gauche de la figure est relative à la série d'essais de 1967, la partie droite concerne les essais de 1968.

Pour 1968, on observe une baisse de 2 % de la teneur en fer moyenne, alors que la teneur en P2O5 est restée en moyenne la même.

Le point moyen actuel se situe exactement sur la droite que nous avons établie sur le convertisseur expérimental.

A noter que sur ces figures, on n'a retenu que les coulées ayant à l'arrêt

Température	1560 à 1650°C.
Fe scorie	> 20 %
C métal	< 0,150 %

Nous considérons que la teneur moyenne en fer qui s'établit à 19,5 % est encore trop élevée. Cependant, le type de lance dont la cornue LD-KALDO est équipée en position inclinée et le nombre restreint d'essais effectués ne nous ont pas permis de résoudre complètement ce problème. Nous sommes persuadés qu'avec une lance bien adaptée, la teneur en fer pourrait être abaissée jusqu'à 15 %, comme cela a été le cas sur la cornue expérimentale.

III. RESULTATS TECHNIQUES.

1. Enfournements.

Le tableau II compare les enfournements de fonte, mitrailles et chaux des deux campagnes d'essais.

Pour 1968, on constate une diminution, tant de l'enfournement fonte, que de l'enfournement mitrailles par rapport à 1967.

Le gain total en "fonte + mitrailles" est de 35 kg en moyenne et de 32 kg en médiane.

Les figures 11 à 13 reprennent les courbes de fréquences cumulées des mises au mille fonte, mitrailles et chaux.

En ce qui concerne la capacité de fusion de mitrailles, nous avons calculé les riblons thermiquement équivalents, c'est-à-dire la quantité de mitrailles par tonne de fonte que l'on enfournerait si toutes les additions refroidissantes étaient des mitrailles et si la température finale était de 1610°C. Ce chiffre est repris dans le tableau sous la rubrique RTE et se situe en 1968 à 475 kg.

TABLEAU II.

a) Moyenne des enfournements		
	1967	1968
Fonte	829	816,6
Mitrailles	358	335,2
Minerai	-	10,2
Chaux	104	98
Fonte + mitrailles	1187	1151,8
RTE (1610°)	470	475

b) Médiane des enfournements		
	1967	1968
Fonte	817	808
Mitrailles	359	336
Chaux	104	97
Fonte + mitrailles	1176	1144

Nous pensons que si une cornue verticale était spécialement équipée pour le décrassage en cours de soufflage, c'est-à-dire que l'on n'y rencontrerait plus les pertes de temps actuellement observées et dues aux changements de la lance et de l'inclinaison de la cornue, le RTE augmenterait d'une vingtaine de kg.

Par contre, notre objectif étant de limiter à 15 % la teneur en fer de la scorie débordée, nous estimons que la diminution concomitante des kg de fer scorifiés entraînerait un abaissement du RTE d'à peu près 25 kg.

En finale, on retrouvera donc un RTE d'environ 470 kg/t de fonte, ce qui, comme nous l'avons indiqué dans le rapport précédent, correspond à une capacité de fusion de l'ordre de 50 kg plus élevée que pour une cornue LD-AC de même tonnage.

2. Bilan fer.

En 1967, la médiane du rendement fer avait été égale à 89 %.

La figure 14 donne la courbe de fréquences cumulées du rendement fer obtenu lors de la présente campagne (*). Il est défini par la formule :

$$\frac{\text{Fer de l'acier en poche}}{\text{Fe fonte + mitrailles + Fe minéral + additions}}$$

On voit que la médiane (de même que la moyenne) est passée à 91,4 %, soit une augmentation de 2,4 % par rapport à 1967. Ceci correspond à une diminution de perte en fer de 29,5 kg à la tonne d'acier.

Nous avons déjà signalé que la teneur en fer de la scorie débordée avait, par rapport à la campagne de 1967, diminué en moyenne de 2 %, ce qui permet d'expliquer un gain de 3,5 kg de fer. Il en résulte que notre perte en granules a dû diminuer de 26 kg.

Vu que pour chacune des deux campagnes d'essais, les prélèvements de scorie débordante ont été effectués de deux manières différentes, il ne nous est pas possible de comparer les teneurs en granules dosées en 1968 avec celles de 1967. En 1967, en effet, les prélèvements étaient effectués à l'aide de petits moules, tandis que cette année, nous avons utilisé de grands bacs, suivant en cela une suggestion de M. ROUANET au dernier Comité Exécutif.

(*) Pour l'examen des rendements fer, nous ne considérons que les 14 coulées des journées d'essais 1, 3 et 4. En effet, la deuxième journée ne comportait que deux coulées et après la première, une attente prolongée de la poche a provoqué la dissolution du barrage. Il s'en est suivi un passage important de scorie en poche et un arrêt prématuré du versage de l'acier.

Pour douze coulées, de tels bacs ont été utilisés ; sur la figure 15, les quantités de granules recueillies par tonne d'acier ont été reportées en fonction du rendement en fer.

En moyenne, la quantité de granules au cours du débordement s'élève à 23 kg/t d'acier.

Vu le faible nombre de coulées effectuées, aucune relation n'a été observée entre la quantité de granules et le rendement. Ceci s'explique par le fait que d'une coulée à l'autre, des quantités variables de fer peuvent être recyclées.

3. Comparaison avec le bilan fer du procédé LD-AC.

Au début de son développement, les rendements fer du procédé LD-AC se situaient entre 93 et 94 %. Au fil des années, ils se sont améliorés et les meilleurs résultats atteignent actuellement 95 % (ex. ARBED-DUDELANGE).

Pour le procédé avec débordement en cours de soufflage, nous réalisons actuellement 91,5 %. On peut raisonnablement admettre que de nouveaux progrès pourront être effectués et nous estimons que grâce à des équipements spécifiques d'une part, et à la diminution de la teneur en fer de la scorie débordée d'autre part, nous serons en mesure d'atteindre 93,5 %.

Le tableau III ventile la répartition des pertes en fer correspondant aux rendements que nous venons de citer.

TABLEAU III.

ESTIMATION DE LA REPARTITION DES PERTES EN FER (EN kg/t ACIER).

	LD-AC petite cornue		Débordement	
	Au début	Etat actuel	Etat actuel	Possible
Rendement fer (%)	93,5	95,0	91,5	93,5
Enfournement fer	1070	1053	1093	1070
Poids de fer scorifié (*)	18	16	38	27
Poids de granules de fer	20	11	23	20
Pertes par les poussières et les projections	20	17	20	17
Pertes diverses	12	6	12	6

(*) Fe métallique entraîné dans la scorie.

4. Considérations économiques.

a) Frais d'enfournement métallique.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons comparé les enfournements LD-AC et décrassage en cours de soufflage.

Nous avons supposé que chacune des 2 techniques avait atteint le même stade de développement. On peut alors raisonnablement admettre 95 % de rendement fer en LD-AC et 93,5 % en débordement.

Enfournements métalliques.

	Débordement		LD-AC	
kg fonte	1000	780	1000	802
kg mitrailles	430	336	374	299
kg minerai	13	10	14	10
kg acier	1280	1000	1245	1000
% rendement fer	-	93,5	-	95

Par rapport au procédé LD-AC, on note donc, au crédit du débordement une diminution de 22 kg de mise au mille fonte et une augmentation de 37 kg de celle des mitrailles. Si l'on estime à 2.000 F le prix d'une tonne de fonte et à 1.600 F celui d'une tonne de mitrailles, on peut alors en conclure que les frais d'enfournements du procédé avec décrassage en cours de soufflage ne sont que 7,5 FB/t acier plus élevés qu'en LD-AC. La figure 16, plus générale, donne l'évolution de cette différence en fonction du rapport prix mitrailles/prix fonte.

b) Frais de transformation.

En ce qui concerne par ailleurs les frais de matières (chaux, oxygène, etc...), nous avons vu au tableau II ci-dessus qu'ils ne devaient pas être fondamentalement différents en LD-AC et en débordement puisque les mises au mille de ces matières sont les mêmes à peu de chose près.

La suppression de l'arrêt intermédiaire est favorable au débordement puisqu'il n'y a plus ni prélèvement pour analyse, ni mesure de température.

Il a également été montré qu'il est possible de travailler avec de la chaux en roche, moins chère que celle en poudre.

Il est difficile d'évaluer les frais de réfractaire car deux facteurs jouent en sens inverse. L'accroissement de la teneur en fer de la scorie pourrait diminuer la tenue du revêtement ; la cadence de production accrue due à l'affinage en une phase sera par contre bénéfique.

Rappelons que le débordement continu de scorie permet une granulation facile de celle-ci.

c) Amortissements et intérêts.

L'avantage du soufflage avec décrassage en cours de soufflage est qu'il permet d'atteindre avec les fontes phosphoreuses des productivités égales à celles des fontes hématites.

IV. CONCLUSIONS

La campagne d'essais de 1968 a permis de faire de sensibles progrès par rapport à celle de 1967. 16 coulées ont été élaborées sur une cornue de 35 tonnes à partir de fonte phosphoreuse. Au point de vue métallurgique, on peut dire que les résultats obtenus avec le procédé avec débordement sont égaux à ceux du procédé LD-AC.

Malgré le fait que toutes les coulées ont été élaborées avec de la chaux en roche, il est possible de réaliser simultanément en fin d'affinage.

S \leq 0,017 % P \leq 0,019 % N \leq 0,0020 %

La mise au mille de mitrailles est de 50 kg par tonne de fonte plus élevée que celle du procédé LD-AC et ce, en raison de la suppression de l'arrêt intermédiaire et d'une teneur en fer supérieure de la scorie décrassée.

Le rendement fer du procédé reste inférieur d'environ 1,5 % à celui du procédé LD-AC.

Le prix de revient de l'acier élaboré devrait être proche de celui de l'acier LD-AC.

Le procédé examiné permet donc d'allier une haute productivité à une excellente qualité.

+ +

+

BIBLIOGRAPHIE.

- (1) P. NILLES, P. DAUBY, E. DENIS,
Affinage des fontes phosphoreuses en une phase, avec
décrassage en cours de soufflage.
Rapport Technique relatif aux essais effectués au cours
du second semestre 1967,
C.N.R.M. DS.20/68.
- (2) H. vom ENDE, F. BARDENHEUER, W. LIESTMANN,
Untersuchungen an Sauerstoffaufblas-Schmelzen aus
Phosphorreichem Roheisen,
Stahl und Eisen 86 (1966), Nr. 21, p. 1359-1366.
- (3) J.P. COHEUR, P. NILLES,
Physico-chemical comparison of four steelmaking Processes,
C.N.R.M., Metallurgical Reports, n° 12, Sept. 1967,
p. 43-56.
- (4) J.P. COHEUR,
Die entschwefelung über die Gasphase bei den
Sauerstoffaufblas-Verfahren,
Dr. Ing. Dissertation, genehmigt von der Fakultät für
Bergbau und Hüttenwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule,
Aachen, 18 décembre 1968.
- (5) KÖHLER, SCHOOP, ASCHENDORF,
Zur Metallurgie der Sauerstoffaufblas-Verfahren für
Thomasroheisen,
Stahl und Eisen 84 (1964), Nr. 16, p. 987-998.
- (6) HAASTERT, KÖHLER, REGNERI, SCHÜRMAN, N,
Stickstoffbewegung bei der Stahlerzeugung im
Sauerstoffaufblas Konverter,
Stahl und Eisen 89 (1969). Nr. 1., p. 24-30.
- (7) C. ROME, G. HALLET, G. SNACKERS,
L'aciérie de CHERTAL d'ESPERANCE-LONGDOZ,
C.N.R.M. Metallurgical Reports, n° 11, June 1967,
p. 25-34.
- (8) H. vom ENDE, W. LIESTMANN,
Schlackenschaümen beim Verblasen von Roheisen im
Sauerstoffaufblas-Konverter,
Stahl und Eisen 86 (1966), Nr. 19, pp. 1189-1205.

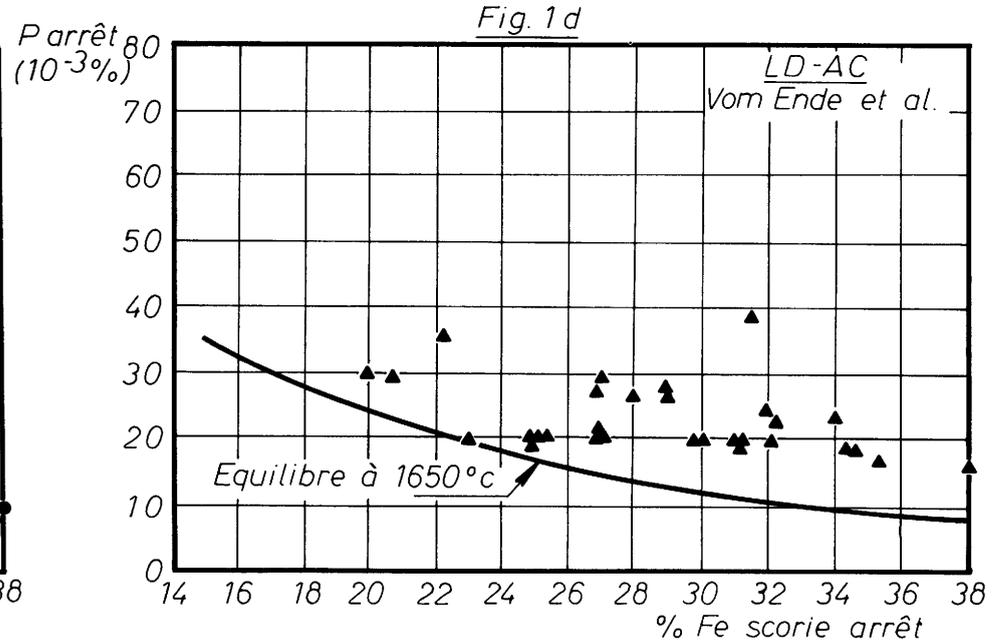
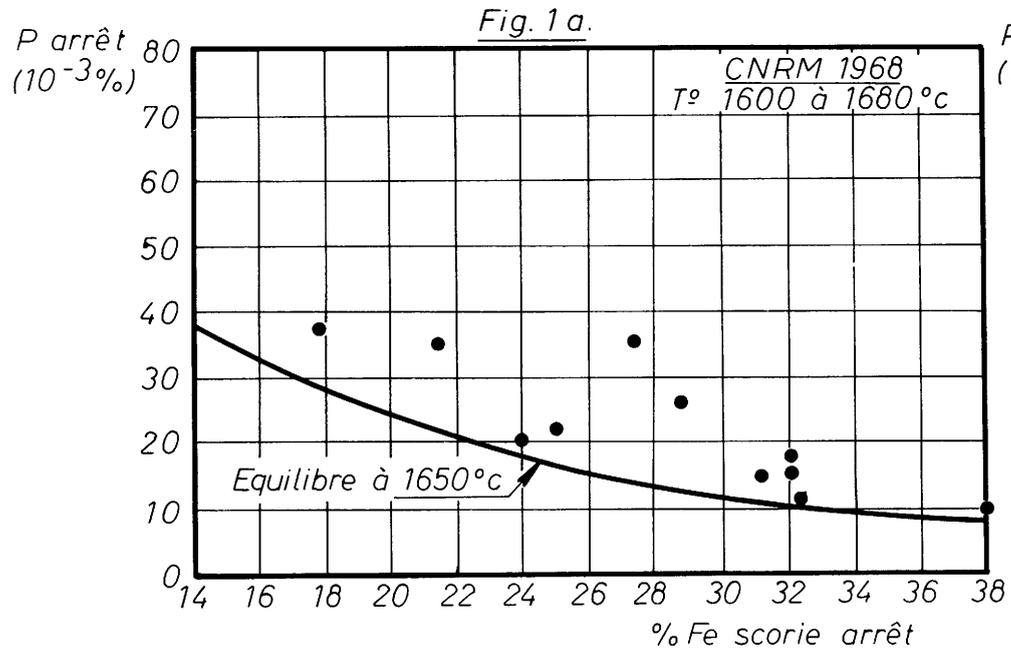
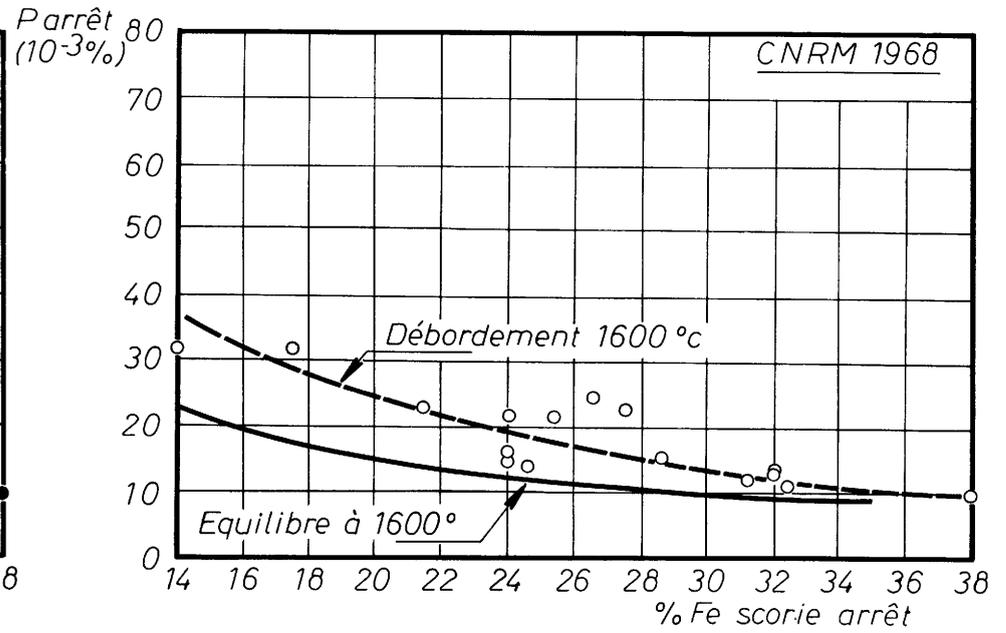
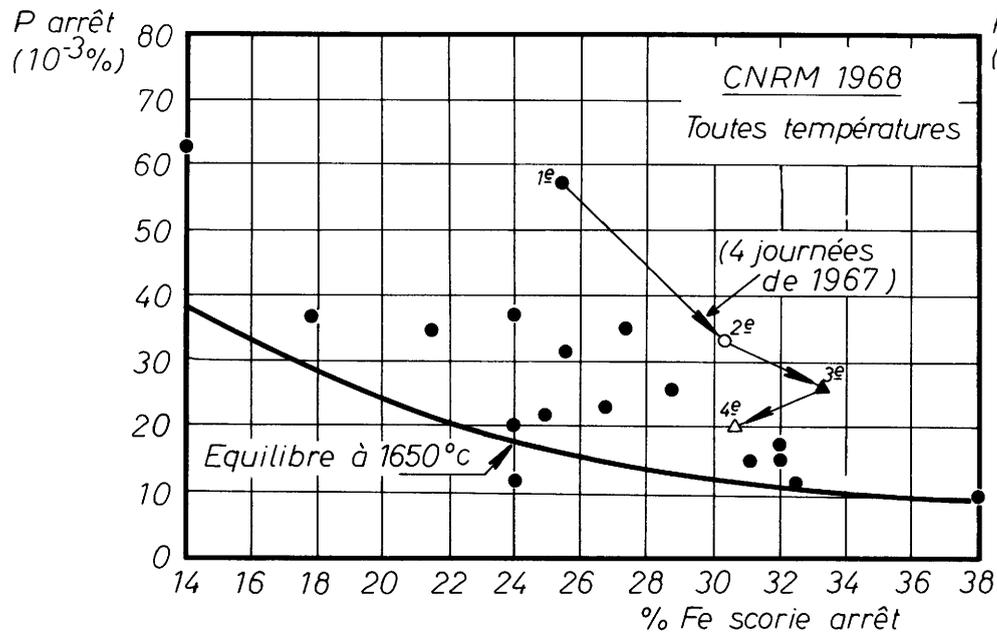


Fig. 1 b.

Fig. 1 c.

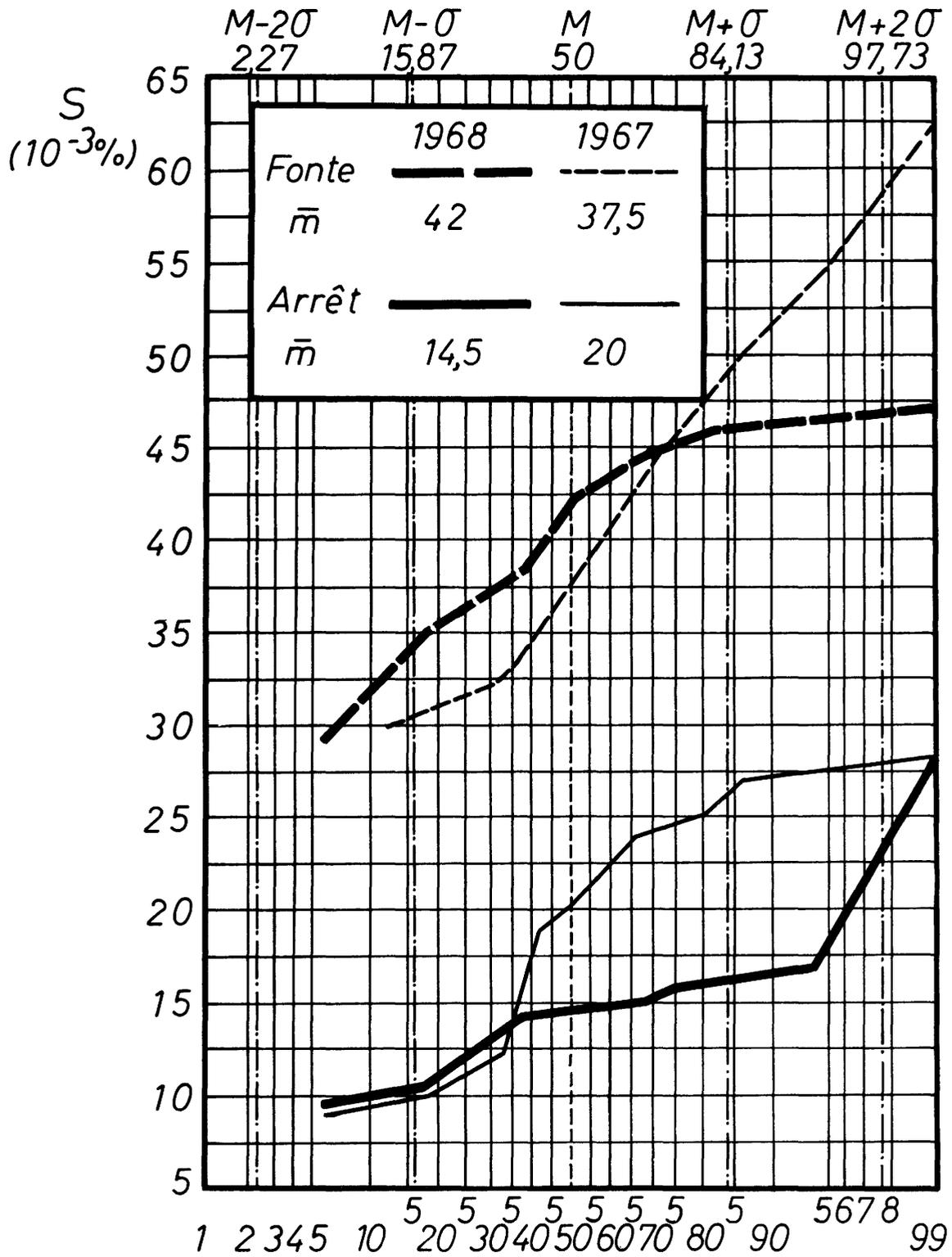


Fig. 2 : Teneur en Soufre

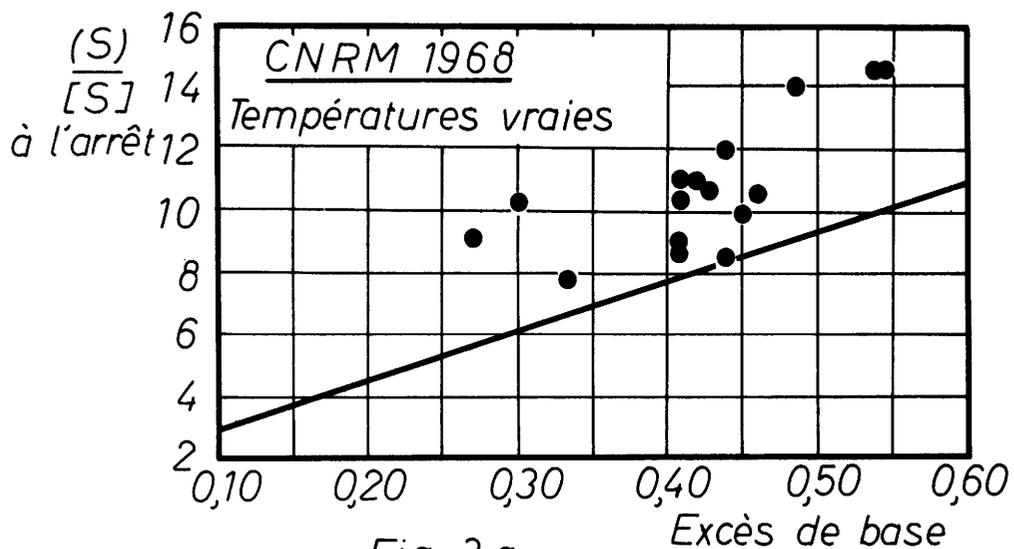


Fig. 3 a.

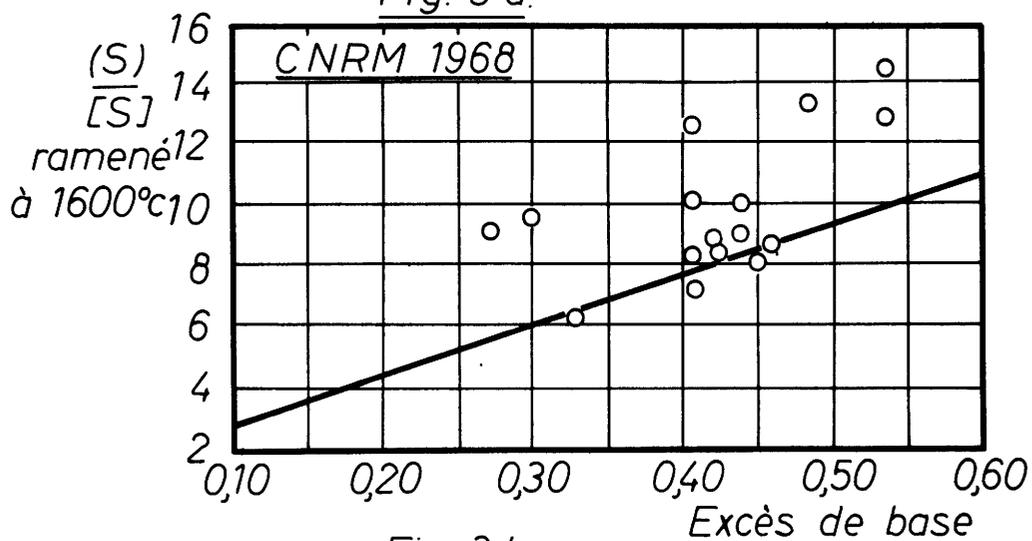


Fig. 3 b.

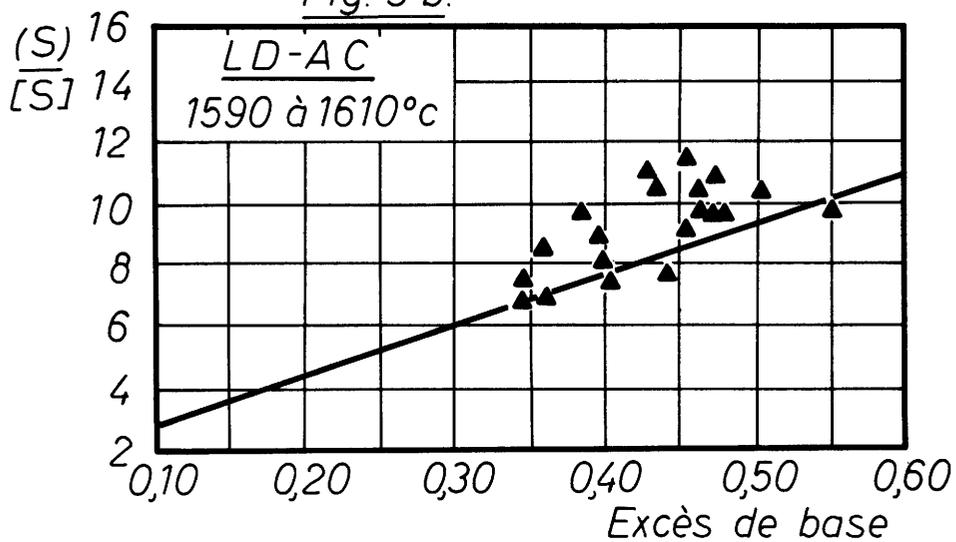
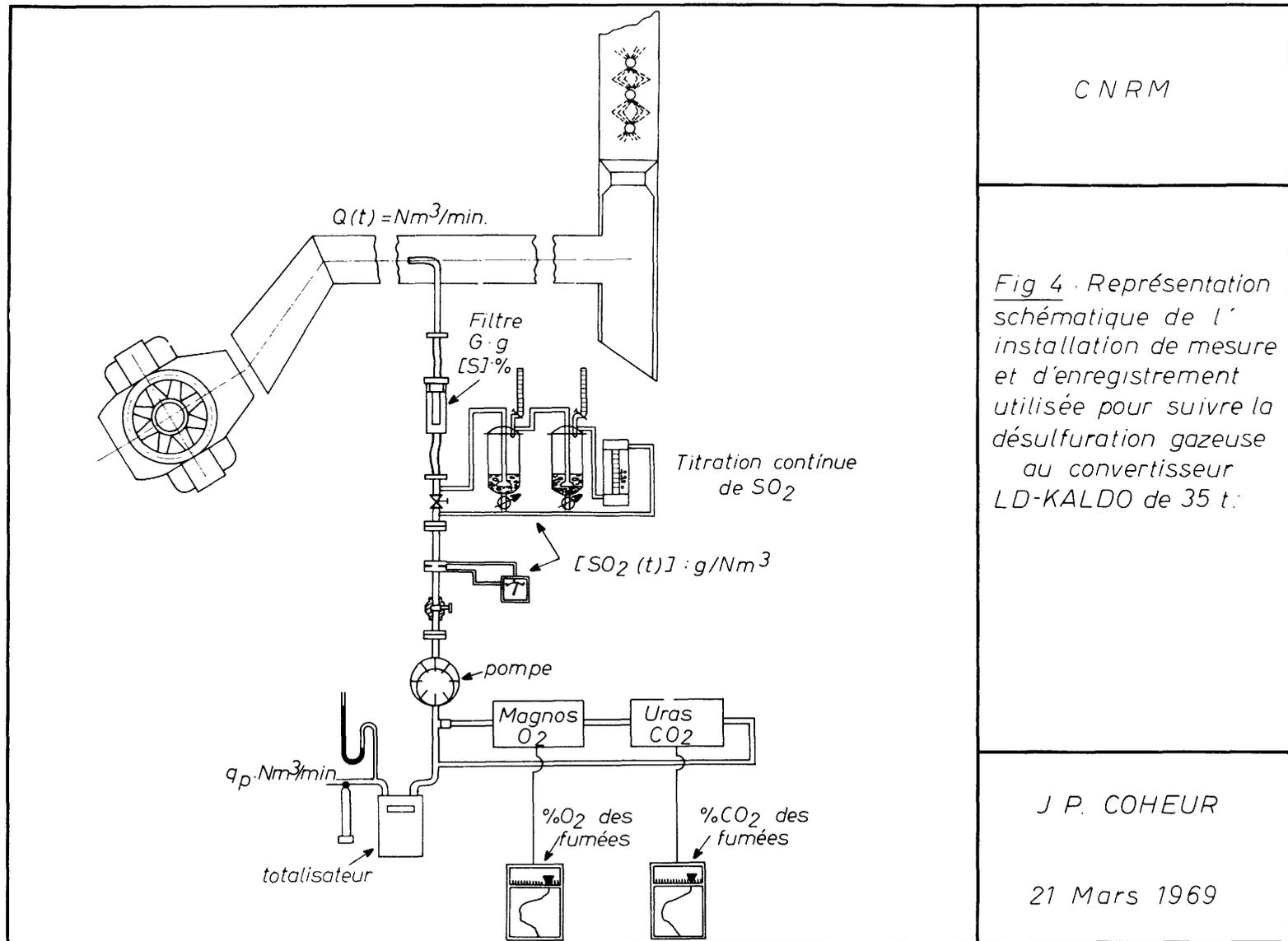
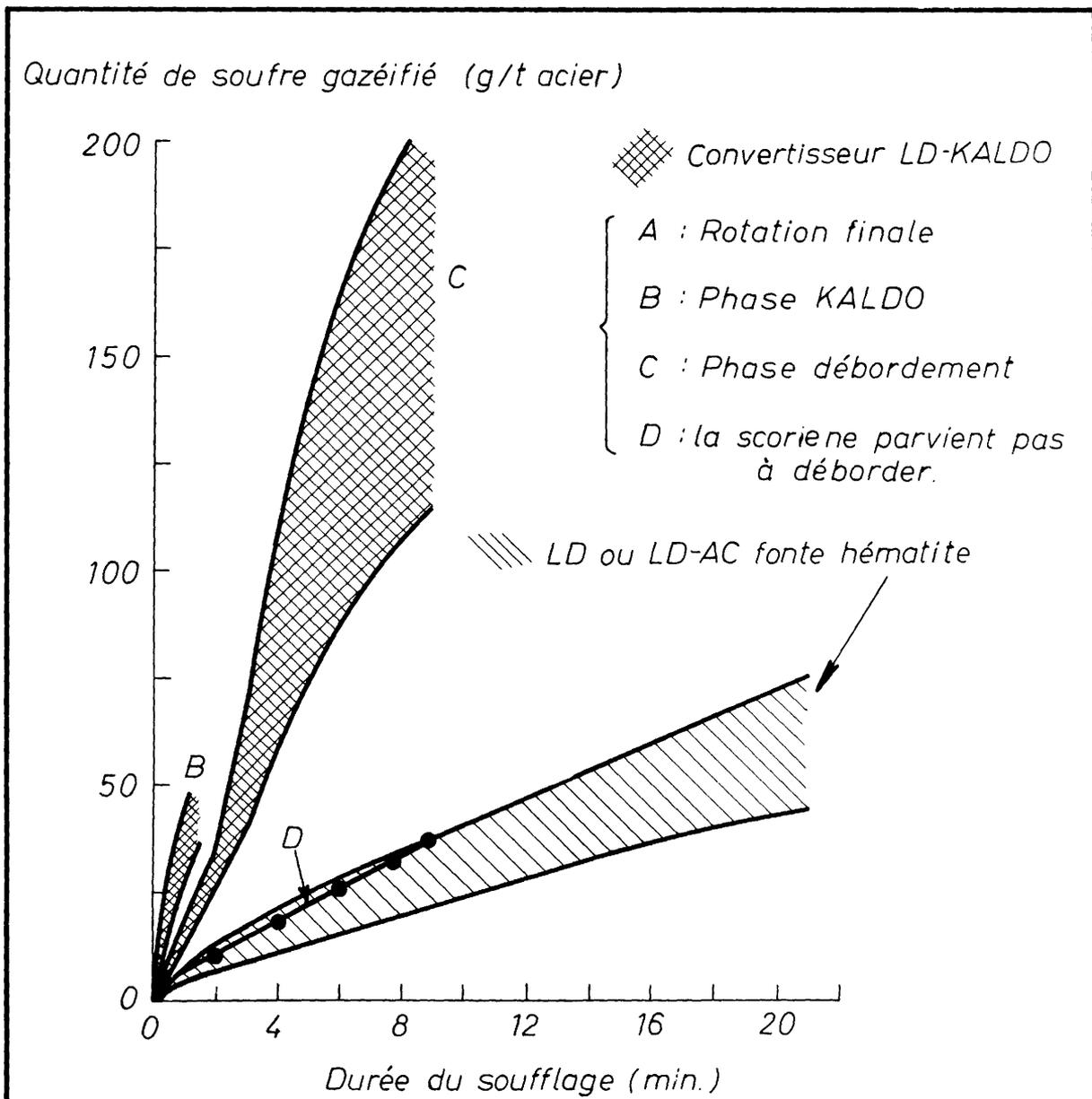


Fig. 3 c

Variation du coefficient de partage du soufre en fonction de l'excès de base.





CNRM

Fig. 5 : Désulfuration gazeuse observée au LD-KALDO.

J.P. COHEUR

21 Mars 1969

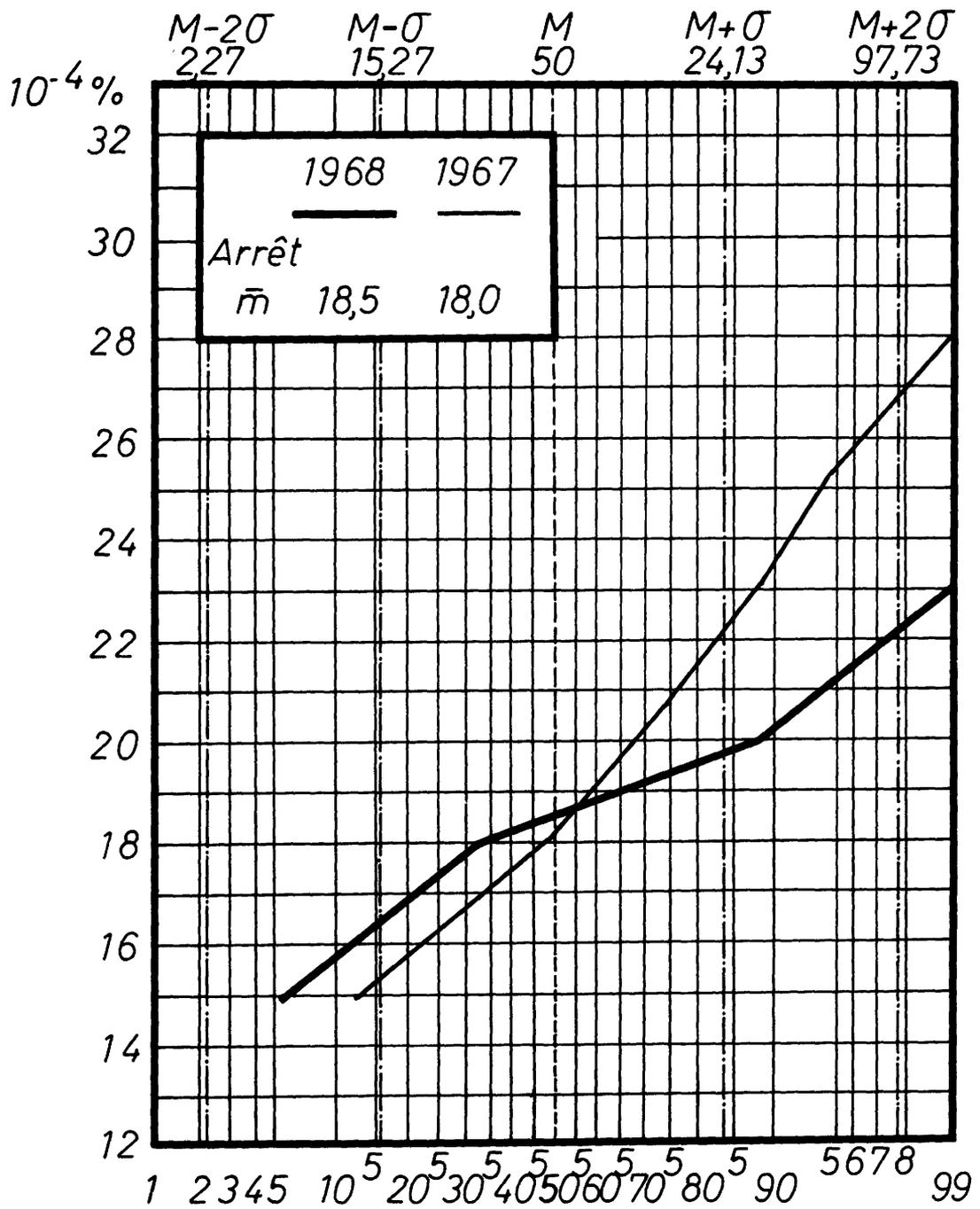


Fig. 6 : Teneurs en azote à l'arrêt.

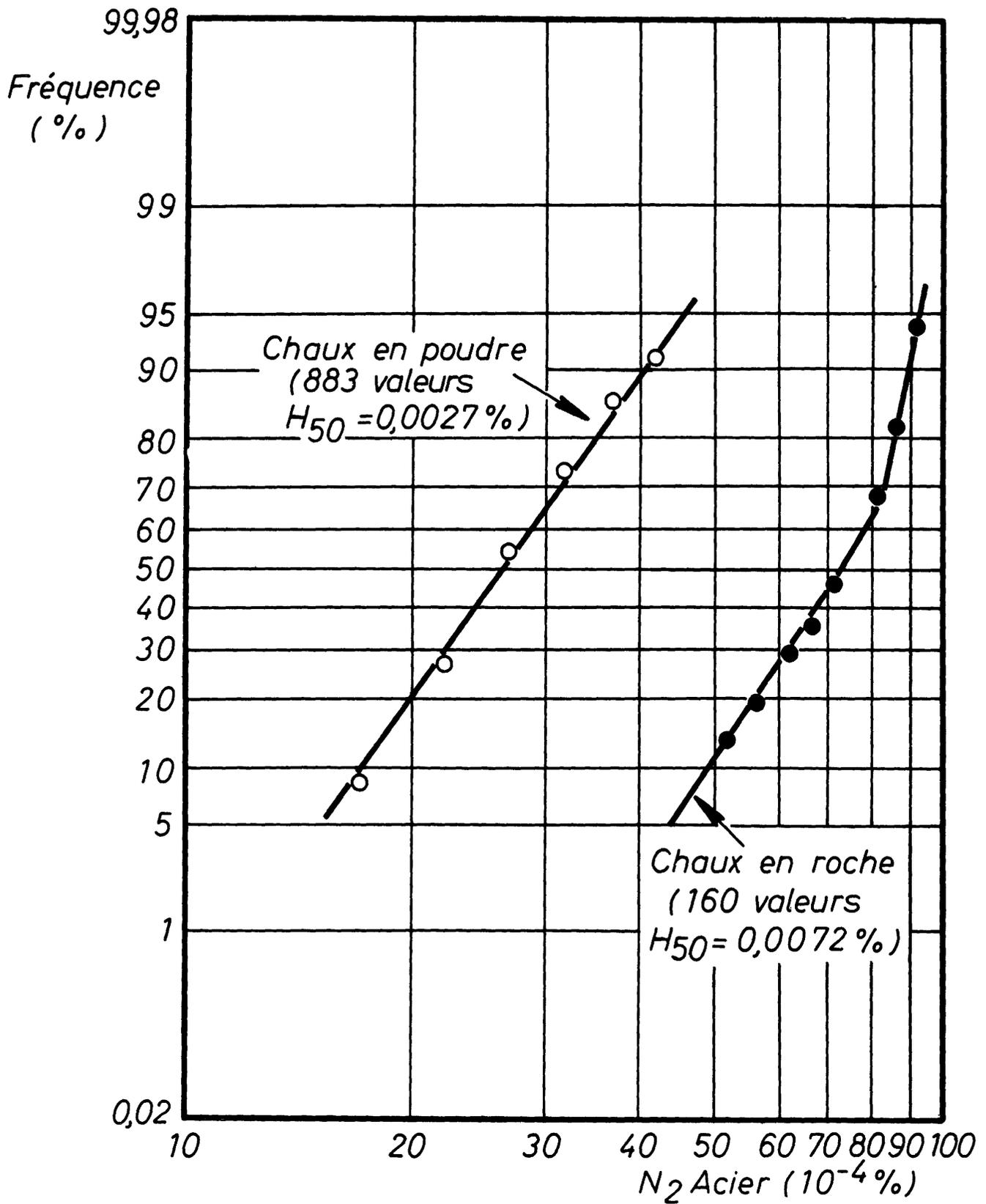


Fig. 7 : Teneurs en azote à l'aciérie LD-AC de Peine.

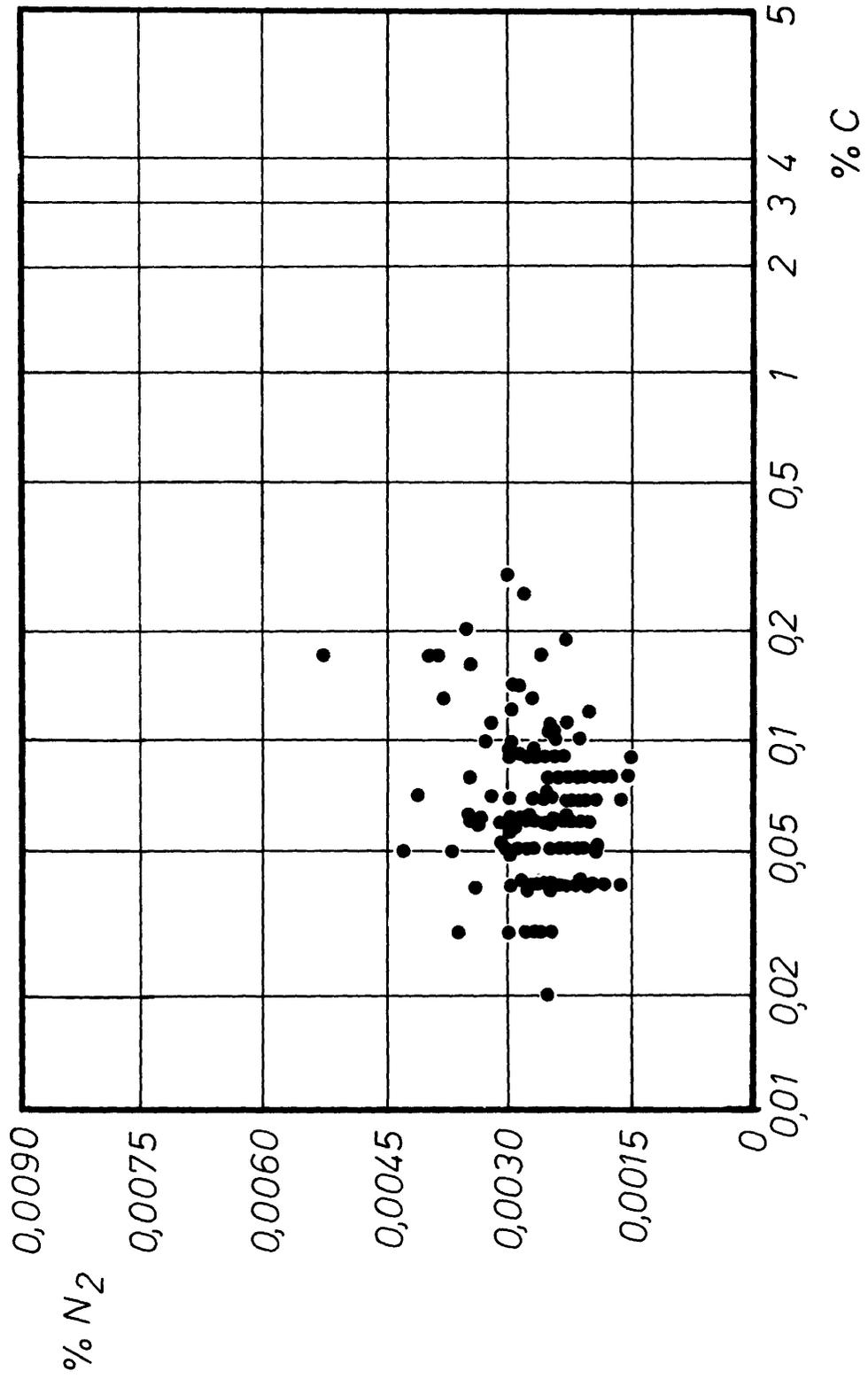


Fig. 8 :Teneurs en azote à l'aciérie LD-AC de Ruhrort (ATH)

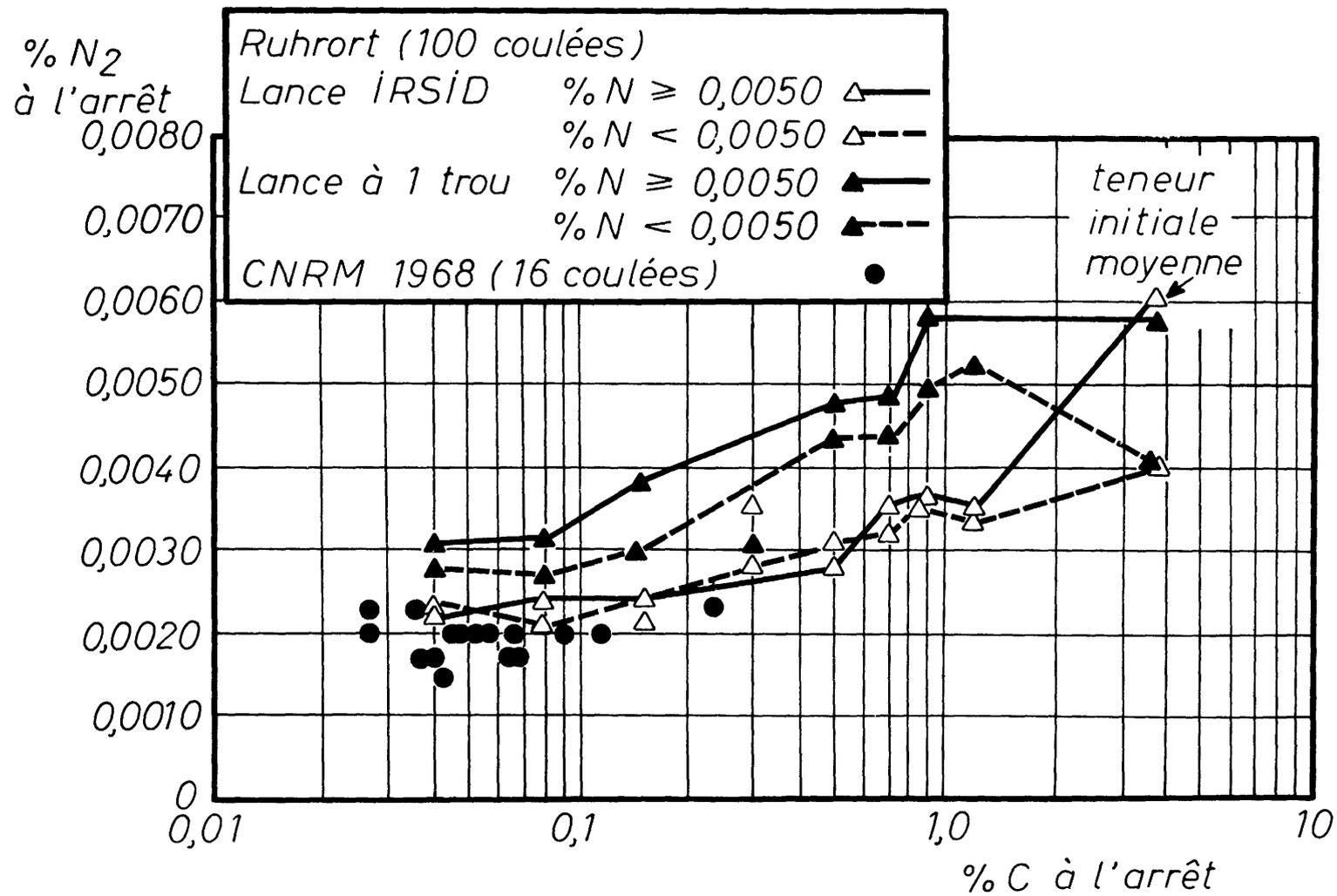


Fig. 9 : Evolution de la teneur en azote en fonction du carbone à l'arrêt.

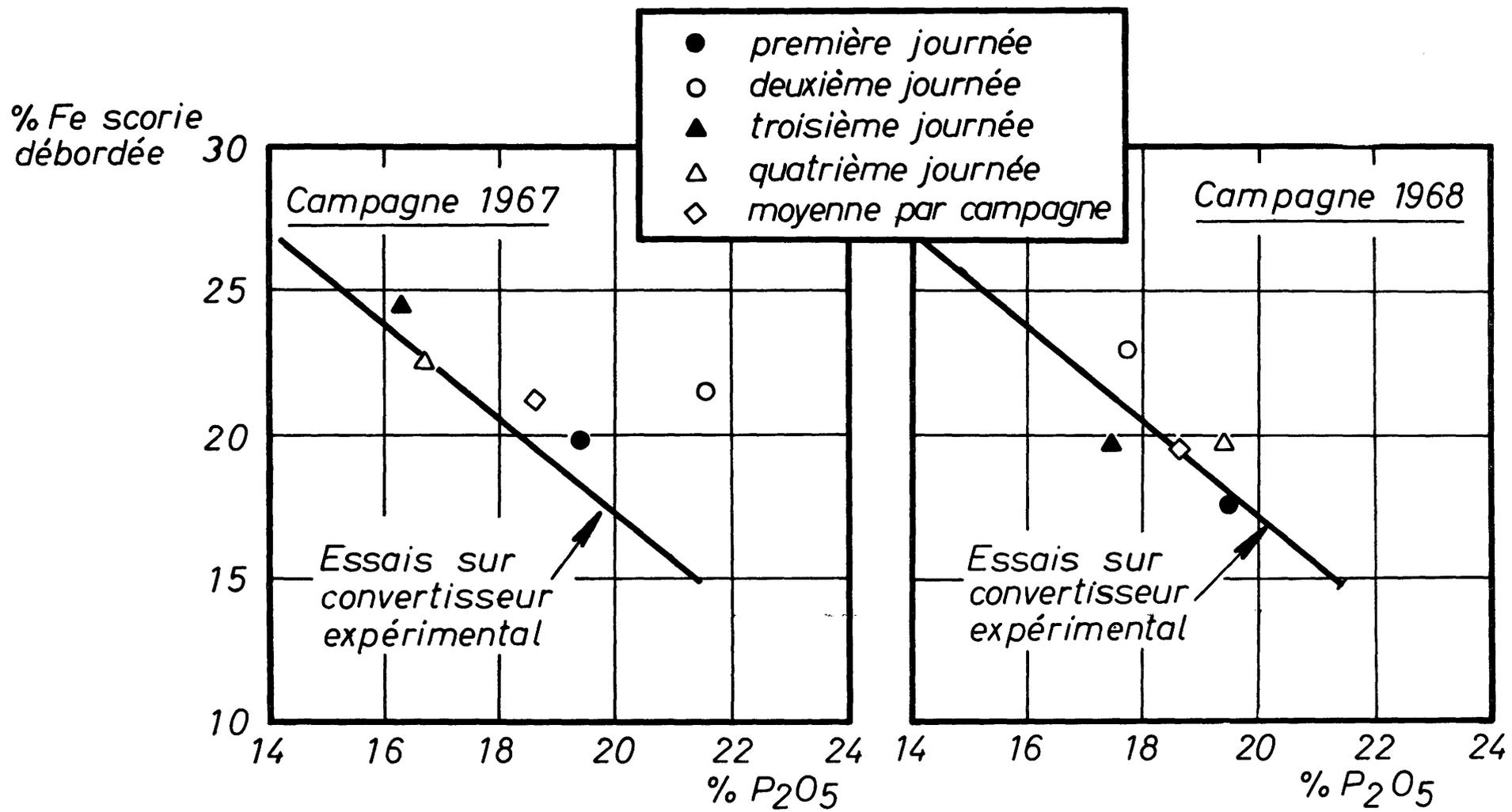


Fig. 10 : Relation Fe, P₂O₅ dans la scorie débordée.

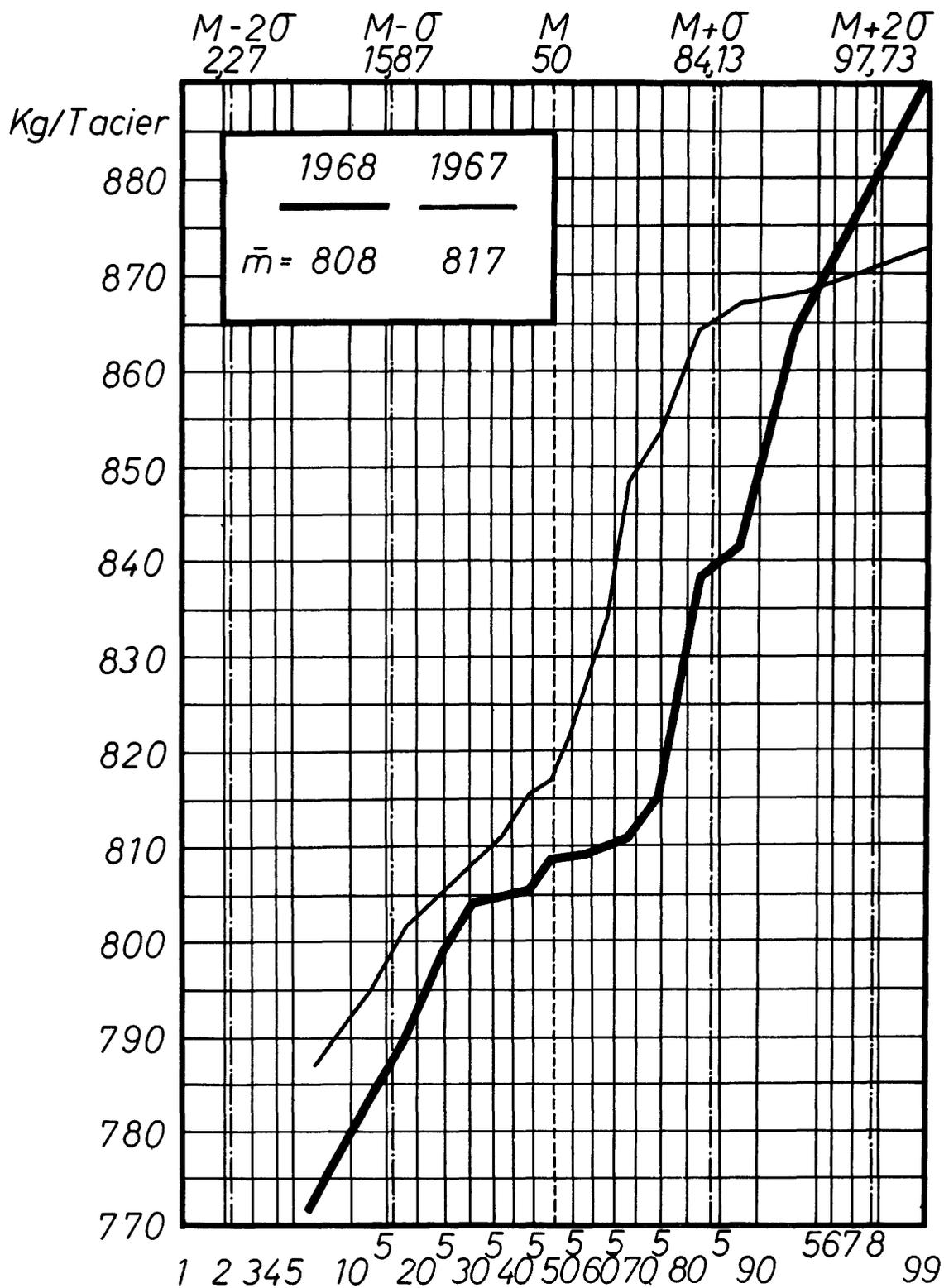


Fig.11: Mise au mille fonte en Kg / T acier.

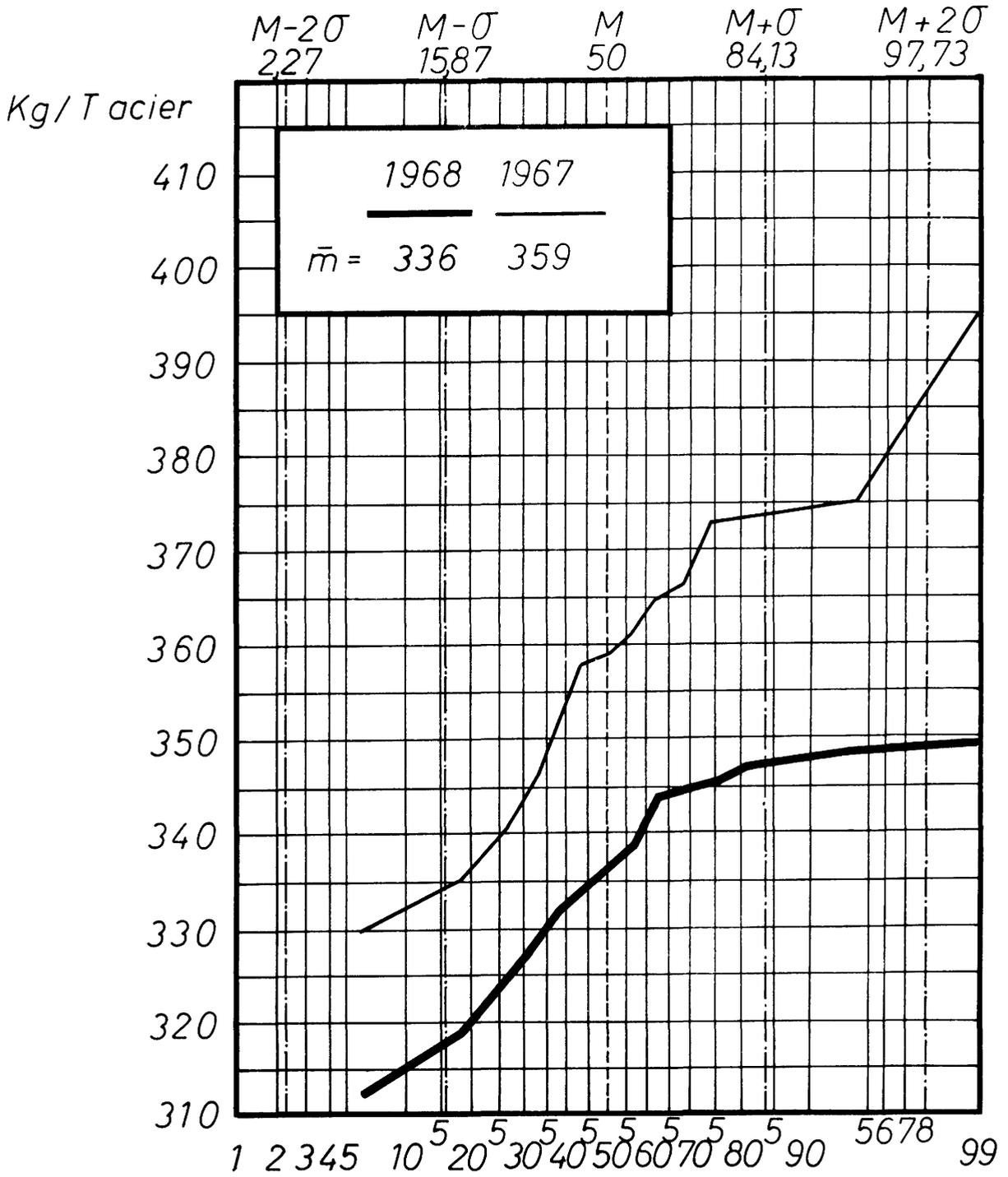


Fig. 12 : Mise au mille mitrailles en Kg/Tacier

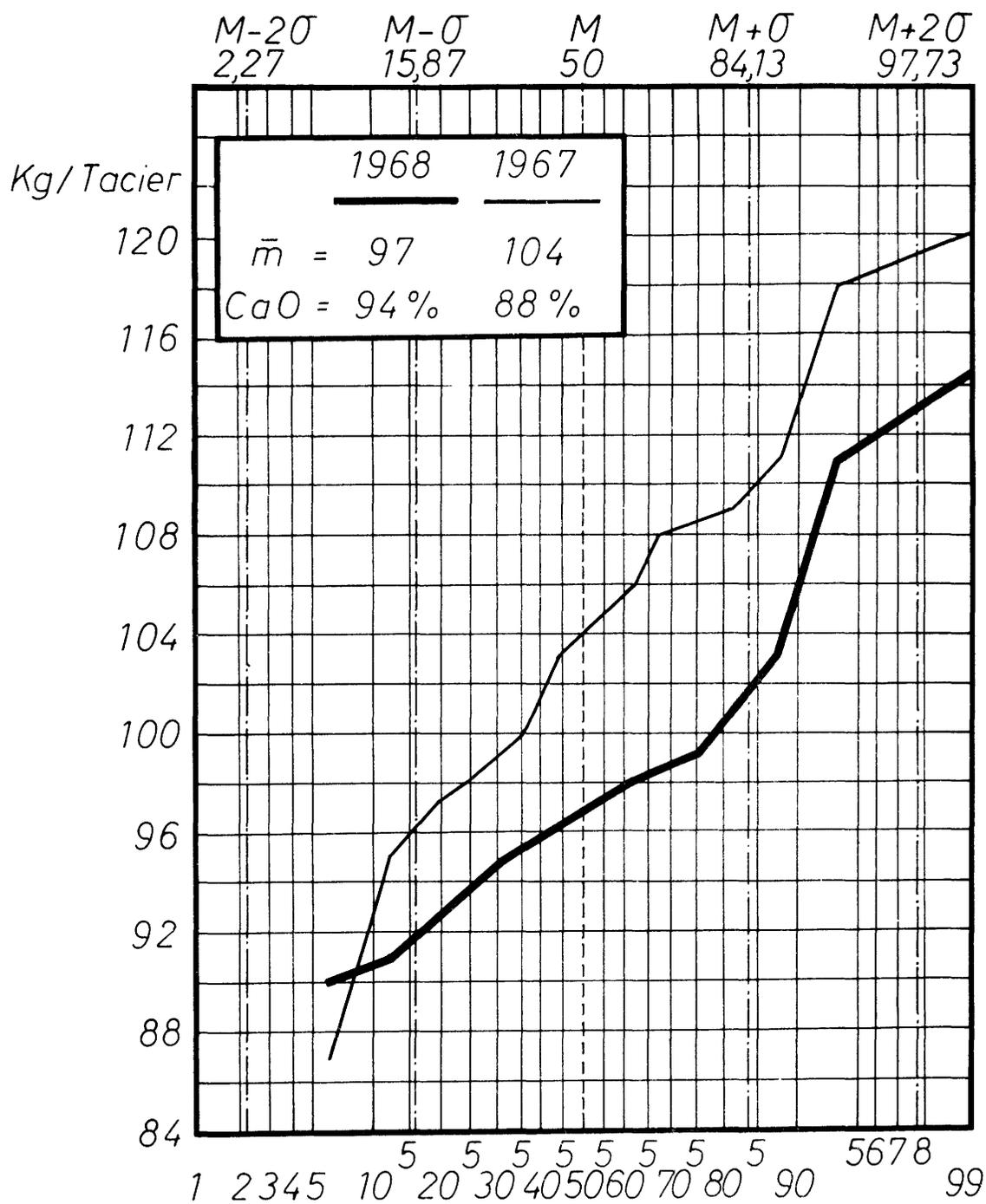


Fig. 13 : Mise au mille chaux en Kg / T acier.

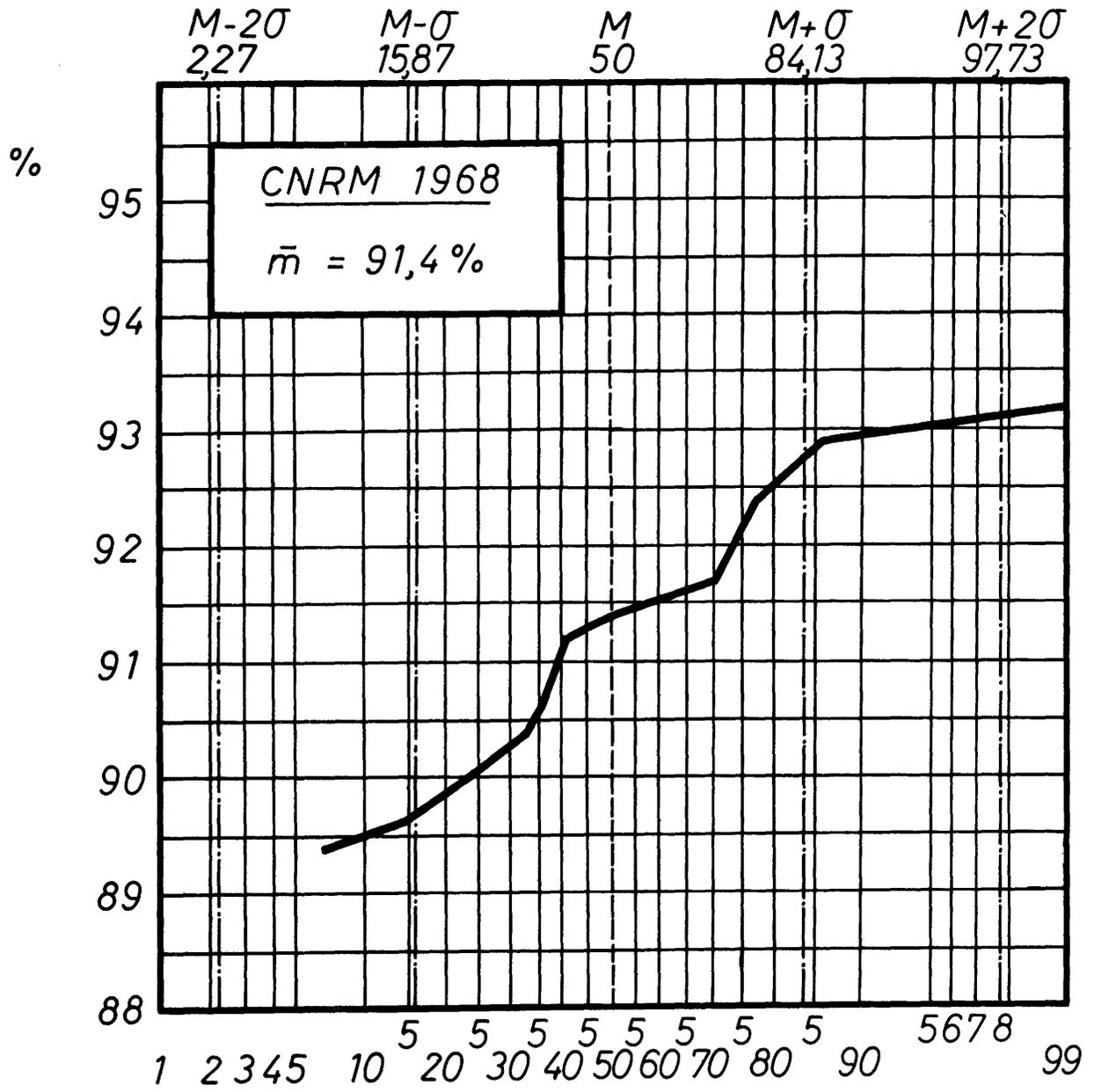


Fig. 14 : Rendement fer.

Quantité de
granules
débordés
(Kg/Tacier)

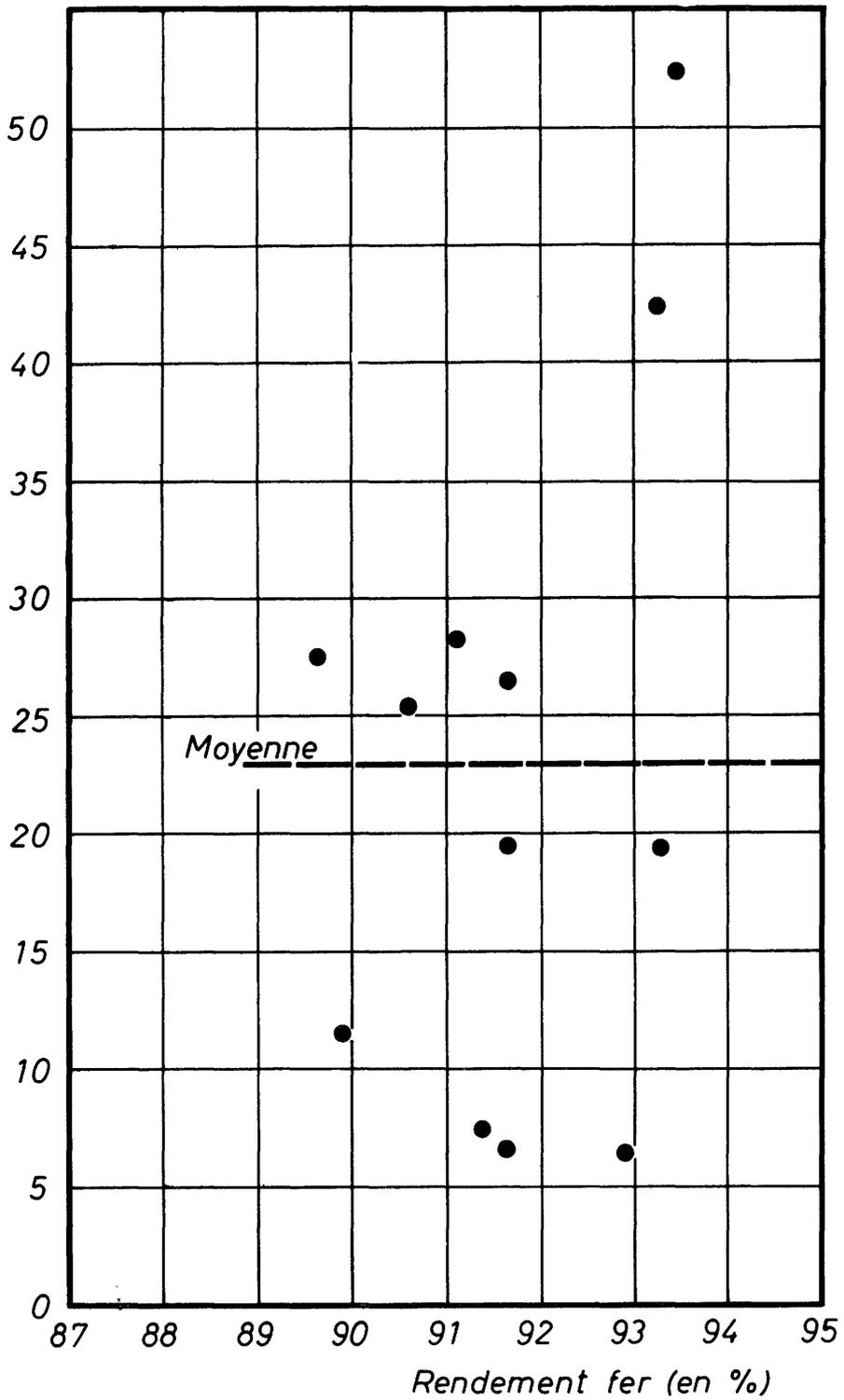


Fig. 15 : Relation entre le rendement fer et la quantité de granules débordées

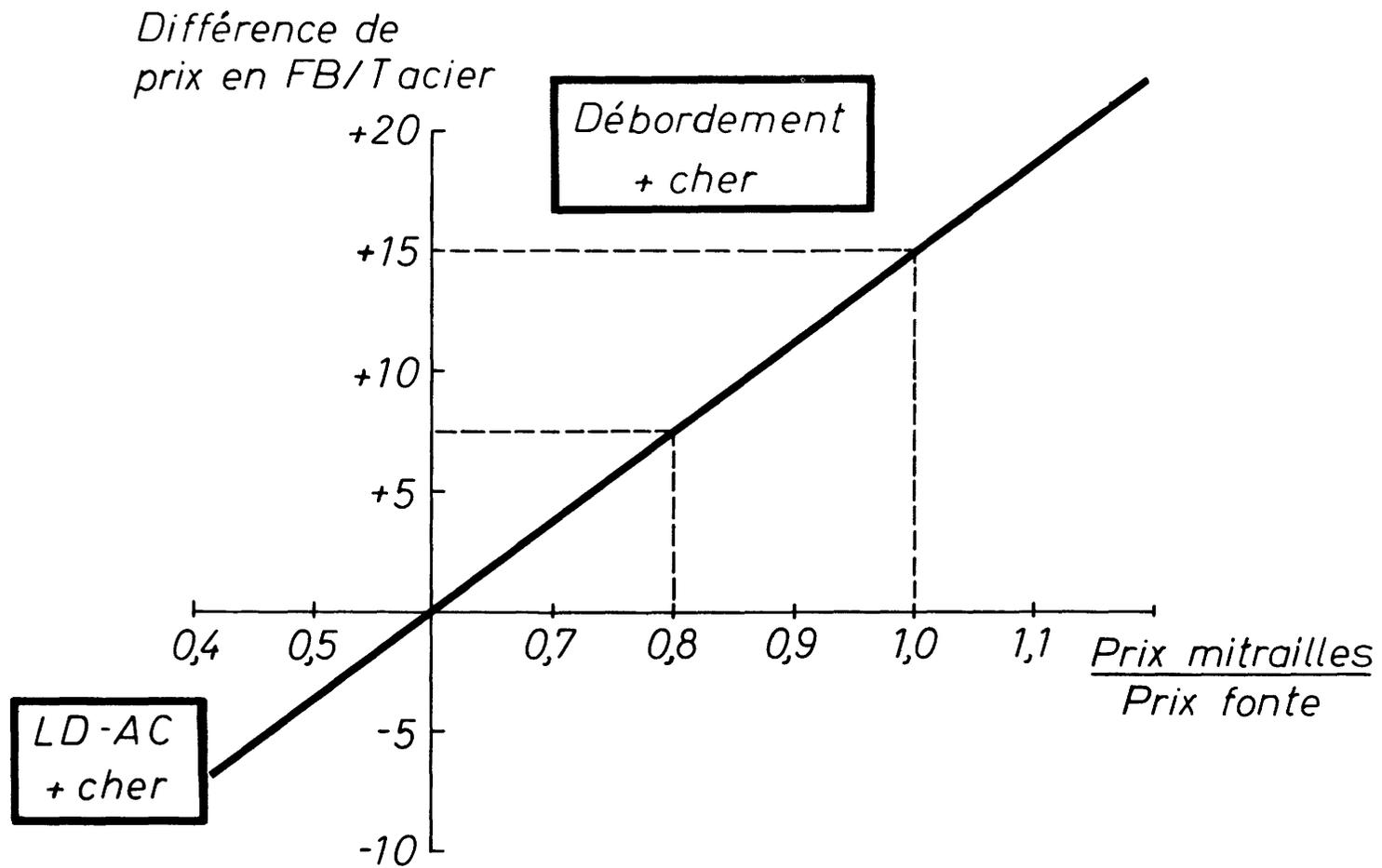


Fig. 16 : Différence des frais d'enfournements métalliques en fonction du rapport des prix de mitrailles et de fonte.

AFFINAGE DES FONTES PHOSPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

DESCRIPTION DE LA STATION DE MESURE INSTALLEE A L'ACIERIE
LD-AC DE LA S.A. METALLURGIQUE D'ESPERANCE-LONGDOZ

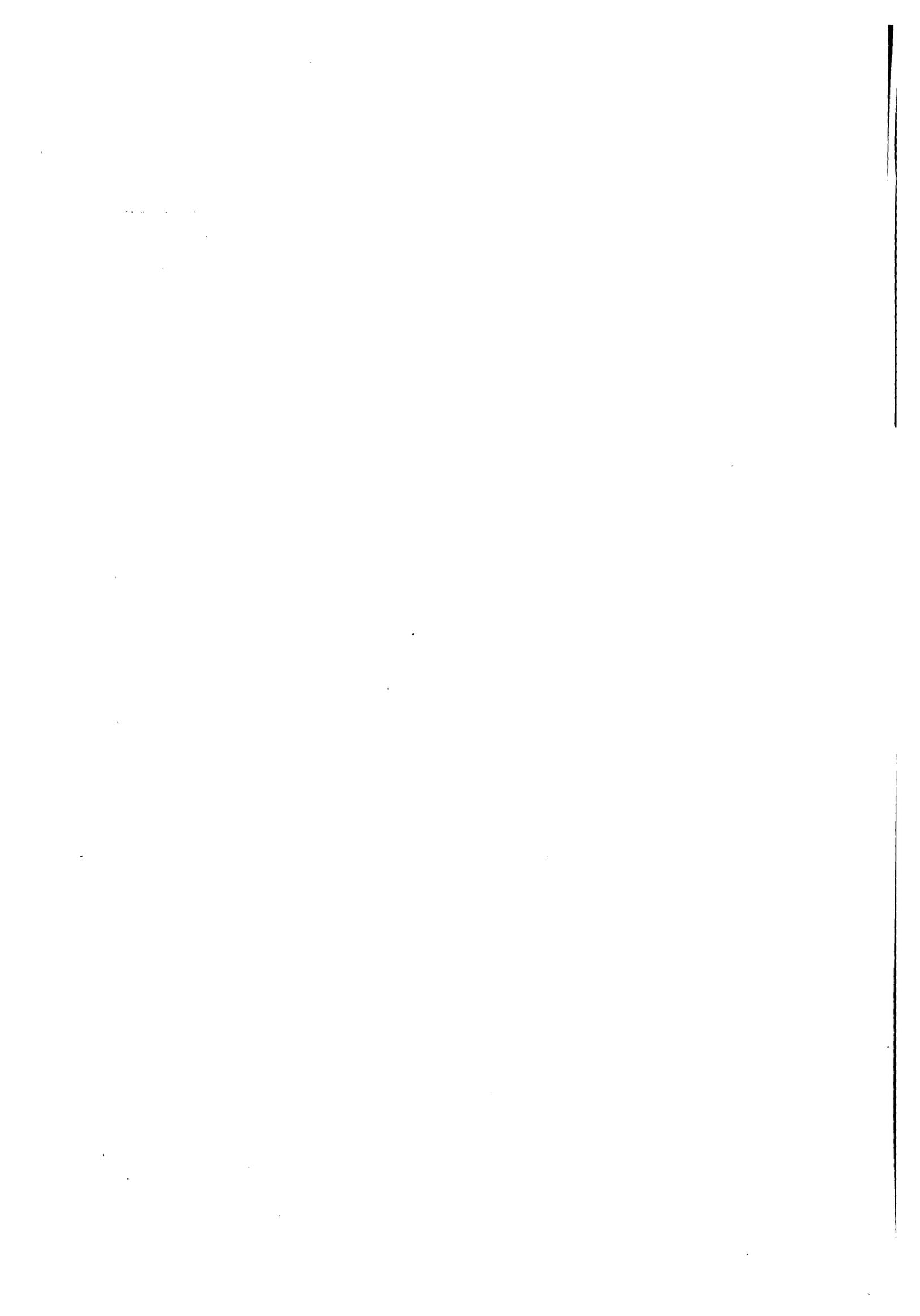
par

D. RAMELOT

C. STOLZ

H. VOLL

G. BALTHAZART



DESCRIPTION DE LA STATION DE MESURE INSTALLEE A L'ACIERIE
LD-AC DE LA S.A. METALLURGIQUE D'ESPERANCE-LONGDOZ.

* * * * *

par

D. RAMELOT,
Ingénieur

C. STOLZ,
Chef de Service Adjoint

H. VOLL,
Ingénieur

C . N . R . M .

e t

G. BALTHAZART,
Ingénieur au Service Thermique de Chertal,

S.A. Métallurgique d'Espérance-Longdoz.

I. INTRODUCTION.

=====

L'installation par le C.N.R.M. d'une station de mesure en vue de l'étude de la cinétique du procédé LD-AC vient d'être terminée sur le convertisseur n° 1 de l'aciérie de la S.A. Métallurgique d'ESPERANCE-LONGDOZ à Chertal.

Il était nécessaire de réaliser un ensemble de mesures fiables, suffisamment précises et rapides. La nécessité de centraliser celles-ci a conduit à la construction d'une cabine spécifique aux abords immédiats du convertisseur.

II. DESCRIPTION DES MESURES.

=====

A. Mesures concernant le processus (fig. 1).

1. Mesures classiques.

Le tableau de la page suivante résume les différentes mesures effectuées.

2. Capteurs nouveaux.

Aux mesures classiques fournies par ESPERANCE-LONGDOZ, viennent s'ajouter les capteurs installés par le C.N.R.M., à savoir une batterie complète d'analyse gaz, une installation de mesure de l'humidité des fumées, un capteur de mesure du bruit du convertisseur et deux cellules photoélectriques destinées à l'analyse du rayonnement de la flamme.

a) Installation d'analyse gaz.

1°) Circuit de prélèvement (fig. 2).

Sa conception tend à minimiser le temps de parcours entre le convertisseur et les analyseurs.

Pour cette raison, la sonde, refroidie par circulation d'eau sous pression, est située à 15 m environ au-dessus du bec du convertisseur. Constituée de 3 tubes coaxiaux de 2 m de long, elle présente un diamètre extérieur de 48 mm pour un diamètre intérieur de 16 mm.

Une conduite de 10 mm de diamètre amène ensuite le gaz vers la station de mesure (environ 50 m de parcours), où un éjecteur à air comprimé produit une dépression de 250 mm Hg. Cette valeur résulte d'un compromis entre la nécessité d'un grand débit de gaz dans la conduite de prélèvement d'une part, et d'un bon fonctionnement de la pompe d'autre part.

a) Entrées dans le convertisseur					
Nature	Code	Type	Echelle	Gamme	Remarques
Débit d'oxygène corrigé	QO ₂	Diaphragme	0-700Nm ³ /min	0-20 mA	Calculateur analogique H.B. + filtre
Pression d'oxygène lance 1	PO ₂		0-16 kg/cm ²	0-20 mA	Transmetteur H.B.
Pression d'oxygène lance 2	PO ₂		0-16 kg/cm ²	0-20 mA	Transmetteur H.B.
Hauteur de lance	HL	Potentiomètre	0-15,9 m	0-1,25 V	Adapté pour 10 m/Volt + filtre
Poids de chaux	Wb	Jauges de contrainte	0-20 T	0-20 mA	Système remplacé par amplification directe du signal des jauges + filtre
Débit de chaux	Qb		0-2 T/min	0-50 mA	
Addition trémie 1	Tr 1		0-10 T	0-3 V	
Addition trémie 2	Tr 2		0-6 T	0-1,8 V	
Addition trémie 3	Tr 3		0-15 T	0-4,5 V	
b) Analyse des fumées					
Analyse CO 44 m	CO/EL	I.R.	0-3 %	1-10 mV	
Analyse CO ₂ 44 m	CO ₂ /EL	I.R.	0-25 %	0-10 mV	
Analyse O ₂ 44 m	O ₂ /EL	Paramagnétique	0-21 %	0-10 mV	
Débit de fumées	Qf	Venturi	0-4.10 ⁵ m ³ /h	0-20 mA	Etalonnage radioactif
Température des fumées	Tf	Thermocouple	0-100°C	0-20 mA	Filtre
Pression absolue des fumées	Pf		700-800mm Hg	0-20 mA	Filtre

Remarque : Les notations "Filtre" dans les tableaux ci-dessus indiquent que le signal a dû être traité dans la station de mesure avant enregistrement.

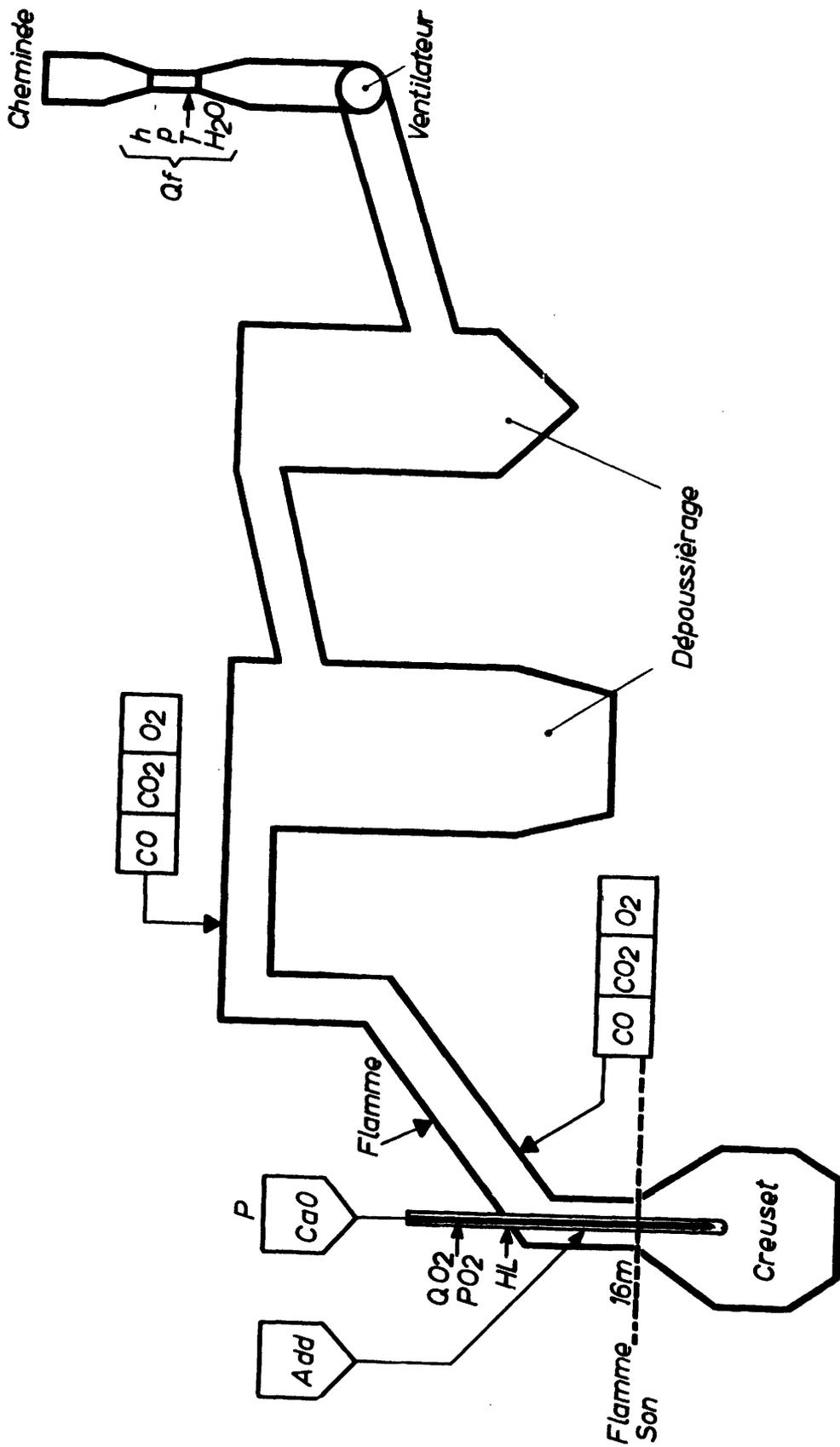


Fig.1 - Instrumentation.

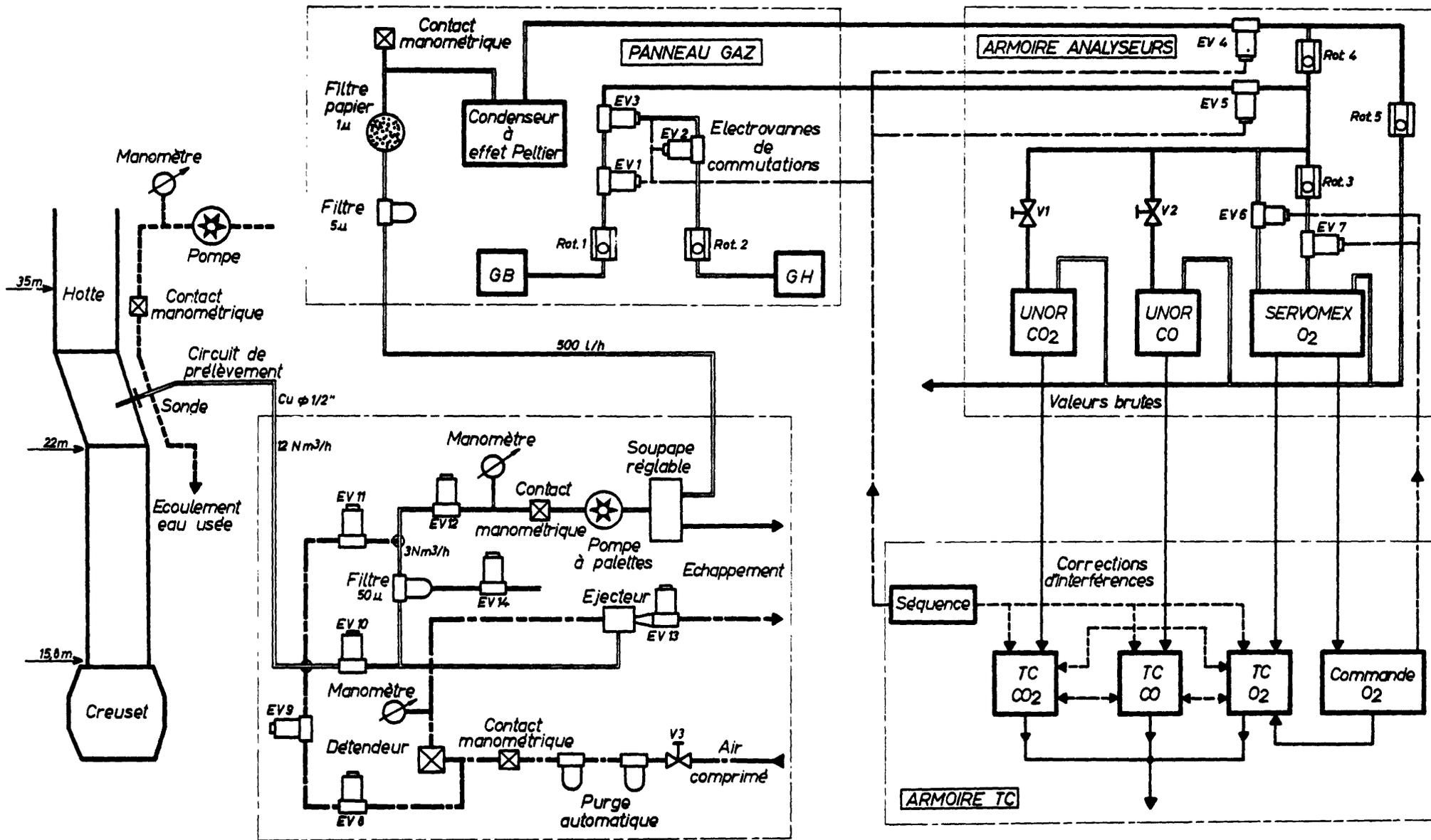


Fig. 2 - Analyse gaz - Circuit de prélèvement.

Pour la dépression choisie, les débits dans la conduite et dans la pompe sont respectivement de 14 et 3 m³/h. Une fraction (500 l/h) de ce dernier débit est envoyée par la pompe vers les analyseurs à une surpression de 250 g/cm², l'autre partie étant déviée à l'atmosphère par la soupape intégrée à la pompe.

Comme indiqué sur la figure, les analyseurs sont disposés en parallèle et une nouvelle partie du débit (\pm 300 l/h) est déviée dans un by-pass à perte de charge réglable. Le débit optimum dans les analyseurs (60 l/h) est donc obtenu à partir d'un échantillon de 14 m³/h.

2°) Circuit d'épuration des gaz.

Pour entrer dans les analyseurs, l'échantillon de gaz doit être propre et sec, la poussière et l'humidité faussant les mesures :

- par erreur à 100 % du bilan N₂ ;
- par absorption directe du rayonnement I.R. pour les analyseurs CO et CO₂ ;
- par interaction avec l'oxygène dans le champ magnétique de l'analyseur O₂ ;
- par le salissement progressif des fenêtres optiques.

Aucun filtre n'est cependant interposé dans la conduite de prélèvement entre la sonde et l'éjecteur, ce qui augmenterait inutilement le temps de parcours des gaz. La première épuration a lieu sur le débit secondaire (3 Nm³/h) avant l'entrée dans la pompe (arrêt de toutes les particules $>$ 50 μ m). Suivent alors, après la pompe, un filtre en bronze fritté (5 μ m) et un filtre à membrane de papier (1 μ m).

L'échantillon ainsi débarrassé de ses impuretés passe dans un condenseur à effet Peltier qui maintient son humidité constante à une valeur suffisamment faible pour que son influence sur les mesures soit négligeable (point de rosée à 4°C \pm 0,5°C, soit une humidité de 6 \pm 0,5 g/Nm³).

Pour pallier l'encrassement rapide du filtre primaire, l'empoussiérage éventuel de la conduite de prélèvement et le bouchage de la sonde, une injection d'air comprimé filtré et déshuilé soigneusement (8 kg/cm²) est effectuée automatiquement à la fin de chaque soufflage pendant 40 secondes (vannes 8 à 12).

3°) Circuit d'injection des gaz étalons.

La correction automatique des dérives des analyseurs requiert l'injection périodique de deux gaz étalons. Dans ce but, un système d'électrovannes EV1 à EV5 est utilisé dans une disposition telle qu'une fuite à l'une d'entre elles ne puisse donner lieu à un passage du gaz dans le circuit d'analyse en dehors des périodes d'étalonnage.

Lors du passage d'un gaz étalon, dont le débit est réglé par le rotamètre correspondant (R1 ou R2) sur le panneau gaz, EV4 est fermée et EV5 ouverte. Dès lors, le by-pass est hors circuit et le débit dans les analyseurs peut être amené à sa valeur nominale à l'aide des vannes manuelles V1, V2 et de R3. Lors du passage du gaz hotte (EV5 fermée et EV4 ouverte), R4 et R5 sont réglés de façon telle que le débit dans les analyseurs reste identique à ce qu'il est pendant le tarage.

4°) Les analyseurs.

Les analyseurs utilisés sont de marque MAIHAK UNOR 2 pour le CO et le CO₂ et SERVOMEX OA 137 pour l'O₂.

Le premier type d'appareil, basé sur l'absorption d'un rayonnement I.R. est bien connu et ne sera plus décrit ici. Nous nous attacherons plus particulièrement à la description de l'analyseur d'oxygène (fig. 3).

Si l'on excepte les gaz tels que NO et NO₂, absents des réactions qui sont l'objet de nos analyses, l'O₂ est le seul gaz fortement paramagnétique, c'est-à-dire attiré par un champ magnétique. Dans sa conception, le SERVOMEX utilise cette propriété, mais le procédé de mesure des effets de celle-ci est original :

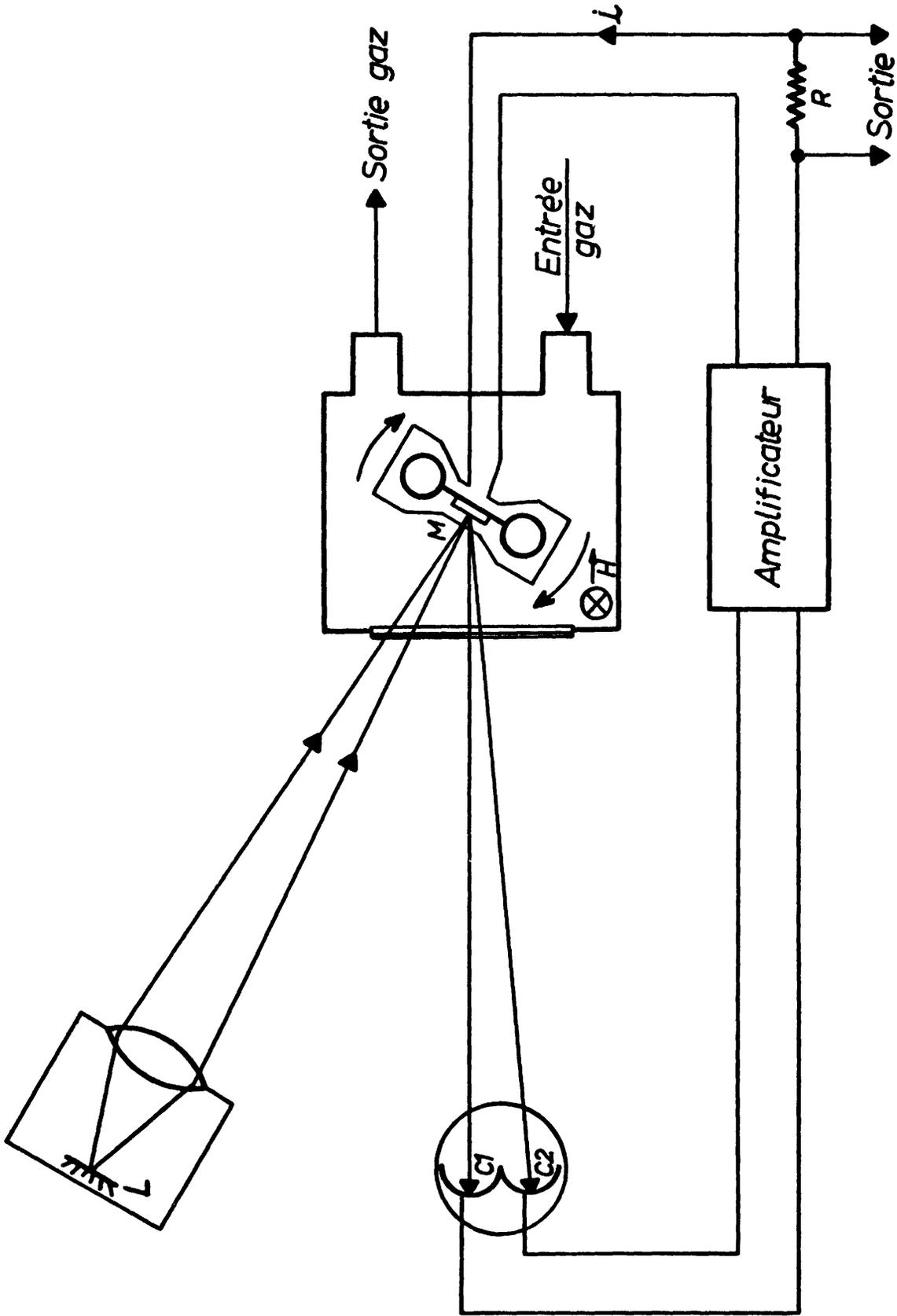


Fig.3 - Analyseur d'oxygène: cellule de mesure.

Le gaz à analyser passe dans une cellule parallépipédique placée de façon dissymétrique dans un champ magnétique \vec{H} . A l'intérieur de cette cellule, est suspendue une haltère formée de deux sphères en quartz reliées par un miroir. Cette haltère pivote autour de son axe sous l'effet du déplacement gazeux dû à l'attraction de O_2 par \vec{H} . Le faisceau lumineux provenant d'une lampe L est réfléchi par le miroir vers deux cellules voisines C1 et C2.

Un amplificateur compare les signaux des cellules et agit de manière à ce qu'ils soient toujours égaux, en régulant le courant dans une bobine perpendiculaire à \vec{H} et entourant l'haltère. L'intensité de ce courant mesure donc le couple d'équilibrage de l'haltère et par suite, la quantité d'oxygène présente dans la chambre de mesure.

5°) Dispositif de tarage automatique.

Le signal de sortie des analyseurs dérive au cours du temps pour différentes causes :

- variations de température de la chambre de mesure ;
- variations de pression dans celle-ci ;
- instabilité de l'électronique ou de la partie physique de l'analyseur (vieillesse de la source I.R. ou porosité de la membrane du récepteur notamment).

Le premier facteur voit son influence considérablement réduite par l'emploi d'une armoire thermostatisée (T interne de $30 \pm 0,5^\circ C$) dont l'effet s'ajoute à la compensation électronique de température qui équipe les analyseurs UNOR et SERVOMEX.

Sur une heure, les variations de pression sont lentes et, si l'on se base sur les essais réalisés en laboratoire (voir IV.C.3.c) petites vis-à-vis des dérives dues au troisième facteur. De ce fait, un équipement de tarage automatique est nécessaire et une régulation de pression devient inutile.

L'installation de tarage automatique remplit les fonctions suivantes :

- adapter et filtrer le signal de l'analyseur ;
- linéariser au besoin la courbe d'étalonnage ;
- corriger automatiquement deux points de la droite obtenue ;
- corriger les erreurs dues à la présence de composants autres que celui à analyser (phénomène d'interférence). Ce dernier point est le perfectionnement le plus récent apporté au système.

b) Mesure de l'humidité des fumées.

Une mesure précise du débit des fumées dans la cheminée exige la connaissance des facteurs suivants :

- pression différentielle au venturi ;
- température et pression absolue des fumées ;
- densité de celles-ci.

Ce dernier facteur peut être connu par la composition des fumées (donnée par l'analyse gaz) et par leur teneur en eau. Pour déterminer cette dernière, nous avons installé un hygromètre à point de rosée capable de mesurer les points de rosée élevés (80°C).

1°) Circuit de prélèvement (fig. 4).

Le gaz est aspiré dans une conduite de 8 m de long ($\varnothing = 1/4''$) chauffée et calorifugée sur tout son parcours, de façon à éviter toute condensation d'eau avant la mesure (température réglée de 90°C).

Comme pour le circuit d'analyse gaz, le premier filtre (interne à l'appareil) se situe sur le débit secondaire entrant dans l'hygromètre. Deux filtres condenseurs recueillent le condensat dans les portions de conduite non chauffées comprises entre l'hygromètre et la pompe.

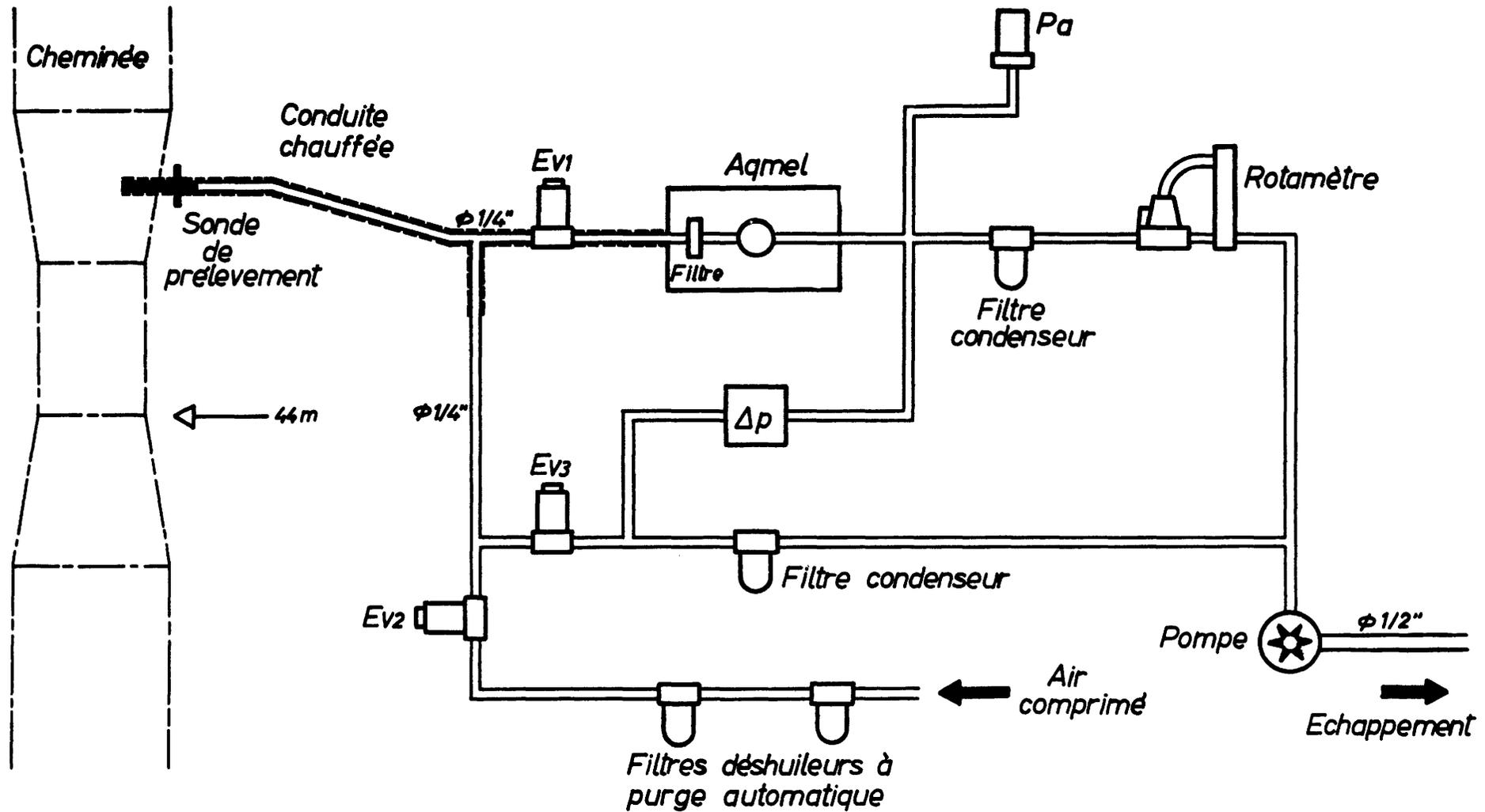


Fig.4 - Hygromètre à point de rosée.
Circuit de prélèvement.

Le circuit de prélèvement est également muni d'un système de débouchage automatique (vannes 1 à 3).

2°) Description de l'hygromètre à point de rosée.

L'hygromètre utilisé est de type AQMEL HCP -2S-100, muni d'une tête de mesure 2HO3P, permettant des abaissements de température de 60°C en dessous de la température du boîtier (100°C).

- Principe de la mesure (fig. 5).
.....

Le faisceau lumineux issu de la lampe L est réfléchi par un miroir en or M sur une photorésistance R. Le gaz à analyser effleure le miroir en traversant la chambre de mesure.

Dès la mise en marche de l'appareil, le miroir est porté à une température (réglable) suffisamment élevée pour que tout condensat sur le miroir disparaisse. Le flux lumineux réfléchi est donc maximum et R minimum. Le pont de Wheatstone, dont R constitue l'une des branches, s'équilibre alors automatiquement grâce au servomoteur S entraînant la résistance R2.

Ce tarage effectué, le régulateur (P.I.D.) entre en action et refroidit le miroir à l'aide d'éléments à effet Peltier, jusqu'à apparition d'un condensat sur celui-ci. Le flux lumineux est alors diffusé et R augmente d'autant plus que l'épaisseur du condensat croît. En imposant comme seuil de régulation, une valeur déterminée au déséquilibre du pont, on impose donc une certaine épaisseur de condensat sur le miroir. A la surface, les conditions de saturation sont réalisées. Un micro-thermocouple T placé immédiatement sous la surface indique la température du point de rosée du gaz.

Après ce bref rappel du principe commun à tous les hygromètres AQMEL, nous envisagerons les dispositions particulières prises pour le type HCP-2S-100.

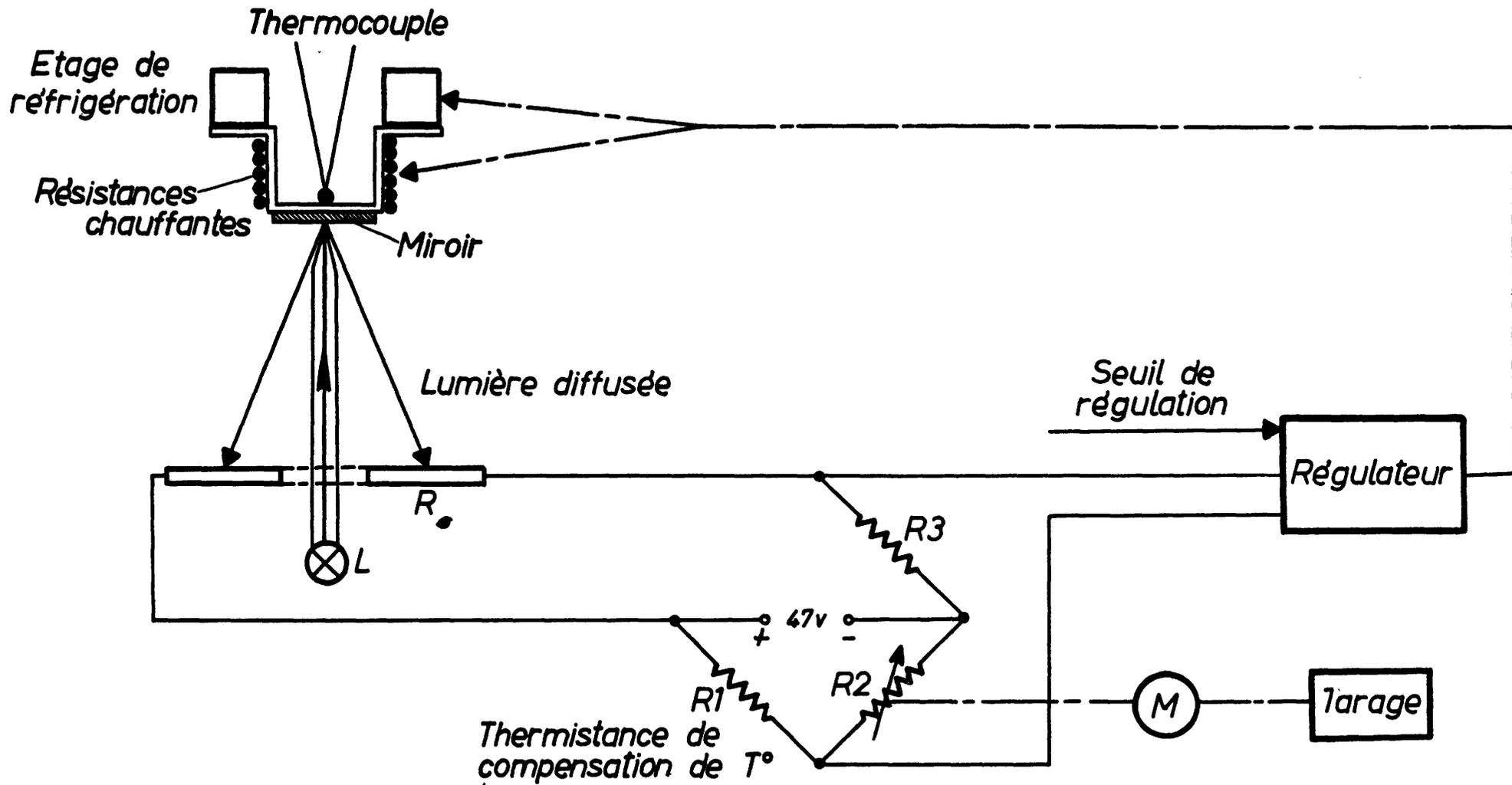


Fig.5 _ Schéma de principe _ Hygromètre Aqmel.

- L'hygromètre HCP-2S-100 (figure 6).
.....

Des mesures préliminaires effectuées sur la cheminée de Chertal ont montré que la température des fumées variait entre 30°C l'hiver et 80°C l'été. L'hygromètre choisi permet de mesurer dans les conditions les plus défavorables (fumées saturées en eau) des points de rosée atteignant 90°C.

Pour ce faire, il est nécessaire de créer artificiellement, dans le boîtier entourant la tête de mesure, une température ambiante supérieure à celle du gaz à analyser, température à partir de laquelle les deux étages de réfrigération peuvent travailler dans la zone désirée.

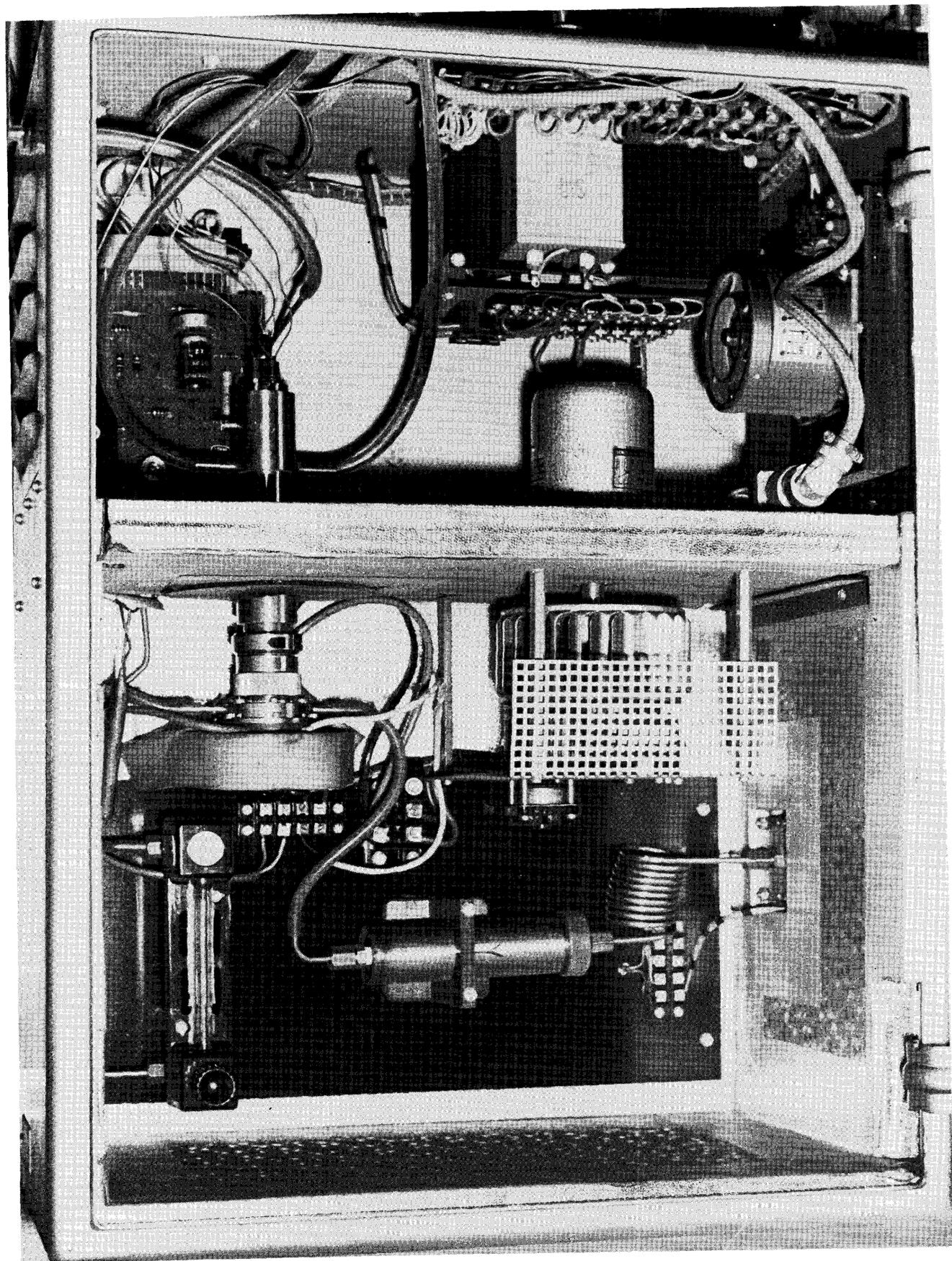
On reconnaît sur la figure les résistances de chauffage CH, le ventilateur de circulation d'air V, les parois métallisées destinées à minimiser les pertes thermiques, la carte de régulation de température RT (réglable jusqu'à 105°C) et le thermomètre extérieur T. La photorésistance présentant une dérive importante au-dessus de 50°C, elle a été éloignée de la tête de mesure à l'aide d'un prolongateur de bloc optique P et est constamment refroidie par un débit d'air, fourni par une pompe auxiliaire. Vu la distance ainsi créée entre le miroir M et la lampe L, la forme de celle-ci a été étudiée pour focaliser au mieux le faisceau lumineux.

c) Mesure du bruit du convertisseur et du rayonnement de la flamme.

Aux mesures indispensables que constituent l'analyse des gaz et l'humidité des fumées, s'ajoutent deux types d'appareil réalisés au C.N.R.M. en vue d'analyser le bruit du convertisseur et le rayonnement de la flamme.

Le premier d'entre eux est destiné à donner une indication sur le niveau de la mousse dans le creuset. Ce "sonomètre" amplifie le son venant du micro, puis, par filtres accordés, sélectionne une bande passante déterminée de son spectre. Les fréquences centrales de ces bandes sont, au choix de 150, 250, 350 ou 450 Hz pour les modules standards. Une sortie non filtrée est également présente.

Fig. 6 - Hygromètre Agmel.
Enceinte de mesure.



Quant à la mesure du rayonnement de la flamme, elle est assurée au niveau du bec et aux 30 mètres par des cellules au germanium (OAP 12), dont les signaux peuvent être amortis et atténués à divers degrés.

Micro et cellules sont enfermés dans des boîtiers standardisés refroidis par circulation d'eau.

B. Problèmes annexes.

1. Etude du système d'injection de chaux en LD-AC.

L'injection de chaux est réalisée par le passage de l'oxygène dans un ballon (KLINGER) rempli de chaux en poudre (fig. 7). Sans nous attarder outre mesure sur le fonctionnement de ce ballon, signalons qu'une partie de l'oxygène venant de A emprunte la conduite AT, dont la perte de charge est réglée par la tuyère T. Pour injecter de la chaux, on ouvre la vanne 11. L'oxygène passe au travers des plaques de fluidisation F, en brassant la chaux qui repose dessus. L'oxygène chargé de chaux pulvérulente emprunte alors la conduite DE, dont l'orifice peut être plus ou moins obstrué par le déplacement d'un pointeau P.

L'étude du KLINGER a été entreprise dans deux buts distincts :

1. Permettre l'injection, à un moment donné, d'une quantité déterminée de chaux en un temps et selon un débit donnés.
2. Posséder à tout instant une mesure précise du débit du mélange "O₂ - chaux " dans la lance, à partir des deux données d'entrée (poids du ballon et débit d'oxygène pur) et de mesures de pression judicieusement choisies.

Ces deux points ne sont pas nécessairement liés. Toutefois, la réalisation du premier entraîne automatiquement celle du second. Ces considérations nous ont amenés à installer un nombre important de capteurs :

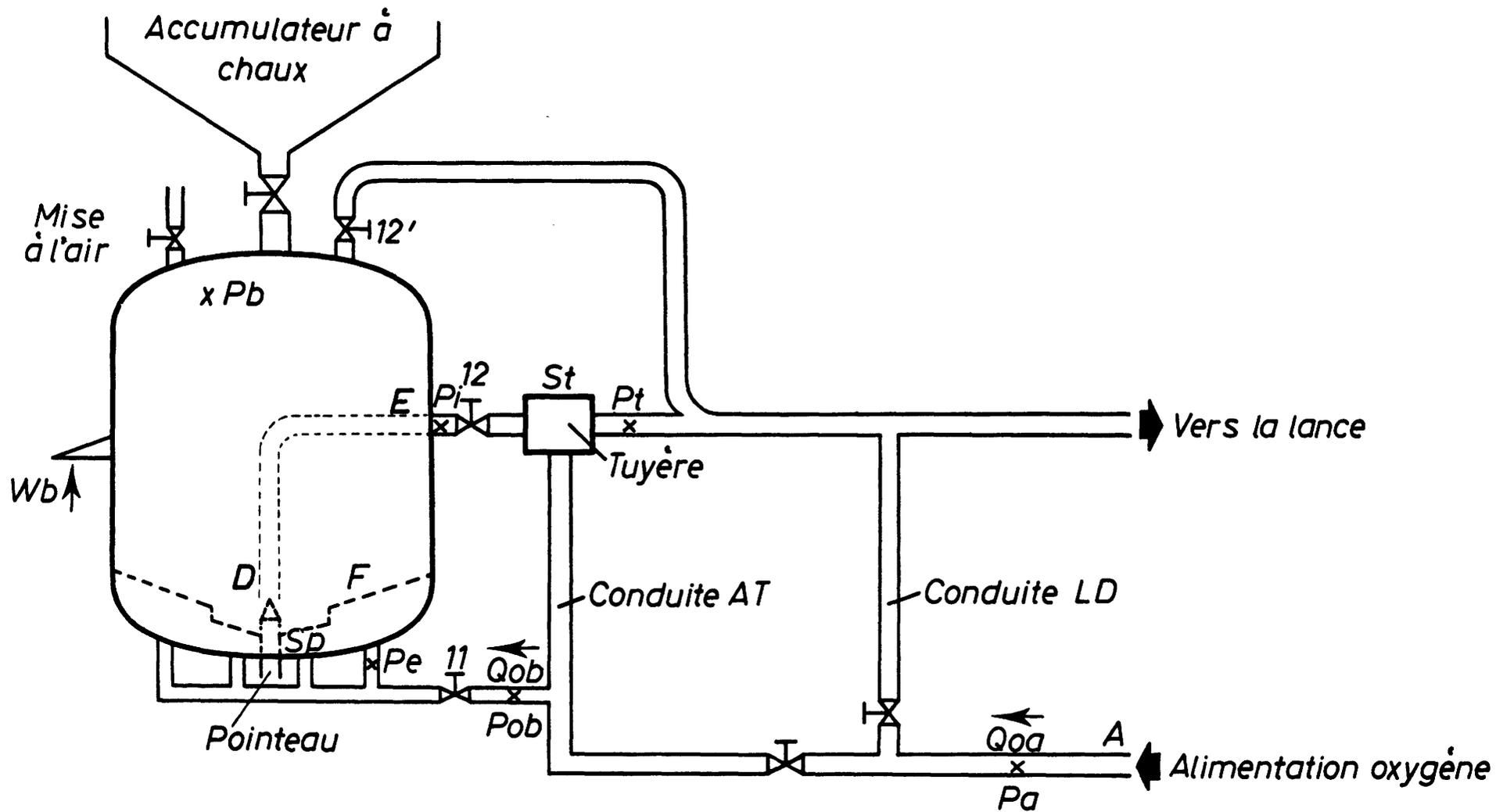


Fig. 7 - Schéma simplifié du distributeur de chaux en poudre et localisation des points de mesure.

- Positions de la tuyère et du pointeau (St et Sp) : potentiomètres 10 K, 1 tour alimentés sous 10 VDC.
- Débit d'oxygène primaire corrigé (Poa) (voir II.A.1).
- Poids de chaux (Wb) : pesons à jauge de contrainte.
- Pression de l'oxygène d'alimentation (Pa) (0-40 kg/cm²).
- Pression sous le ballon (Pe) (0-16 kg/cm²).
- Pression dans le ballon (Pb) (0-16 kg/cm²).

Toutes ces mesures nous ont été fournies par ESPERANCE-LONGDOZ, les trois derniers capteurs ayant été commandés spécialement (temps de réponse de 0,1 sec).

- Débit d'oxygène secondaire (Qob) : capteur de pression différentielle (5.000 mm CE fs). Cette mesure a demandé une modification de l'installation pour que le diaphragme puisse travailler dans des conditions normales.
- Pression d'oxygène secondaire (Pob) : Capteur 250 psi fs (relatif).
- Pression intermédiaire (Pi) : capteur 200 psi fs (relatif)
- Pression d'oxygène après tuyères (Pt) : capteur 200 psi fs (absolu).

Ces capteurs ont été commandés pour ces essais par le C.N.R.M. Leur bande passante est de 10 kHz et leur précision est de 0,1 % du fond d'échelle.

+ +

+

III. DESCRIPTION DE LA STATION DE MESURE.

=====

A. Situation.

L'emplacement de la station de mesure résulte des considérations suivantes :

- Choix du creuset : Le creuset n° 1, qui est le plus récent des trois et qui présente l'avantage supplémentaire d'une possibilité éventuelle de soufflage LD.

- Choix de l'emplacement : Sur le plancher n° 2 (15,8 m) au niveau du bec du convertisseur (fig. 8). Cette position était très favorable du point de vue observation visuelle des coulées. Le taux de poussières dans l'air y était également plus faible qu'aux niveaux supérieurs et la place nécessaire existait.

La cabine occupe une surface de 3,5 x 5 m². Sa hauteur utile est de 2,5 m. Constituées de panneaux métalliques soudés supportés par une structure de poutrelles, les parois sont recouvertes intérieurement d'un revêtement ignifuge. Une fenêtre de 70 x 70 cm², protégée contre les projections par un treillis métallique, permet de voir le convertisseur. Une issue de secours s'ouvre sur le côté de la cabine non exposé aux projections.

B. Description.

La figure 9 représente l'intérieur de la station de mesure et son environnement immédiat. On y distingue successivement :



Fig. 8 - Vue générale de la station de mesure.

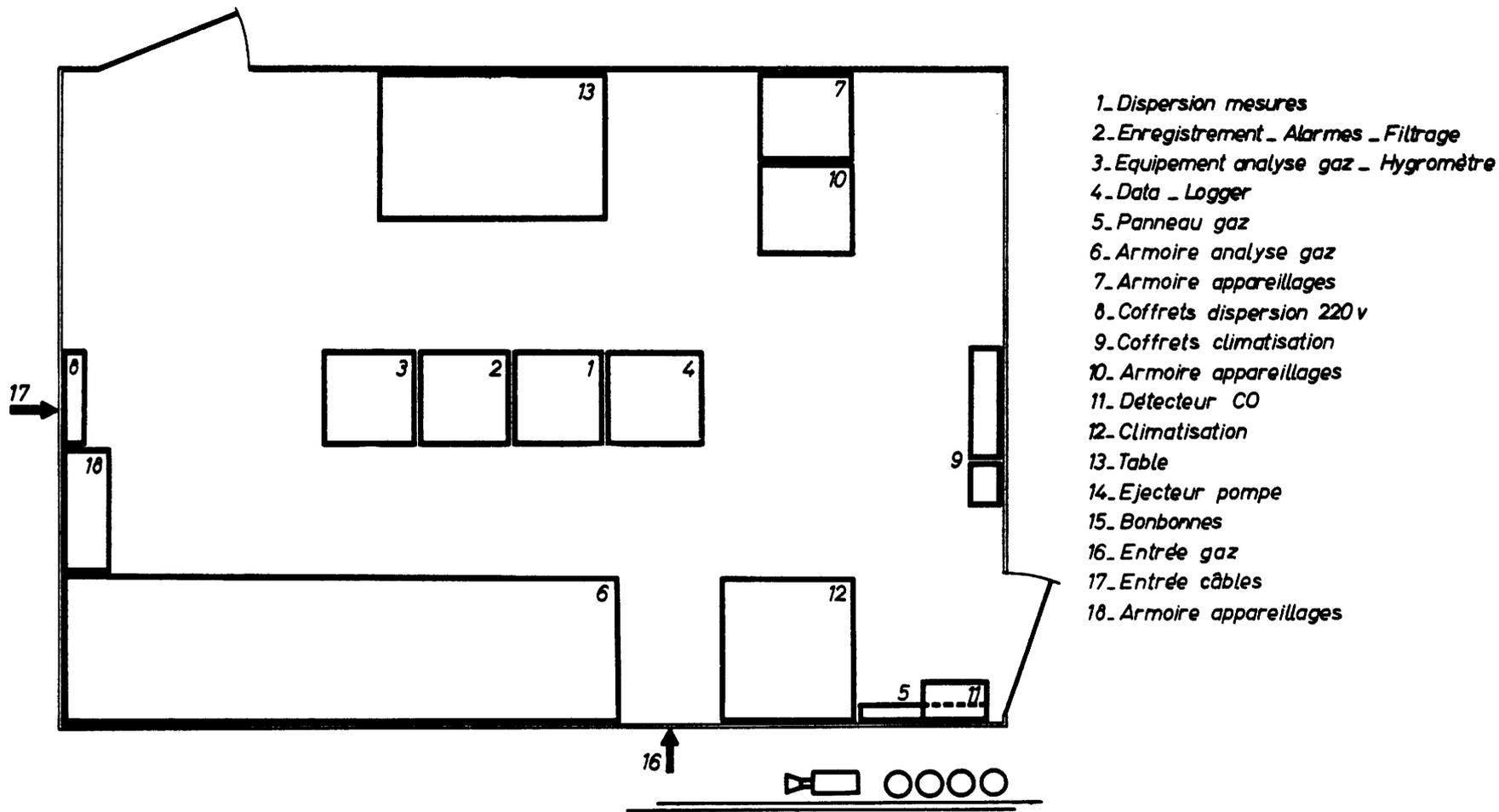


Fig.9 - Station de Mesures - Vue en plan.

1. Une armoire de centralisation des mesures (1).
2. Une baie d'enregistrement (2).
3. Le data-logger (4).
4. Les éléments de l'installation d'analyse gaz :
 - a) la pompe et l'éjecteur à air comprimé (14) ;
 - b) les bonbonnes de gaz étalons (15) ;
 - c) le panneau de traitement des gaz (5) ;
 - d) l'armoire thermostatisée (6) ;
 - e) la baie électronique de tarage automatique (3).

1. Centralisation des mesures (fig. 10).

La baie de centralisation des mesures comprend un bornier de type FASTON (450 paires de bornes comportant chacune 4 contacts). La conception et le câblage de celle-ci répondent aux critères suivants :

- a) Tous les signaux entrant ou sortant de la cabine doivent passer par cette baie.
- b) Une réserve de 50 paires de bornes est nécessaire en vue de nouveaux signaux éventuels.
- c) Tous les signaux partant vers les différents appareils de mesure (enregistreurs potentiométriques, indicateurs et enregistreur galvanométriques, enregistreurs magnétiques et data-logger) doivent être pris sur la face avant de la dispersion. Tous les signaux arrivant ou partant de celle-ci vers un filtrage ou une adaptation éventuelle doivent l'être sur la face arrière.
- d) Tous les pontages se font sur la face arrière.
- e) Les raccordements doivent être aisés et rapides (d'où le choix du type FASTON).
- f) Les câbles de liaison au data-logger et aux enregistreurs doivent être suffisamment longs pour que n'importe lequel d'entre eux puisse être raccordé à n'importe quelle borne de la dispersion.
- g) Les départs vers un appareil donné doivent se faire à partir des bornes portant le même repère pour tous les signaux.

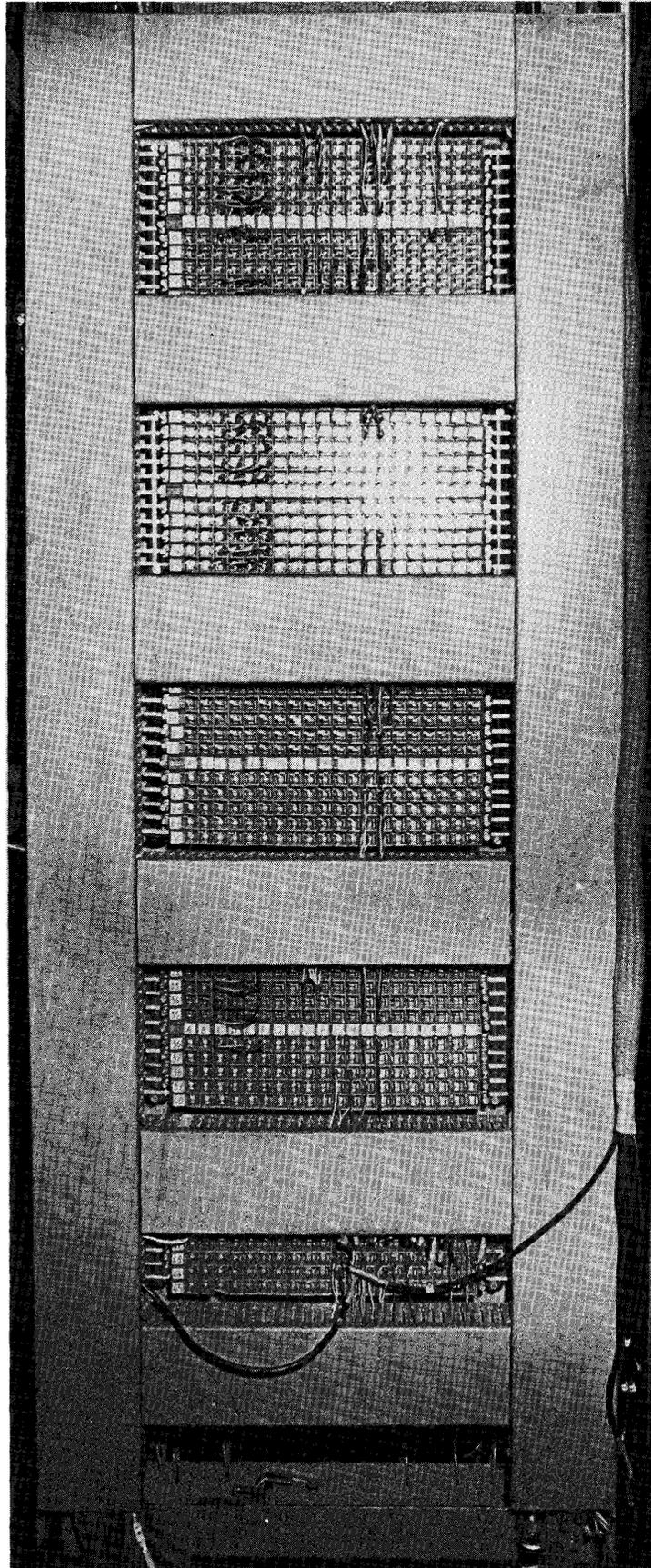


Fig. 10 - Baie de centralisation des mesures.

Les avantages d'une telle disposition sont une grande clarté, un repérage rapide des bornes relatives à un instrument donné et une grande rapidité de connexion. Une liaison par casques émetteurs-récepteurs permet la communication entre la station de mesure et la cabine de l'opérateur (niveau 9 m) d'une part, et l'armoire de l'hygromètre (niveau 44 m) d'autre part.

2. La baie d'enregistrement.

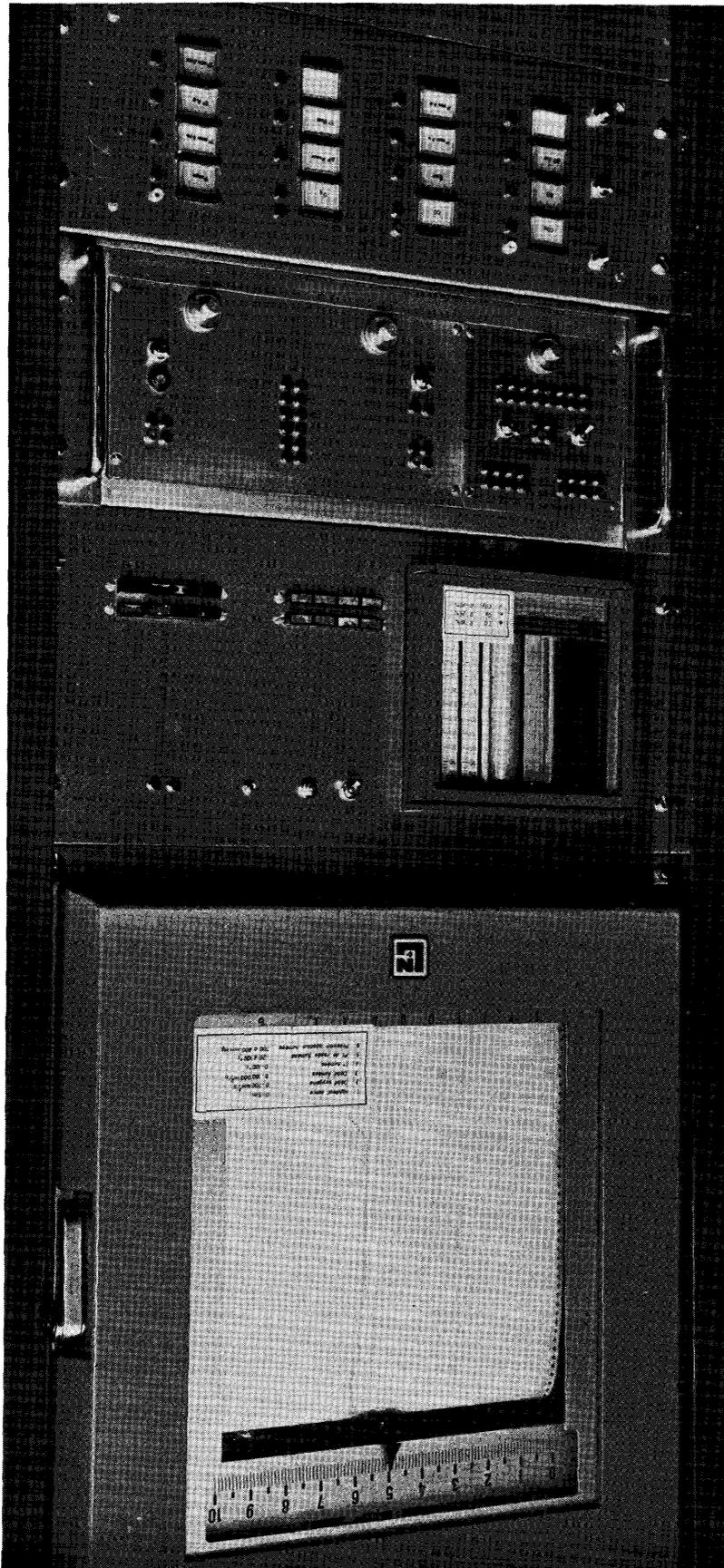
La figure 11 montre de haut en bas :

- a) Un enregistreur multipoint (6 courbes à zéro central, vitesse de déroulement 12"/h, 1 cycle de mesure toutes les 30 secondes), sur lequel sont imprimés en permanence des signaux à variations lentes : HL, Qo2, ΔH_f , Tf, Pf, T rosée.
- b) Un enregistreur à 3 courbes continues pour la visualisation de la composition des fumées (CO₂, CO, O₂).
- c) A côté de celui-ci, un dispositif permettant l'injection d'un signal de référence réglable, soit à la place de signaux choisis, soit sur des canaux particuliers.
- d) Un module d'adaptation de signaux comprenant 4 filtres passe-bas (élimination du bruit provenant de la transmission à distance des signaux), un amplificateur à haut gain suivi d'un filtre actif du quatrième ordre (mesure de l'indication de la jauge donnant le poids de chaux), un adaptateur d'impédance (lecture directe de la hauteur de lance en mètres) et deux amplificateurs.
- e) Un module "Alarmes" sur lequel nous reviendrons plus loin.

3. Le panneau de traitement des gaz.

Les filtres secondaires, le condenseur à effet Peltier, son alimentation et le récipient destiné à recueillir le condensat, le coffret de commande automatique de débouchage du circuit de prélèvement, les électrovannes et les rotamètres destinés au tarage automatique des analyseurs sont rassemblés sur un panneau placé dans un coin de la cabine (fig. 12).

Fig. 11 - Baie d'enregistrement.



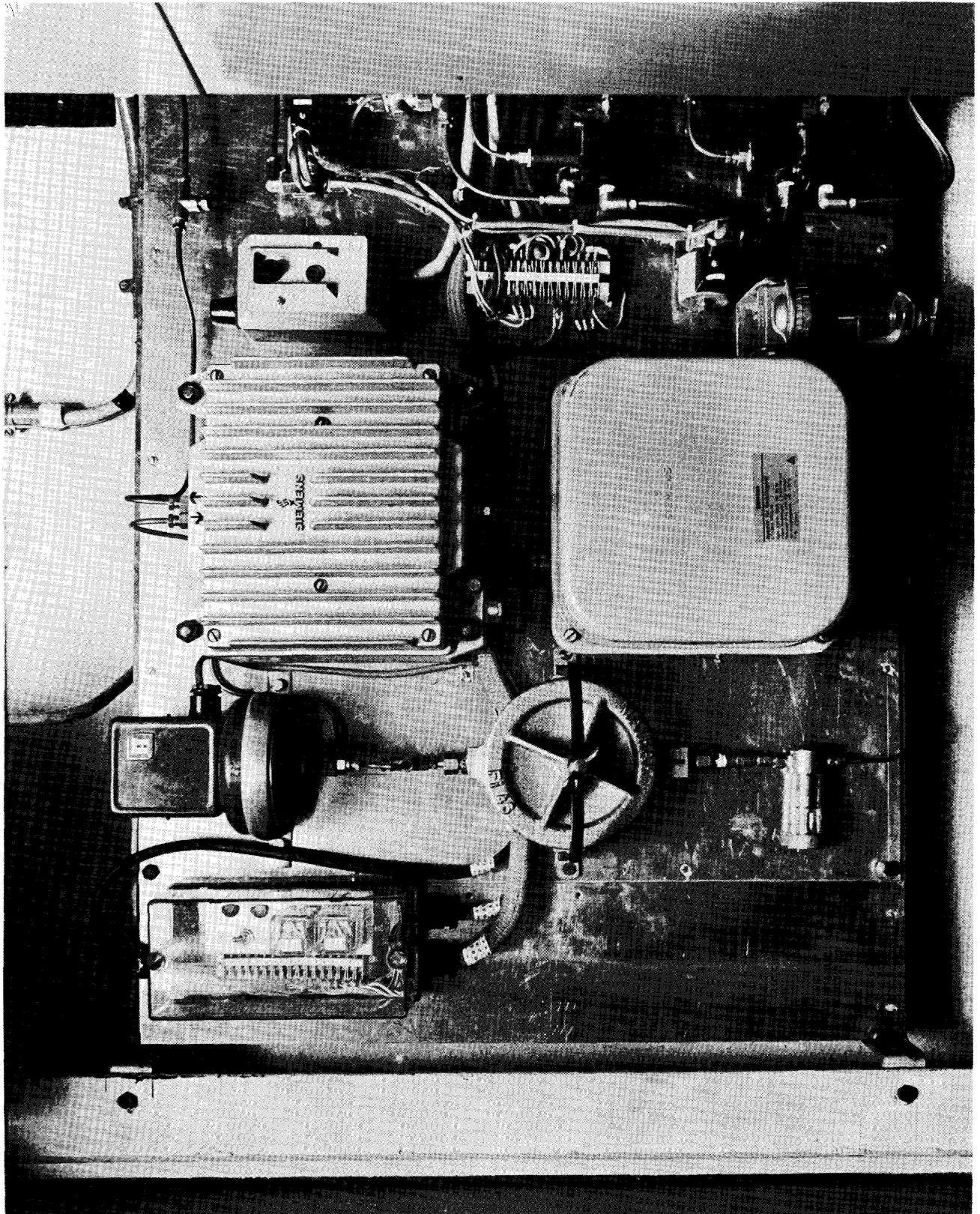


Fig. 12 - Panneau de traitement des gaz.

4. L'armoire thermostatisée et les analyseurs.

La figure 13 montre une vue partielle de l'ensemble, à savoir l'analyseur SERVOMEX muni de ses électrovannes et les trois rotamètres nécessaires au réglage de celui-ci.

5. La baie de tarage automatique (fig. 14).

La photo montre de haut en bas :

a) Le module "séquence" (fig. 15) :

Celui-ci offre plusieurs possibilités :

1°) Déroulement automatique de la séquence d'étalonnage.

Le bouton-poussoir "Télé" initie la séquence suivante :

- Passage de gaz "bas" (3 % CO₂, 0,5 % CO, 3 % O₂) : 1 min.
- Tarage des tiroirs de correction sur ce gaz : 15 sec.
- Enregistrement automatique de la nouvelle valeur au data-logger : 30 sec.
- Emission d'une alarme dans le cas d'un tarage défectueux sur l'un des tiroirs (bonbonne vide ou potentiomètre à butée) : 10 sec.
- Passage du gaz "haut" (17 % CO₂, 7 % CO, 17 % O₂) et mêmes opérations que pour le gaz "bas".
- Durée totale du cycle : 3 min 40 sec.

2°) Déroulement pas à pas de la séquence.

Dans ce cas, chacune des étapes mentionnées ci-dessus est commandée manuellement par action sur le bouton-poussoir "MAN".

3°) Commande manuelle des électrovannes.

On peut injecter un gaz étalon dans les analyseurs sans passer par l'intermédiaire de la séquence (interrupteur "GB - GH").

De nombreux voyants lumineux permettent de se rendre compte immédiatement de l'état d'avancement de la séquence ou de l'apparition d'une anomalie éventuelle.

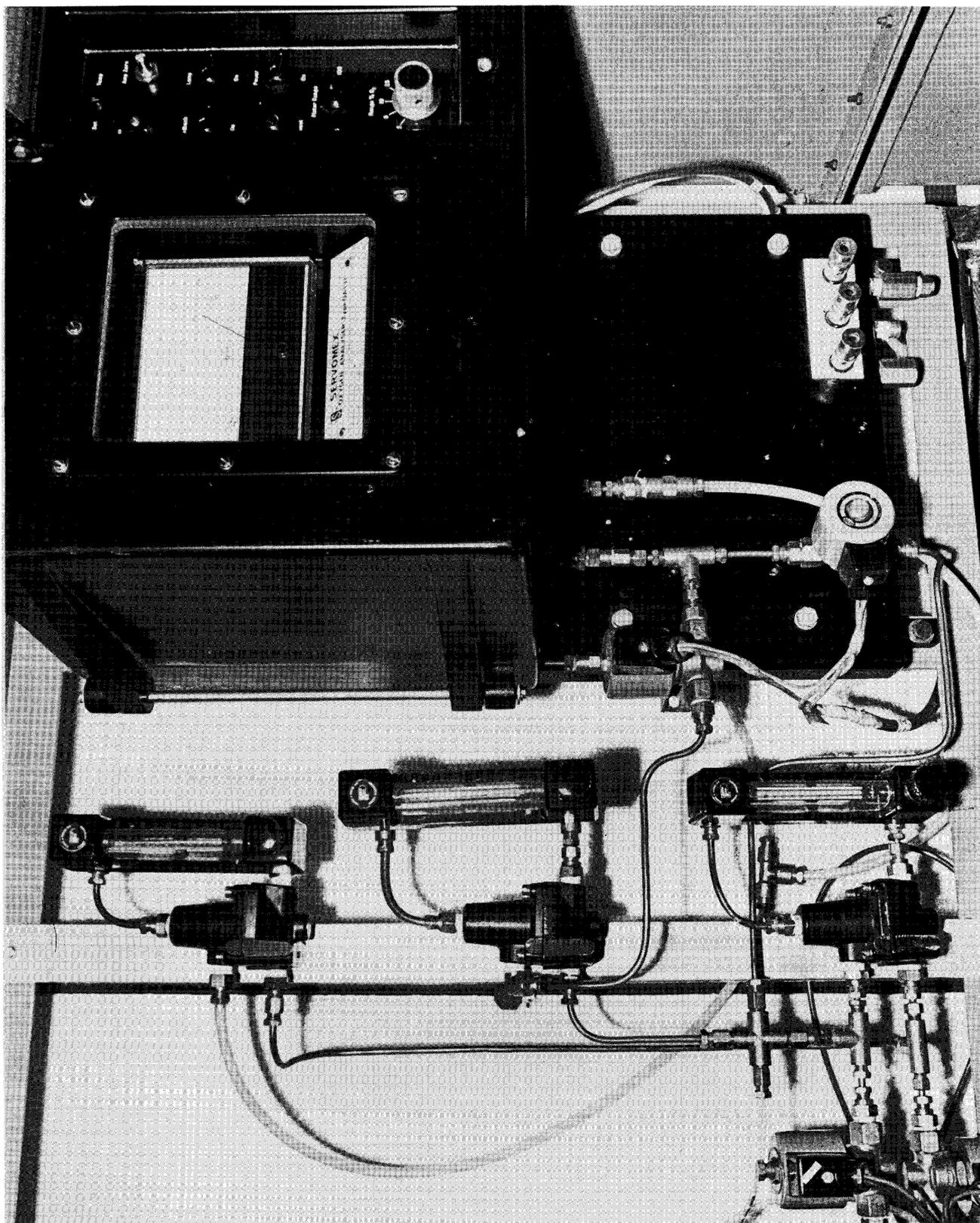


Fig. 13 - Analyseur Servomex.

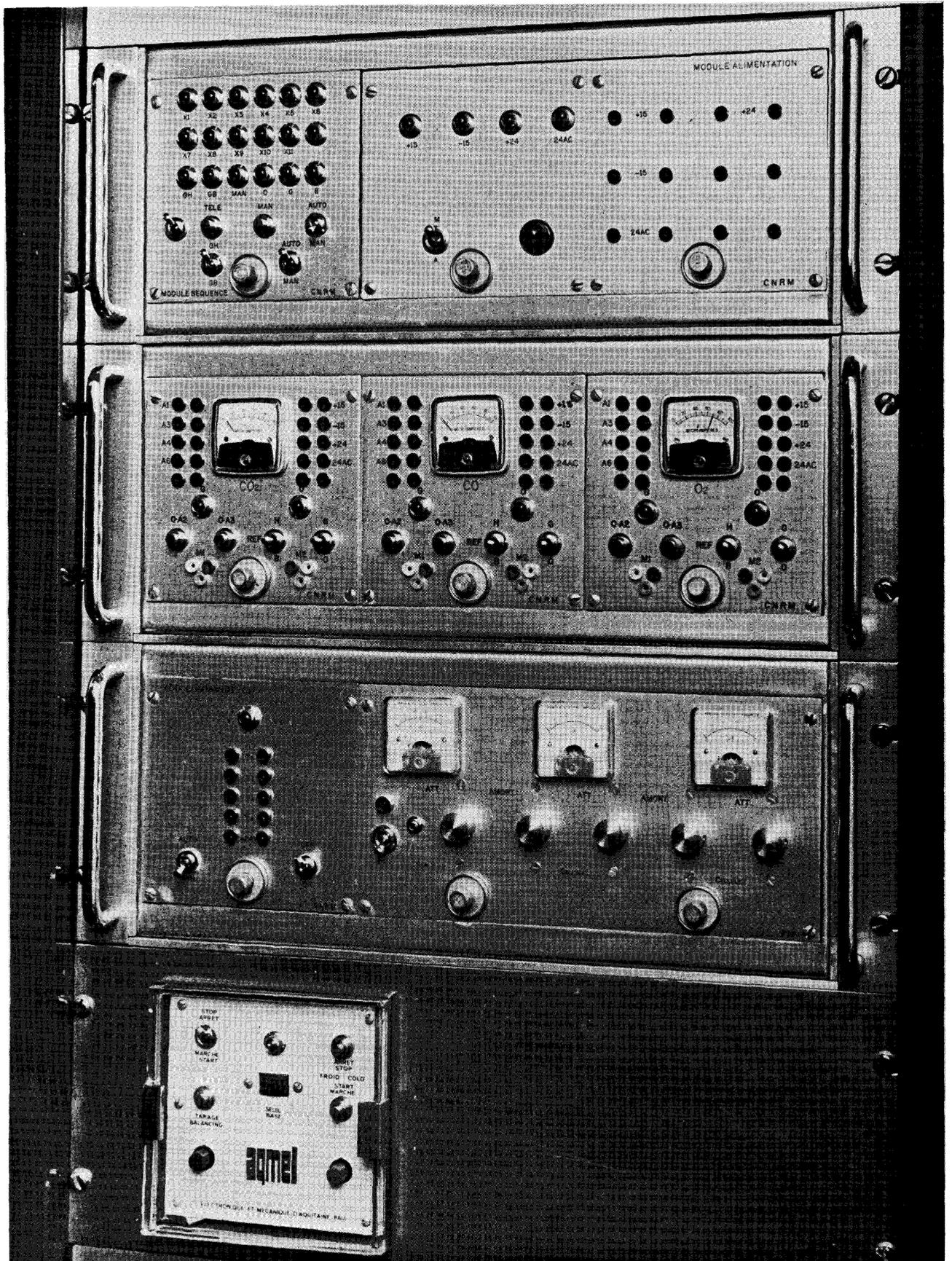


Fig. 14 - Baie d'analyse gaz.

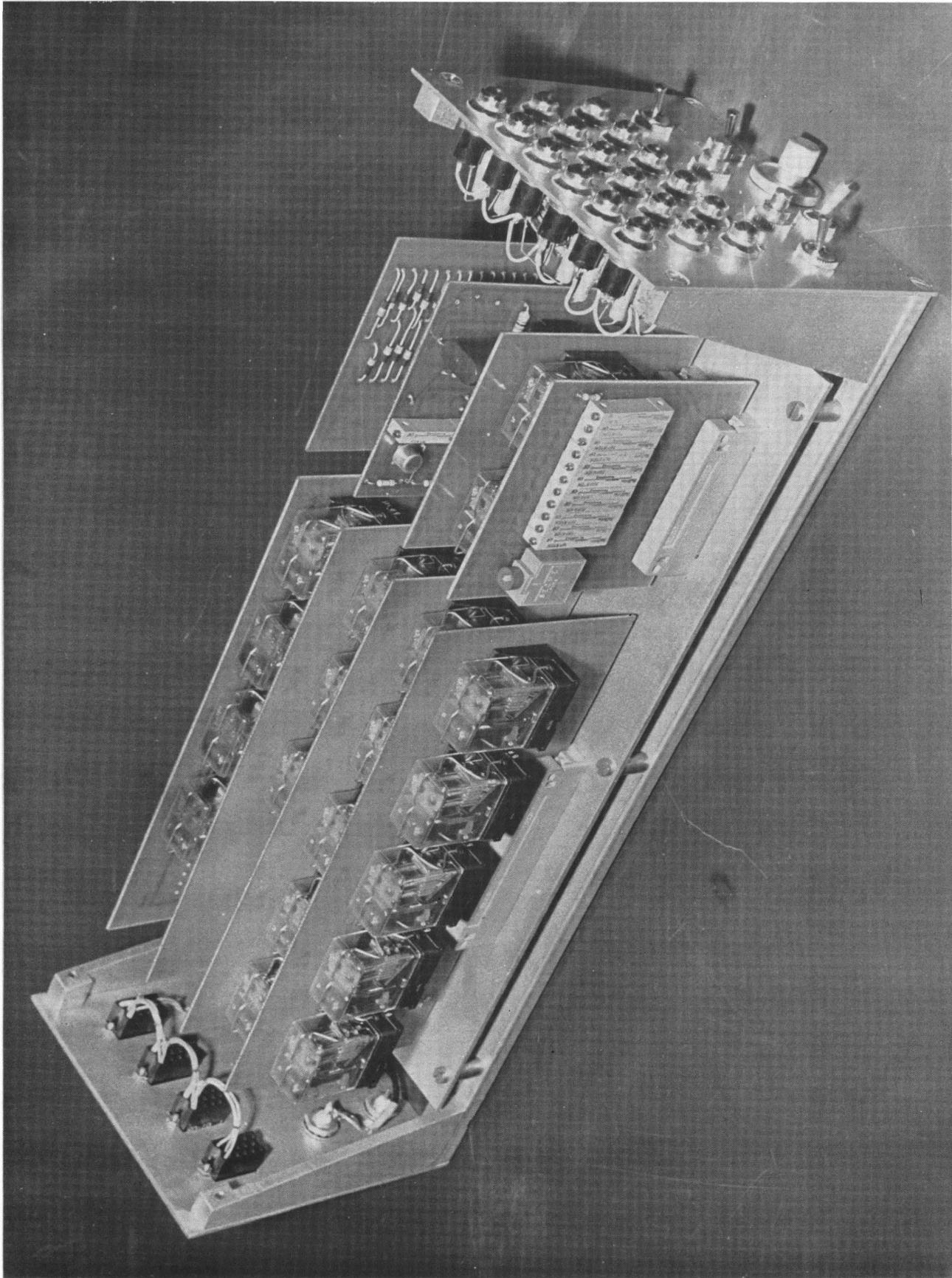


Fig. 15 – Module des Séquences.

b) Le module alimentation.

Les alimentations + 15,0 - 15 et + 24 VDC ainsi que 24 VAC sont concentrées en un seul module et desservent tous les autres.

c) Les tiroirs de correction (fig. 16).

Chaque analyseur possède son propre tiroir. Celui-ci est muni d'un indicateur galvanométrique, de lampes et de nombreuses bornes de test permettant des mesures aisées et rapides en tous les points principaux du circuit. Signalons que le tarage d'un seul tiroir peut être commandé indépendamment des autres par l'interrupteur "O-G". Les références pour le tarage sont directement accessibles sur les bornes de sortie à l'aide de l'interrupteur "B-H". Les performances de ces tiroirs seront discutées ultérieurement (voir IV.C.4).

d) Le module de commande de l'analyseur O2.

Comme nous le verrons plus loin, un système "impulsionnel" commande le passage du gaz dans le Servomex afin d'en réduire le temps de réponse.

Les électrovannes EV6 et EV7 (fig. 2) permettent le choix entre les deux modes de fonctionnement (normal ou impulsionnel) et sont commandées par les deux interrupteurs visibles sur la photo. Une lampe témoin indique le passage du gaz dans la cellule de mesure.

e) Le module son-cellules (fig.17).

Pour des raisons d'encombrement, les cartes son et cellules ont été montées dans un module unique. On reconnaît sur la carte son les cavaliers qui permettent la sélection de la fréquence (F) et de l'amortissement (A) désirés. Pour les cellules, la sélection se fait par les commutateurs de la face avant. Des galvanomètres permettent de s'assurer du bon réglage du module.

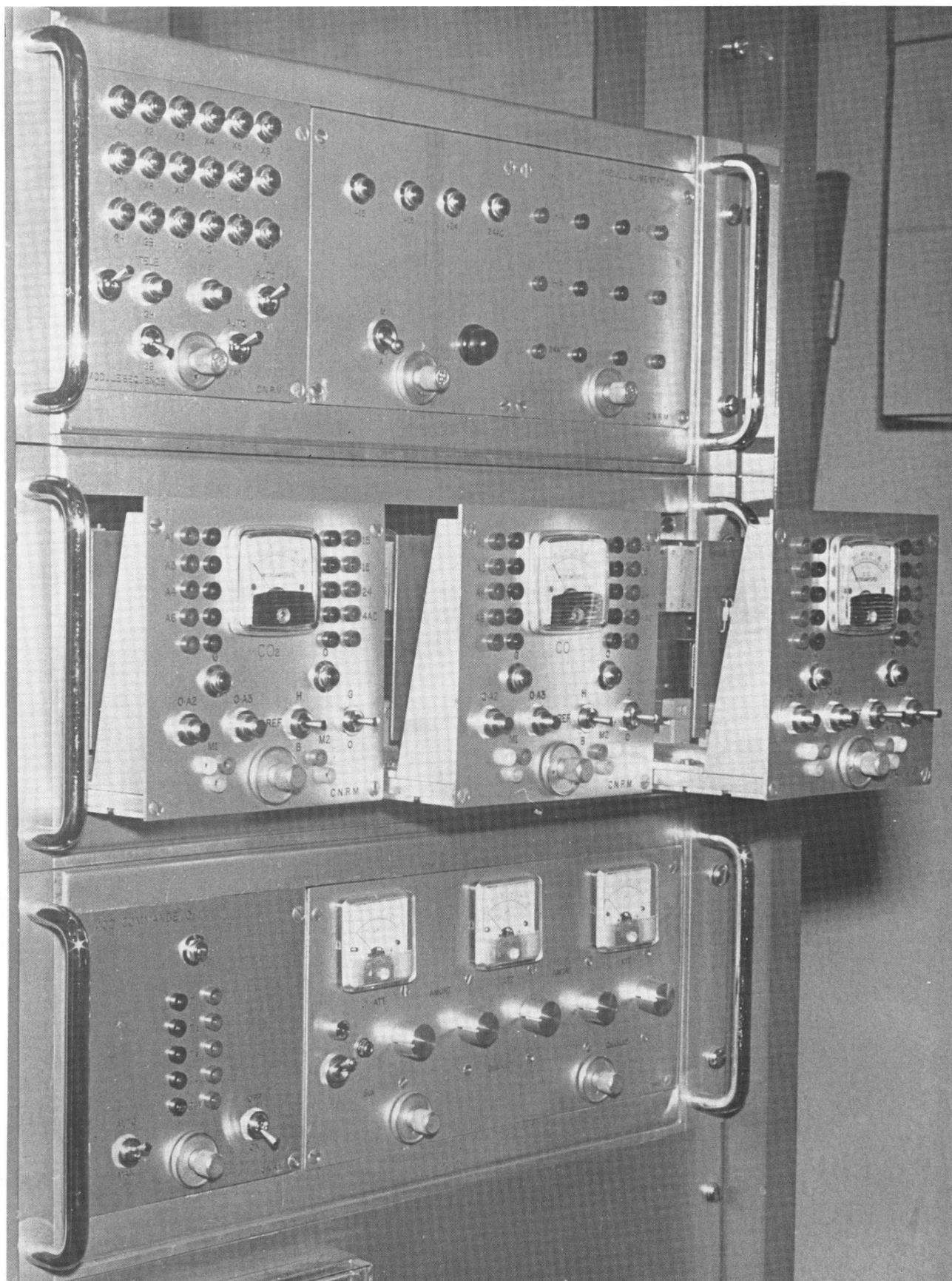


Fig. 16a - ĩiroir de correction

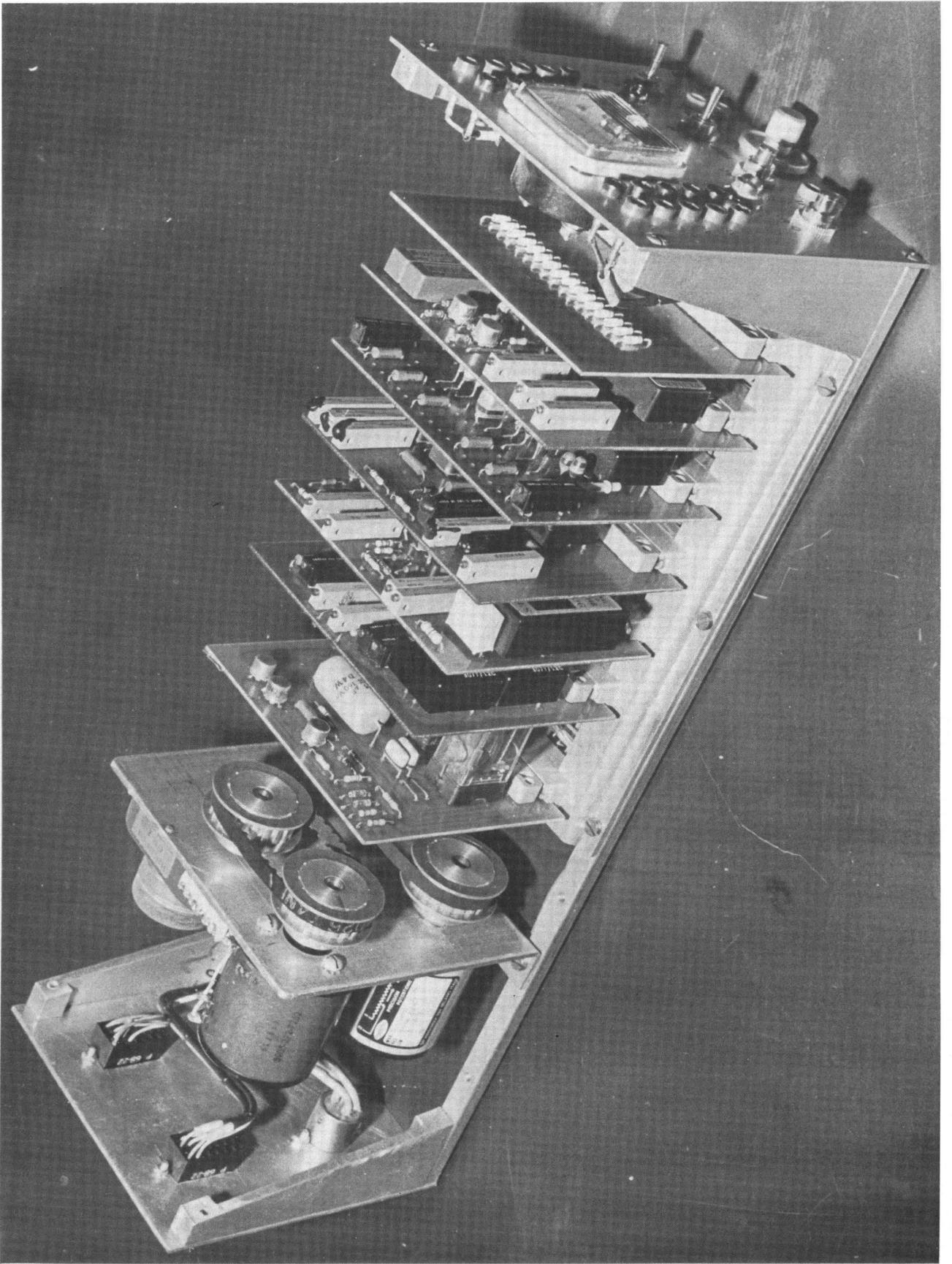


Fig. 16b - Tiroir de correction.

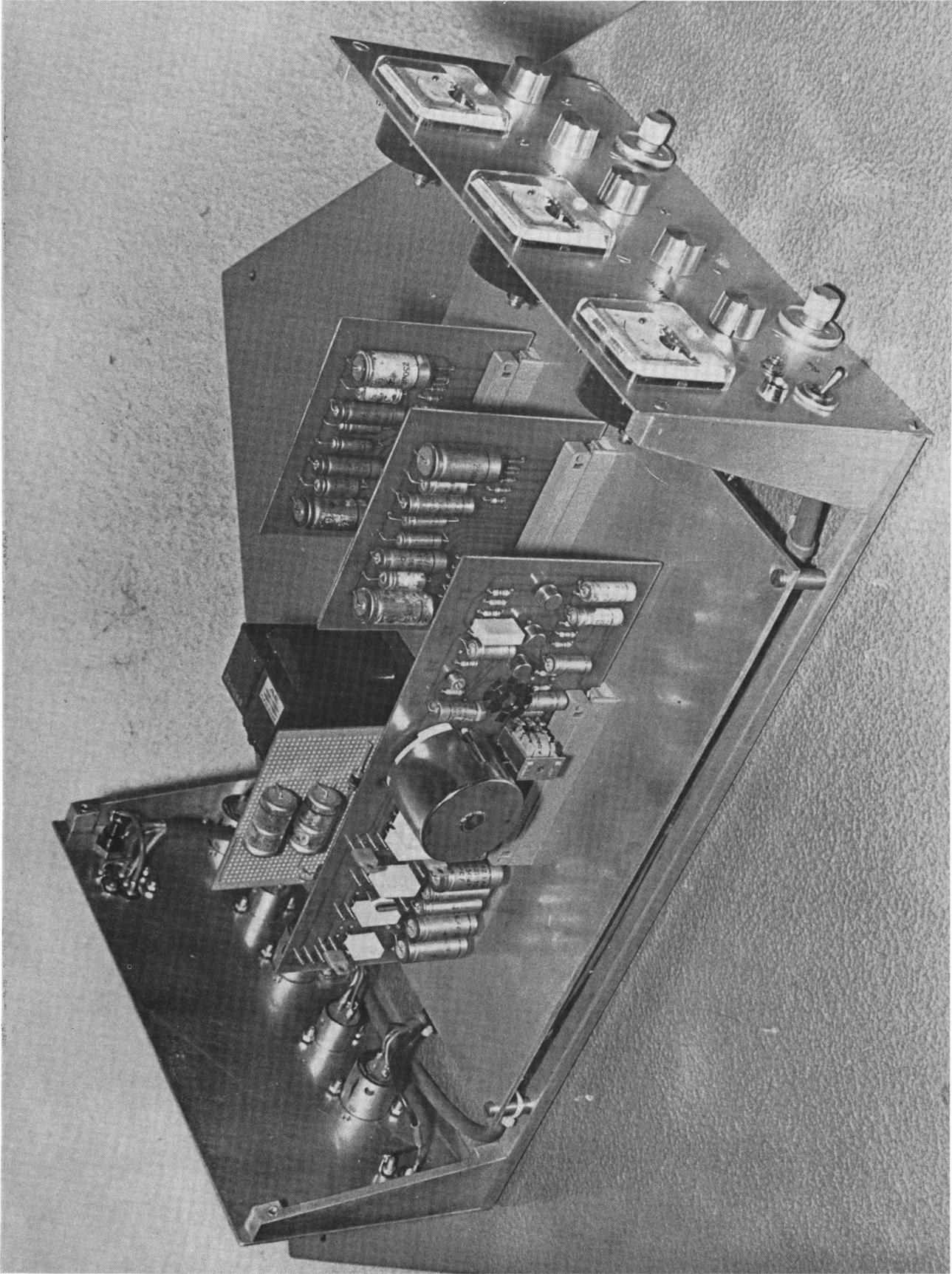


Fig. 17 – Module Son – Cellules.

f) L'hygromètre à point de rosée.

Le module électronique assure l'alimentation du pont de mesure et de la lampe, la régulation de l'épaisseur du condensat et le tarage automatique du pont de mesure à intervalles fixés par une minuterie électronique. La liaison entre ce module et le boîtier de mesure situé au niveau 44 m est réalisée, via la dispersion par deux câbles blindés comportant chacun 18 paires de conducteurs torsadés.

6. Surveillance automatique de l'installation.

De nombreux voyants lumineux renseignent à tout instant sur l'état de chaque module. Il était nécessaire cependant d'être averti sans retard de l'apparition d'un défaut sur les circuits de mesure importants que sont l'humidité des fumées et l'analyse gaz. A cet effet, un module spécial a été construit sur les principes suivants (fig. 18) :

- 16 points sélectionnés sur les deux circuits peuvent faire l'objet d'une surveillance (avec extension possible à 24). Parmi ces signaux, 8 doivent être digitaux et les 8 autres peuvent être, soit digitaux, soit analogiques.
- 16 voyants lumineux sont prévus à cet effet : ils sont verts quand tout est normal. L'apparition d'un défaut sur un canal provoque le clignotement de la lampe correspondante qui devient rouge et le fonctionnement d'un avertisseur sonore.
- Un bouton-poussoir permet l'acquiescement de l'alarme : la lampe reste rouge et le klaxon s'arrête.
- Un interrupteur permet de vérifier périodiquement que toutes les ampoules sont bonnes.

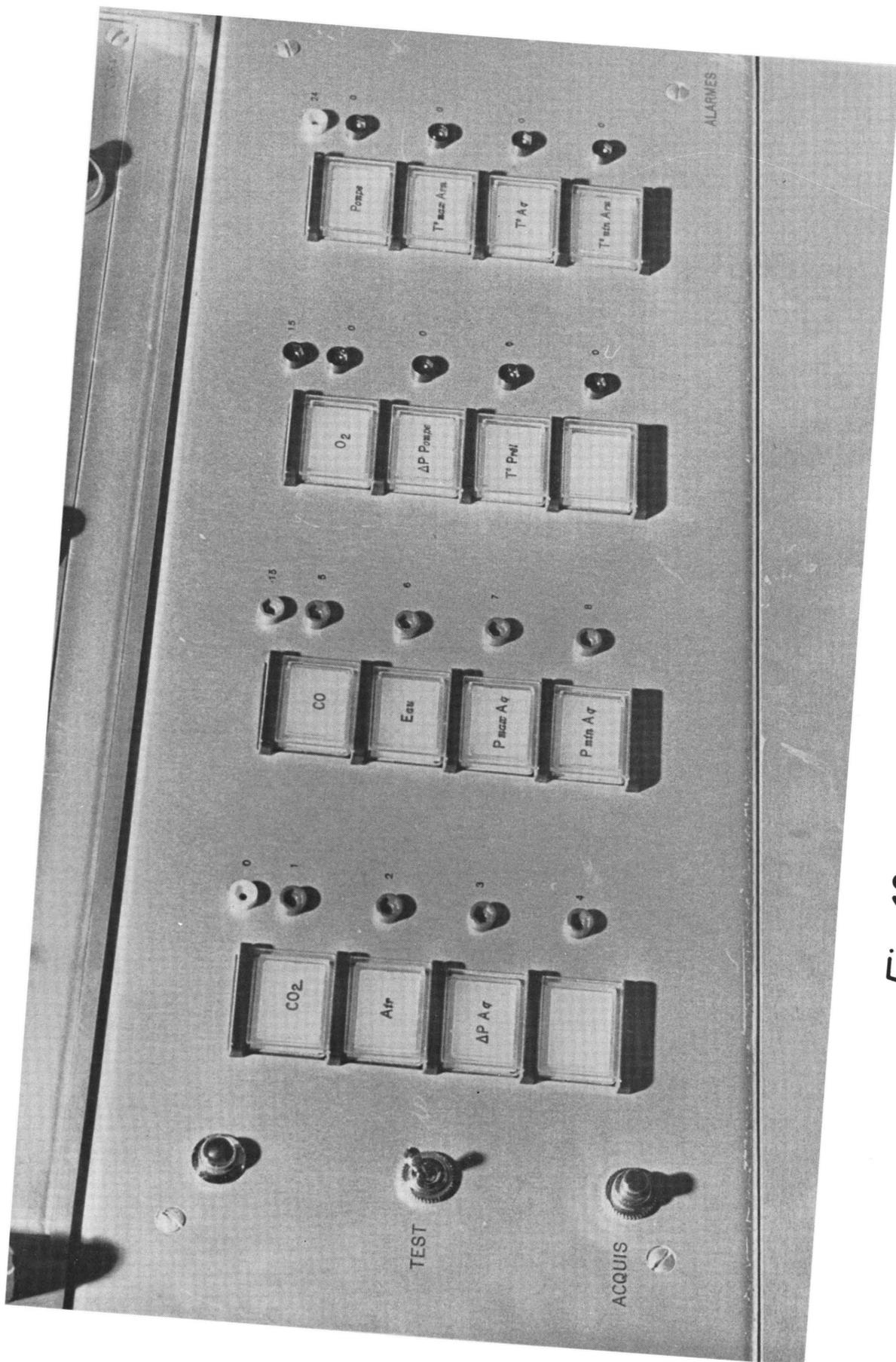


Fig. 18 - Module Alarmes.

Font l'objet d'une surveillance :

- Pour le circuit d'analyse gaz (fig. 2).

- la présence d'eau de refroidissement sur la sonde (contact manométrique) ;
- la présence d'air comprimé sur l'éjecteur (contact manométrique) ;
- l'existence d'une dépression suffisante à l'éjecteur (contact manométrique) ;
- l'existence d'une pression suffisante à la sortie de la pompe (contact manométrique) ;
- la température de l'armoire thermostatisée (Aguastat) ;
- le tarage correct sur les trois tiroirs de correction.

- Pour le circuit de mesure de l'humidité des fumées.

- la température minimum de la conduite de prélèvement ;
- la température minimum de l'enceinte de mesure ;
- la pression dans la cellule de mesure (maximum et minimum) (capteur de pression absolue) ;
- la pression différentielle aux bornes de l'Aqmel (contact manométrique) ;
- la présence d'air comprimé pour le débouchage automatique (contact manométrique).

Un détecteur de CO est également installé dans la cabine.

7. Les instruments d'enregistrement des mesures.

Il importe d'enregistrer un grand nombre de signaux avec une précision et une simultanéité aussi parfaites que possible. En dehors de l'enregistreur multipoint déjà cité (simple rôle de surveillance), trois types d'instruments sont couramment utilisés.

a) Enregistrement galvanométrique. (Honeywell VISICORDER 1508).

Muni d'un tiroir d'adaptateurs C.N.R.M., l'enregistreur permet l'enregistrement simultané et continu de 12 signaux. Les adaptateurs sont conçus de manière à pouvoir enregistrer des signaux dans une large gamme d'amplitudes (5 mV à 100 Vfs) et de fréquences (0 à 1000 Hz). La précision de cet appareil est limitée par l'amplitude de la déviation galvanométrique correspondant au fond d'échelle (en général 5 cm). Elle peut être estimée à $\pm 1\%$ du fond d'échelle.

Cet ensemble portatif est d'une grande utilité pour la visualisation directe et le repérage a posteriori des phénomènes à analyser.

b) Enregistrement magnétique. (PHILIPS ANALOG 7)

Deux enregistreurs magnétiques comportant chacun 7 canaux (entrée maximum 5 V) servent au dépouillement des mesures à l'aide du calculateur analogique du C.N.R.M. Deux de ces 14 canaux servent à la synchronisation des deux enregistreurs par injection d'un signal de référence commun (voir III.B.2). Les erreurs qui pourraient être causées par un démarrage non simultané ou par des vitesses de défilement différentes éventuelles des deux enregistreurs sont ainsi évitées.

Ce type d'enregistrement présente les avantages suivants :

- bonne précision (1 % de fond d'échelle) ;
- sortie analogique ;
- possibilité d'étudier chaque signal simultanément ;
- obtention rapide des courbes sur table traçante ;
- possibilité d'enregistrer sur vitesse lente et de reproduire sur vitesse rapide (gain de temps) ou vice-versa (gain de résolution) ;
- possibilité de recycler à volonté une partie de l'enregistrement sur une boucle sans fin (analyse du spectre de fréquence pour une partie de coulée, détermination des gains et des fonctions de transfert, par exemple).

c) Enregistrement sur bandes perforées (HEWLETT PACKARD 2010 D).

Les deux types d'enregistrements précédents sont limités quant au nombre de signaux (pratiquement 12 chacun) et à la précision. Ces appareils nécessitant en outre un entretien fréquent, ils ne sont transportés dans la cabine qu'au moment des mesures, lorsque cela s'avère nécessaire.

Pour ces raisons, un data-logger est raccordé en permanence sur la totalité des signaux. Dans sa configuration actuelle, 200 canaux de mesure existent avec extension possible à 600. Il se compose de haut en bas (fig. 19) :

1°) d'un voltmètre digital du type intégrateur.

Le temps d'intégration est réglable à 1, 0,1 et 0,01 sec. La résolution de ce voltmètre est de 1, 10 ou 100 μ V pour chacun de ces temps respectivement.

Un compromis entre vitesse de scrutation et précision nous a amenés à choisir un temps de comptage égal à 0,1 sec. Pour celui-ci, le nombre maximum de signaux enregistrés est de 6 par seconde.

2°) d'un sélecteur de commande du scanner.

Trois tubes "Nixies" indiquent à tout instant le numéro du canal sur lequel on se trouve. Les limites inférieure et supérieure entre lesquelles le scanning doit s'effectuer sont affichées à gauche et à droite de ces tubes. Un système de touches permet de commander le scanning :

- commande manuelle : - en continu sur un seul canal ou sur les canaux compris entre les limites citées ;
- en discontinu : une scrutation complète est effectuée à chaque commande.
- commande automatique : par un contact extérieur venant d'une minuterie ou du processus.

3°) d'un tiroir de perforation du numéro d'essai (fig. 20).

Ce tiroir, construit au C.N.R.M., remplit les fonctions suivantes :

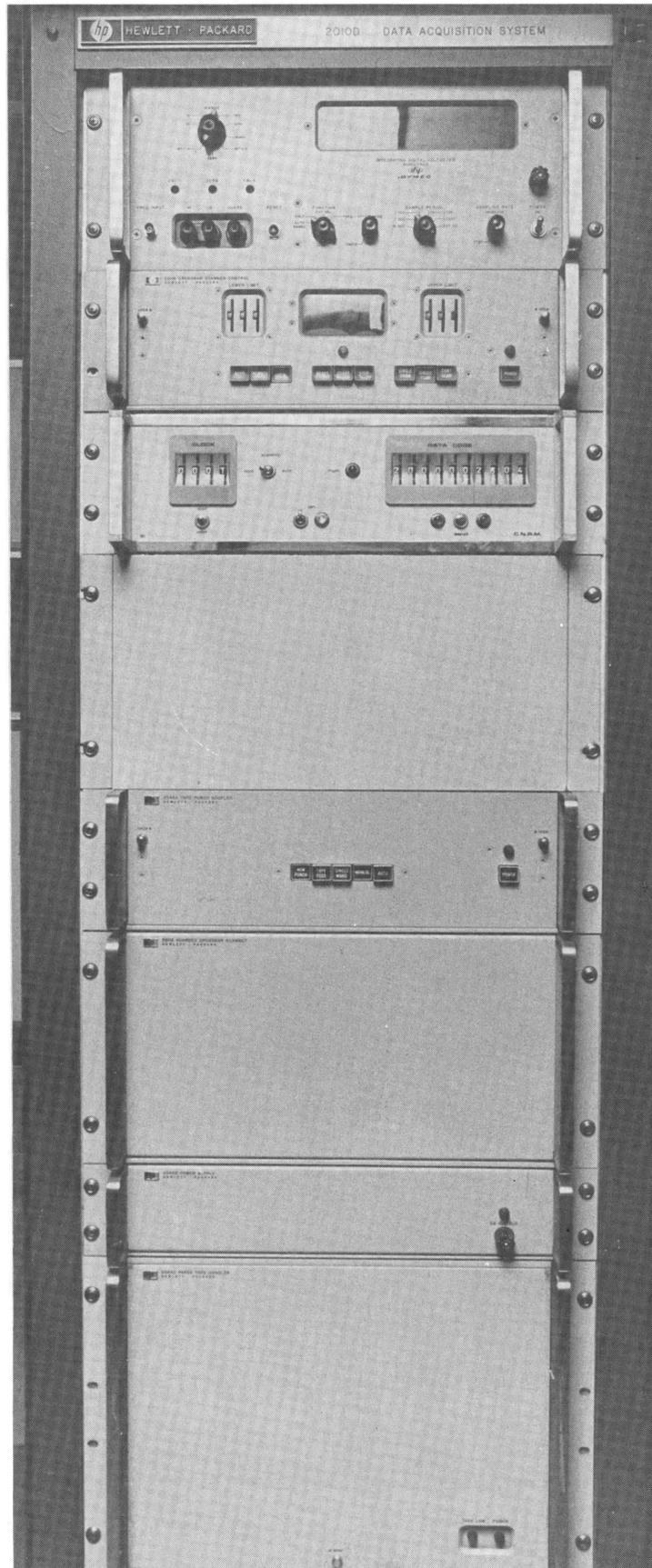


Fig. 19 - Data Logger - Vue d'ensemble.

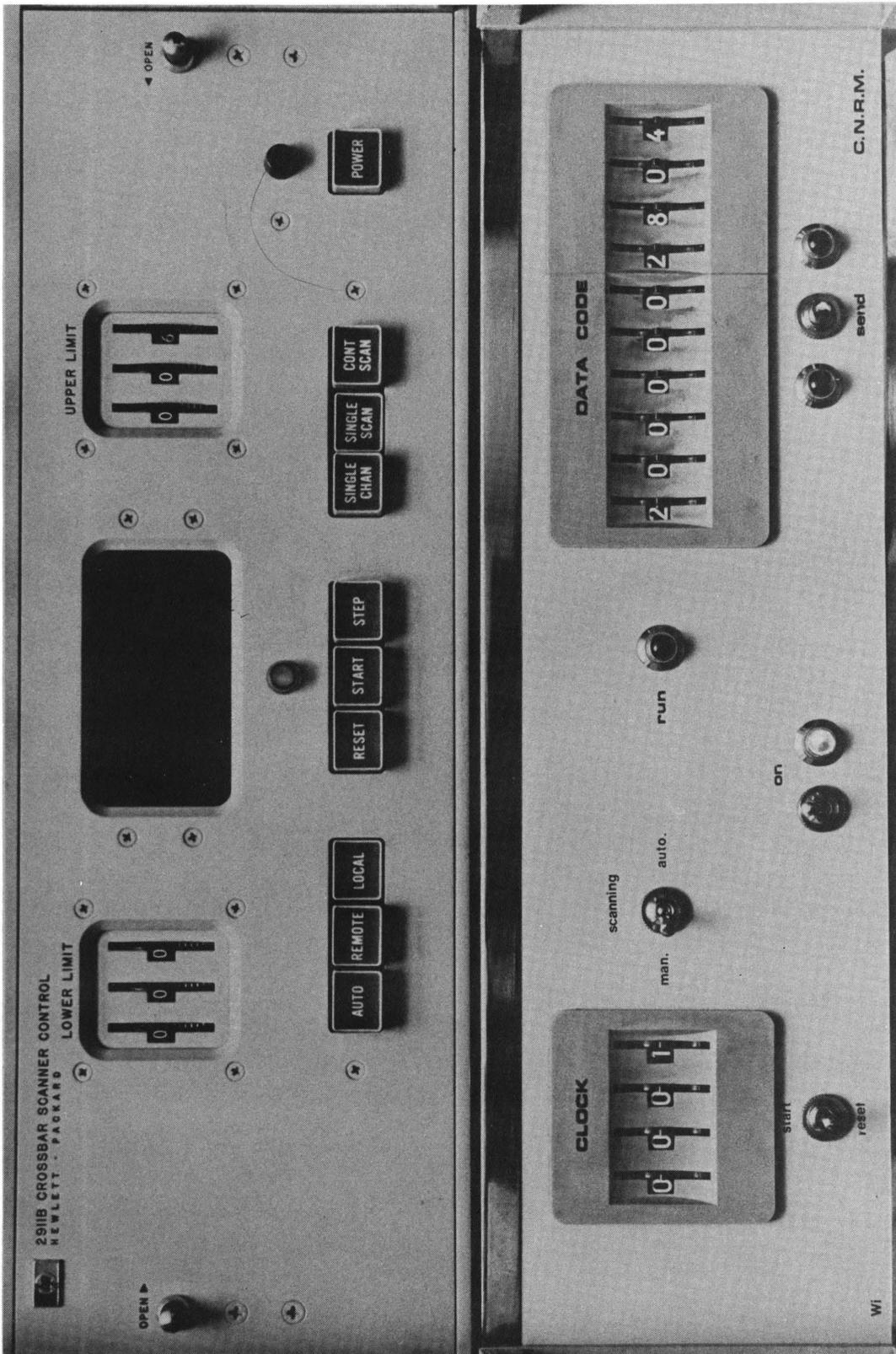


Fig. 20 - Data Logger - Tiroir de perforation du numero d'essai.

- inscription au début de bande d'un code comportant 10 chiffres (classification aisée des essais) ;
- commande périodique du scanning : la perforation d'une scrutation complète peut se répéter à un rythme variant entre 1 et 9999 secondes. Cette commande est initiée par un contact qui se ferme dès le début du soufflage d'oxygène et assurée par une minuterie électronique de précision. Un relais temporisé (40 sec) assure l'enregistrement des derniers instants de la coulée (notamment pour les signaux à temps morts importants, tels que ceux relatifs au venturi).

4°) de la commande de la perforatrice ;

5°) du scanner ;

6°) d'une alimentation stabilisée ;

7°) de la perforatrice.

Celle-ci perfore, selon le code 1 - 2 - 4 - 8, une bande qui est alors traitée sur l'ordinateur du C.N.R.M. Sa vitesse maximum de perforation est de 110 caractères/sec.

C. L'armoire de mesure de l'humidité des fumées.

Une armoire a été installée spécialement au niveau 44m, pour la mesure de l'humidité des fumées, dans le but de réduire au minimum la longueur de la conduite entre la cheminée et l'hygromètre. Elle regroupe les éléments du circuit déjà mentionnés et différents coffrets :

- amplification du signal de pression absolue ;
- alimentation du transmetteur mV/mA ;
- transmetteur mV/mA pour la mesure de T° rosée ;
- surveillance de températures (Aguastats) ;
- chauffage de la conduite.

IV. PERFORMANCES PRATIQUES DE L'APPAREILLAGE.

Les capteurs de mesure installés par ESPERANCE-LONGDOZ sont étalonnés périodiquement par le Service Thermique de l'usine. Deux d'entre eux ont cependant retenu notre attention du point de vue précision ou reproductibilité, à savoir le débit de fumées et la hauteur de lance.

A. Etalonnage du débit de fumées.

La perte de charge H provoquée par un venturi est représentative du débit le traversant :

$$Q_f(t) = K \sqrt{H(t)} \sqrt{\frac{T(t)}{P(t)} \frac{1}{\delta(t)}}$$

où Q_f et δ sont respectivement le débit réel des fumées et la densité de celles-ci. Le problème posé est de déterminer la constante K avec une précision suffisante ($\pm 1\%$). Dans cette formule, $H(t)$, $T(t)$ et $P(t)$ sont directement mesurés. Quant à $\delta(t)$, elle est fonction de la composition des fumées. On peut donc écrire :

$$\delta(t) = f(t, T_{\text{rosée}}, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2).$$

Pour de multiples raisons (présence d'un taux inconnu de poussières dans les fumées, importance du débit à mesurer et surtout composante pulsatoire de celui-ci introduite par le ventilateur), il n'est pas possible de déterminer la valeur de K à moins de 5 % près par les méthodes théoriques. De ce fait, des mesures précises et simultanées de toutes les grandeurs de la formule sont nécessaires. Celles du second membre sont obtenues à partir de capteurs déjà cités. Seule la mesure précise de Q_f est difficile. Trois méthodes sont possibles :

1. Etalonnage par traceur chimique.

On peut envisager l'injection d'un débit connu de gaz étranger en un point donné du circuit des fumées (avant le ventilateur, par exemple). La mesure de la concentration de ce gaz au venturi permet de déterminer la valeur de Q_f .

A cette méthode qui nécessite un grand débit de traceur pour la mesure de débits de fumées importants ($> 400.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$), nous avons préféré l'étalonnage par traceur radioactif.

2. Etalonnage par traceur radioactif.

Le principe en est le même, mais le gaz injecté est du Krypton 85. Vu la grande sensibilité des récepteurs utilisés, la charge radioactive est faible et n'exige que des précautions raisonnables.

Un ensemble de mesure nous a été livré : il comprend deux tubes Geiger très sensibles (100 coups pour $0,5 \cdot 10^{-6} \mu\text{c}$), leur alimentation H.T., un compteur d'impulsions (possibilité de temps de comptage de $0,1$ sec à l'infini) et un indicateur numérique. Cet ensemble est actuellement testé en laboratoire et étalonné. Parallèlement, des caissons d'injection et de prélèvement du traceur ont été construits.

3. Etalonnage par injection d'oxygène.

Dans le cas d'une aciérie, on peut insuffler facilement un important débit d'oxygène pur dans le creuset vide. La concentration C d'oxygène dans les fumées donne une mesure du débit de celles-ci :

$$Q_f = \frac{Q_{O_2}}{C - 0,21} (1 - C)$$

Des essais de ce type ont été réalisés à l'occasion de la détermination du temps de réponse de la mesure de la composition des fumées. Des débits constants de 127 et 220 Nm³/min ont été injectés pendant quelques minutes. Après tarage des analyseurs, une mesure précise (2 volts par % en dessous de 21 % d'oxygène) de la concentration d'oxygène dans les fumées a donné les résultats suivants (au régime maximum du ventilateur) :

QO ₂ (Nm ³ /min)	C - 0,21	Qf (m ³ /h)
127	1,525	387.000
220	2,55	395.000

Un calcul d'erreur sur la formule précédente montre que la précision maximum ne peut dépasser 2,5 % pour un débit de 200 m³/min et l'erreur de égale à 0,05 % (limite inférieure de l'ensemble analyseur + tiroir de correction).

Pour obtenir une meilleure précision, un soufflage à 400 m³/min serait souhaitable et pourrait être réalisé.

B. Etalonnage de la hauteur de lance.

Sans préjuger de la précision de la mesure de la hauteur de lance par rapport au bain, il était intéressant de déterminer la reproductibilité de la mesure potentiométrique dans la zone de travail. Pour ce faire, nous avons procédé de la façon suivante :

- cinq repères ont été collés sur la lance à intervalles fixes de 50 cm.
- La valeur absolue de la hauteur de lance a été supposée égale à celle indiquée par le selsyn de l'opérateur pour le premier repère.
- La lance a suivi le programme imposé à la figure 21a.

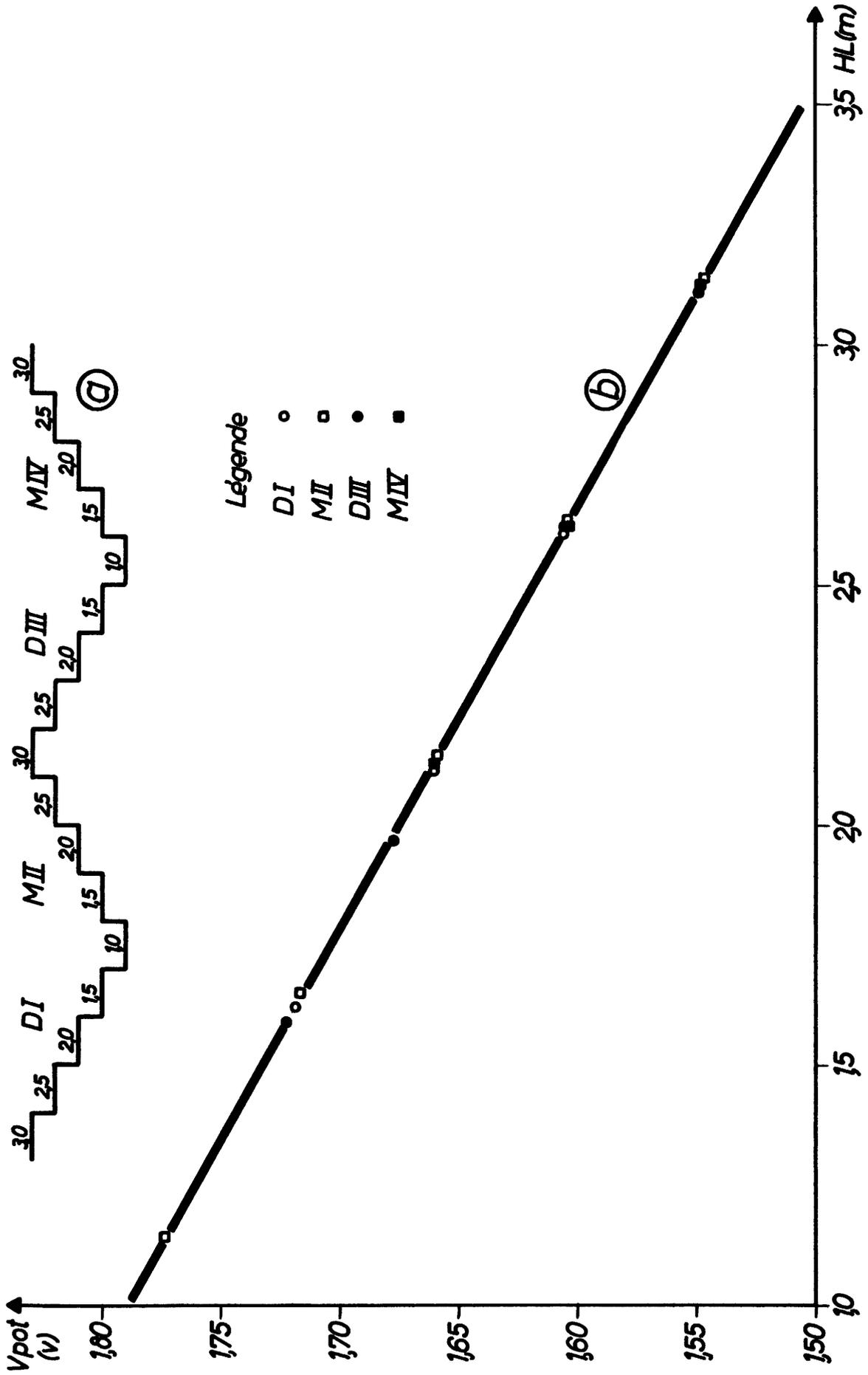


Fig.21_ Etalonnage hauteur de lance.

- A chaque palier, une mesure millimétrique (précision estimée à ± 2 mm) était effectuée entre le repère correspondant et un repère fixe sur le plancher 22 m.
- Simultanément, la valeur indiquée par le potentiomètre était enregistrée sur le data-logger.

Les résultats de cet essai (fig. 21 b) nous permettent d'affirmer que la reproductibilité globale de la mesure potentiométrique vaut $\pm 0,5$ cm. Quant à l'erreur de linéarité, elle ne dépasse pas 1 cm dans cette zone, ce qui est excellent pour le type de potentiomètre utilisé. On envisage, pour améliorer la mesure, le remplacement du potentiomètre par un autre, de caractéristiques plus poussées et l'emploi de roues dentées et de courroies crantées pour la transmission treuil-potentiomètre.

C. Performances de l'installation d'analyse gaz.

Cette installation a fait l'objet de soins tout particuliers dans sa conception et dans sa construction. Nous passerons successivement en revue les performances du circuit de prélèvement, des analyseurs et les améliorations qui leur ont été apportées.

1. Temps mort du circuit de prélèvement.

Il était intéressant de vérifier expérimentalement les temps de parcours du gaz dans les différents tronçons du circuit de prélèvement, afin de pouvoir remédier efficacement à un temps de réponse trop long éventuel.

Dans une première étape, le gaz d'une bonbonne contenant 70 % CO a été injecté dans la sonde de prélèvement, à l'aide d'un tuyau flexible. Le débit délivré par le détendeur de la bonbonne étant constant, la dilution de ce gaz par l'air aspiré dans l'ambiance conduisait à une concentration constante de 62 % CO dans l'échantillon. (La constance de celle-ci a pu être vérifiée par les indications des analyseurs CO₂ et CO).

Etant donné que le temps de réponse de l'UNOR CO est très faible (voir IV.C.4.e.), d'une part, et que sa gamme de mesure n'excède pas 10 % d'autre part, nous étions assurés d'un flanc de montée (de la réponse de l'UNOR) très raide et pratiquement rectiligne, ce qui facilite le calcul par différence des temps de parcours partiels.

Dans une seconde étape, le même gaz a été injecté à l'entrée du filtre primaire. Dans cette disposition, nous avons alors procédé aux essais suivants :

- injection du gaz (filtre empoussiéré) ;
- nettoyage du filtre primaire ;
- suppression du filtre primaire ;
- suppression du panneau de traitement des gaz.

Chaque essai était répété et enregistré simultanément sur data-logger et sur enregistreur galvanométrique. Etaient enregistrées, les valeurs :

- CO, CO₂, O₂ corrigées ;
- un signal de référence synchronisé avec l'électrovanne de passage des gaz.

Les figures 22 a et b donnent les temps de parcours moyens qui en résultent :

Ceux-ci appellent quelques remarques :

1. La perte de temps due au salissement du filtre primaire peut être très importante (> 1 sec). Un nettoyage automatique par insufflation d'air comprimé après chaque soufflage se révèle dès lors indispensable.
2. Le temps de parcours dans le filtre nettoyé reste malgré tout important : un autre type de filtre pourrait être envisagé.

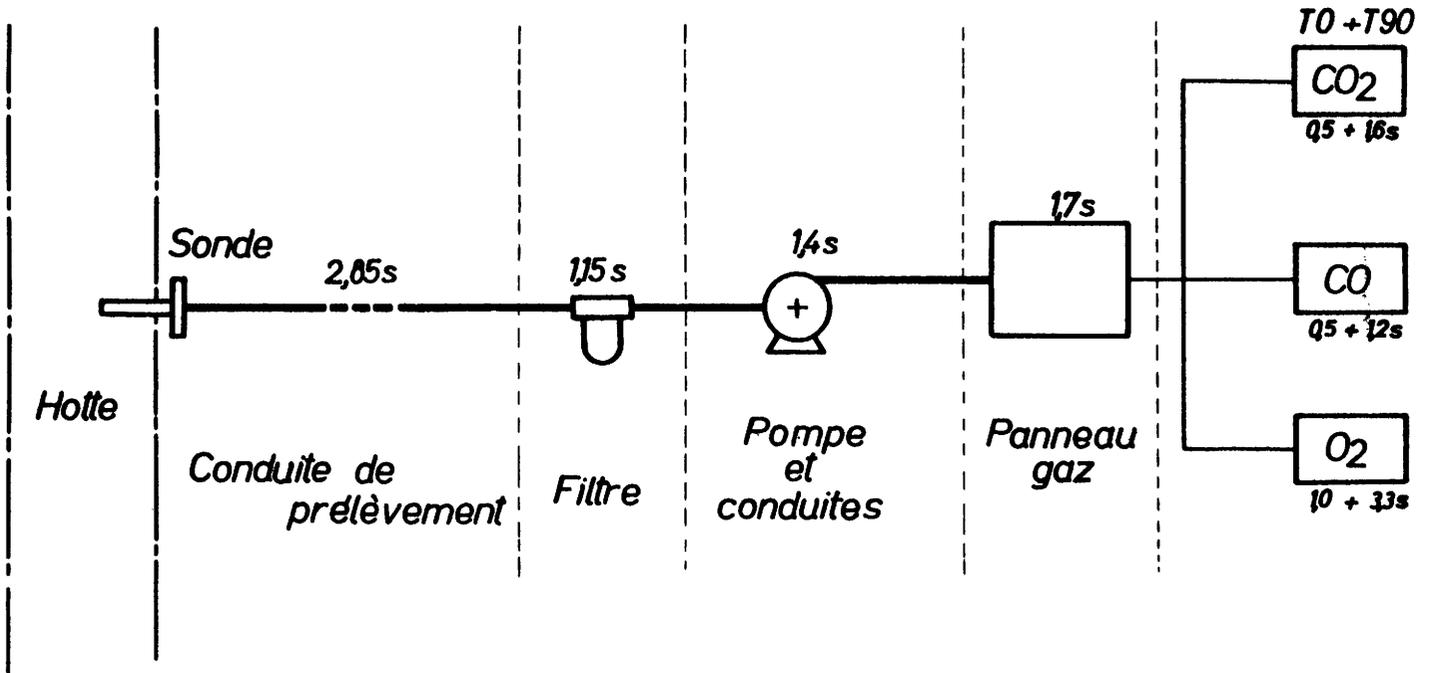


Fig.22a - Temps de parcours du circuit de prélèvement.

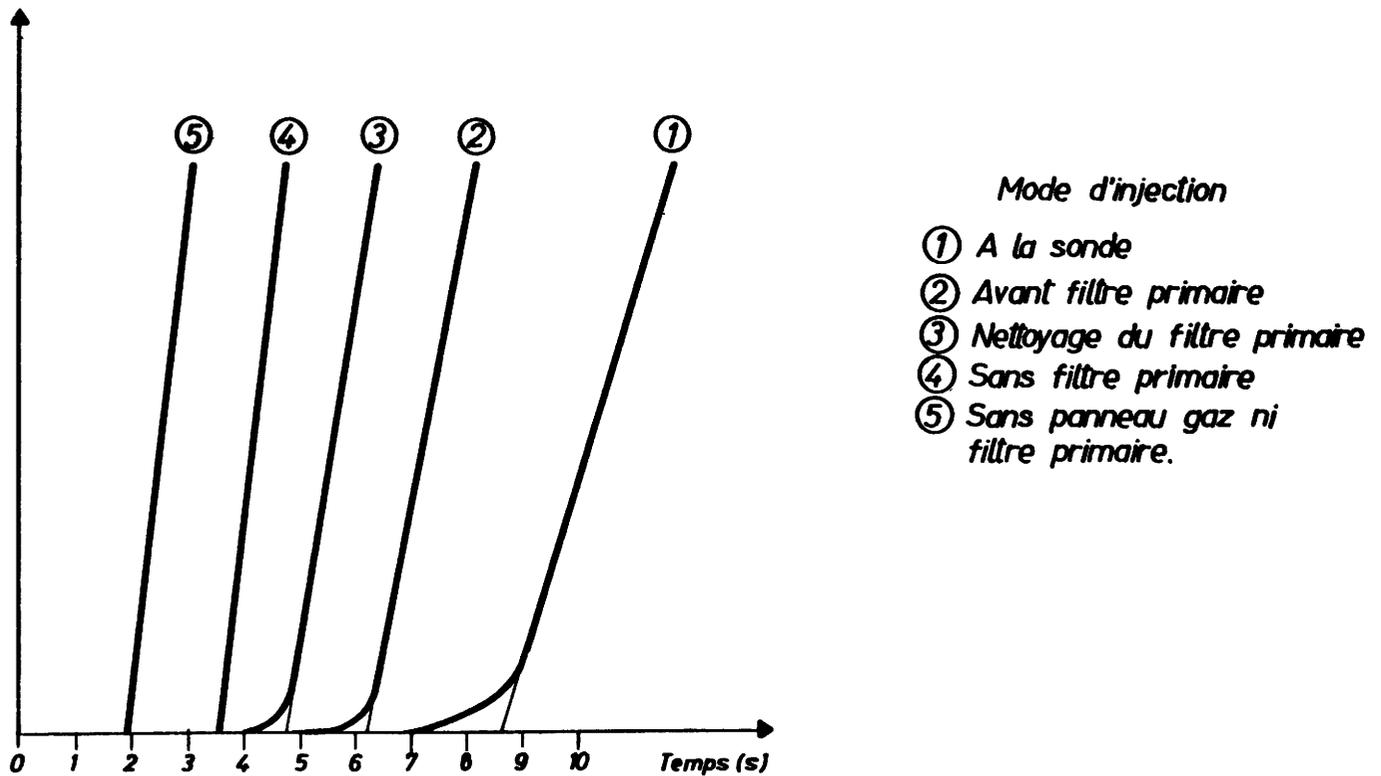


Fig.22b - Reponse du CO en différents points d'injections.

3. Le temps de parcours le plus important existe entre la sonde et la pompe, dans la conduite principale. Nous nous attacherons prochainement à le minimiser.
4. Pour le calcul de ces temps, la courbe de réponse de l'analyseur a été décomposée en deux tronçons par la tangente en son point d'inflexion. Le premier d'entre eux, situé entre le point de départ de la courbe et l'intersection de la tangente avec l'axe des temps, est assimilé à un retard pur, tandis que le second, situé entre le point précédent et l'intersection de la tangente avec le palier de la courbe, est assimilé à une constante de temps pure. Cette manière de procéder, bien qu'arbitraire, présente l'avantage de repères bien précis et tient compte de l'amortissement de la réponse dû au circuit, en l'assimilant à un retard. Une illustration de cet amortissement est apparente sur la figure 22 b ; la pente de la courbe CO devient de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'analyseur.
5. Le temps de parcours global de l'échantillon vaut, dans ces conditions, 7,55 secondes en moyenne, étant entendu que la première valeur du pourcentage de CO différente de zéro, est apparue 1,3 seconde auparavant (courbe 1, figure 22 a). En soustrayant cette valeur de la précédente, on pourrait parler également d'un temps mort de 6,25 secondes, jusqu'à apparition d'un début de déviation des analyseurs.
6. Puisque la présence des conduites et des filtres modifie la réponse globale de l'installation, il serait fallacieux d'additionner les temps de parcours partiels ainsi déterminés au temps de réponse propre aux analyseurs puisqu'on négligerait ainsi l'amortissement de la hotte.

2. Temps de réponse global de la mesure de la composition des fumées.

Des essais ont donc été effectués en injectant, par la lance, un débit-échelon d'oxygène dans le creuset vide. La mesure du temps de réponse se fait sur la courbe (% O₂ - 21 %) = f(t) amplifiée.

L'amortissement supplémentaire dû à la hotte est visible sur la figure 23, où sont superposées la courbe de réponse pour l'essai mentionné et la courbe résultant de l'injection de gaz de bonne dans la sonde (courbes 2 et 1 respectivement). Quant à l'écart de temps observé, il représente la somme du temps de parcours de l'oxygène dans la canalisation (située entre le diaphragme de mesure et le nez de la lance) et du temps de parcours dans la hotte (entre le nez de la lance et la sonde, via le creuset). Le premier de ces temps a été calculé (1,45 sec). Le temps mort supplémentaire dû à la hotte vaut donc 2,5 sec.

Des essais similaires ont été réalisés avec la même batterie sur une sonde placée au niveau 50 m, afin de préciser les points suivants :

- temps de parcours et amortissement supplémentaires ;
- intérêt de se placer au niveau 27 m plutôt qu'au niveau 50 m ;
- vérification comparative d'une homogénéisation suffisante à ces deux niveaux.

De nouveaux essais seront effectués prochainement. On peut cependant affirmer, pour le premier point, que le temps de parcours supplémentaire est de 3,7 secondes et que l'amortissement est plus important (courbes 3 et 4, figure 23).

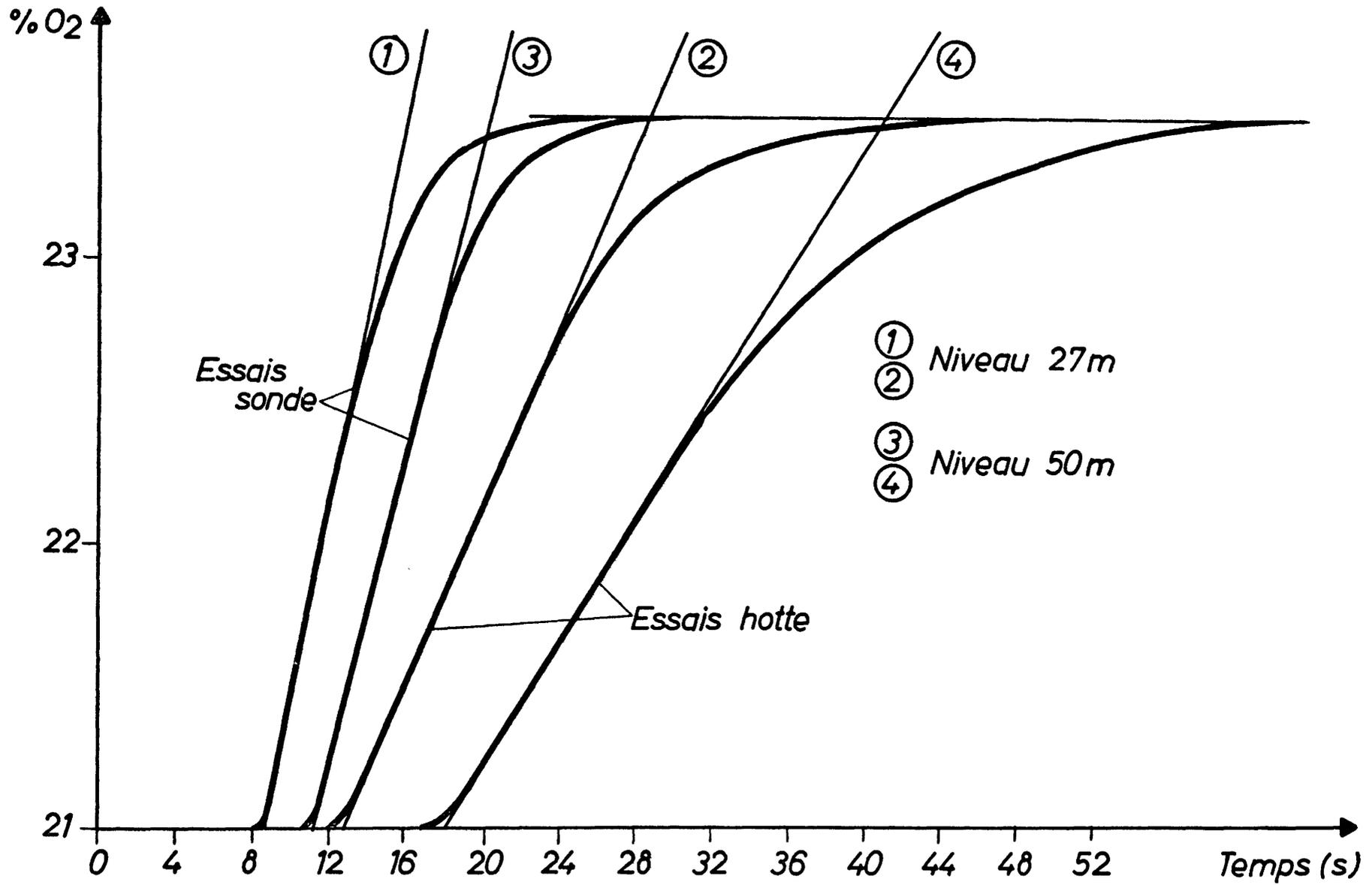


Fig.23_ Essai comparatif d'injection O₂ hotte et O₂ sonde.

3. Performances propres des analyseurs.

Les analyseurs commandés pour la station de mesure de Chertal ont été sélectionnés pour répondre aux spécifications exigées par le C.N.R.M.

Nous nous contenterons de donner ici les résultats principaux obtenus à l'aide de pompes volumétriques de marque "WÖSTHOFF". La précision garantie de ces pompes est de 0,2 % du fond d'échelle. Ainsi, pour 10 % en volume, la précision est de 0,02 % vol.

a) Linéarité des analyseurs.

Chaque analyseur a été étalonné à l'aide des pompes : les courbes d'étalonnage sont données aux figures 24 a, b et c. Le gaz de complément est toujours de l'azote.

Analyseur	Hauteur de cuvette	Gamme	Ecart maximum de linéarité	
			en % vol.	en % du fond d'échelle
UNOR CO	1,2 mm	0-10 %	0,5 % vol.	5 %
UNOR CO2	0,2 mm	0-20 %	2,5 % vol.	12,5 %
SERVOMEX	-	0-25 %	0,1 % vol.	0,4 %

Remarques :

- La linéarité du CO et du CO2 aurait pu être améliorée par un choix plus judicieux de la hauteur de cuvette.
- La linéarité de l'analyseur O2 est excellente.

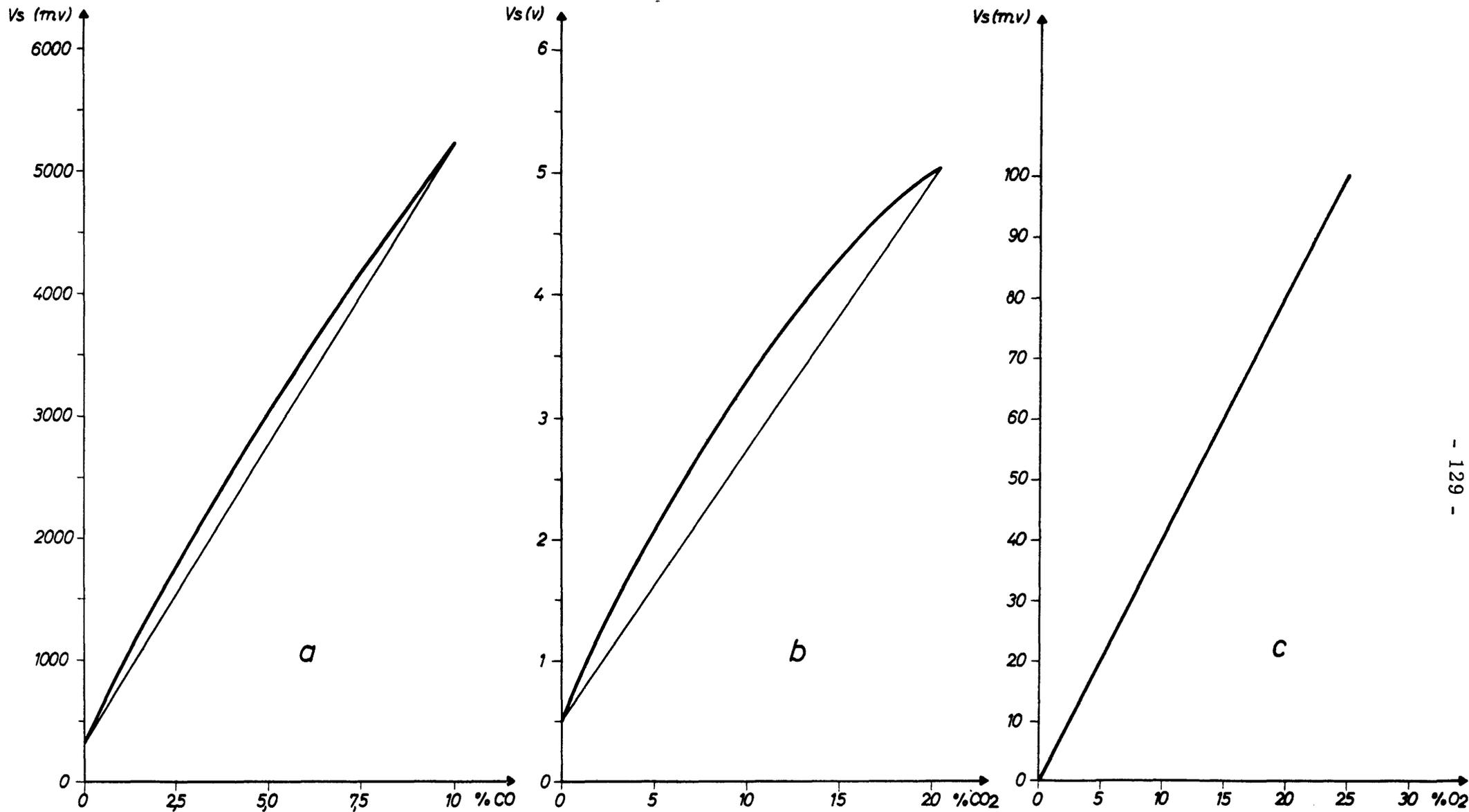


Fig. 24 _Courbes d'étalonnage des analyseurs.

- a) UNOR CO
- b) UNOR CO₂
- c) SERVOMEX

b) Temps de réponse.

- Analyseurs infra-rouges.

Analyseur	T90 constructeur	T90 mesuré
CO	1,7 sec	2 sec
CO2	1,9 sec	2,3 sec

- Analyseur paramagnétique.

L'analyseur est fourni par le constructeur avec deux rotamètres disposés, l'un en by-pass (R_2) et l'autre dans la canalisation d'entrée de la cellule de mesure (R_1). Des essais réalisés, il ressort que le temps de réponse limite de l'instrument se situerait aux alentours de 2,5 sec (figure 25 a). Pour de tels débits, cependant, le signal fluctue considérablement, ce qui s'explique par les figures 25 b et c : l'influence d'une faible fluctuation des débits dans R_1 et R_2 est grande sur la stabilité du zéro et du gain de l'appareil. Dans le cas de Chertal, le by-pass R_2 doit laisser passer un débit important (400 l/h). Ceci amène donc à limiter le débit dans R_1 à 20 l/h maximum. Le temps de réponse correspondant vaut alors 13 secondes.

Insistons sur le fait que ces temps de réponse sont ceux de l'analyseur seul.

c) Influence de la pression.

On peut écrire pour un gaz parfait :

$$\Delta C = c \frac{\Delta P}{P}$$

et pour un gaz réel :

$$\Delta C = \alpha c \frac{\Delta P}{P}$$

où C est la concentration en volume du gaz à analyser et P la pression absolue.

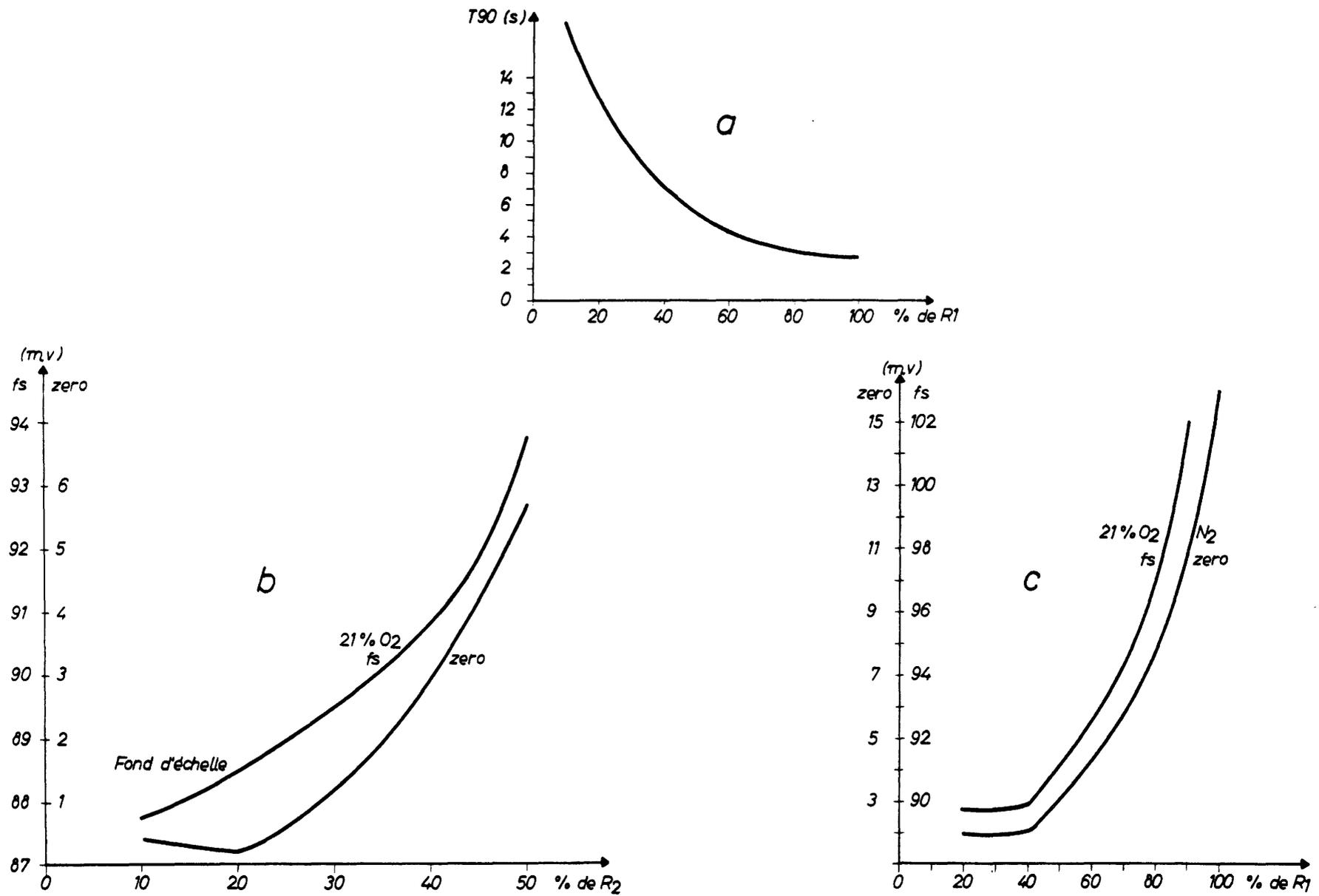


Fig. 25 - Temps de réponse du Servomex en fonction de R_1 et R_2 .

a) T_{90} en fonction de R_1 .

b) Stabilité du zero et du gain en fonction de R_2 .

c) Stabilité du zero et du gain en fonction de R_1 .

Analyseur	C (%)	$\Delta C / \Delta P$ (exp.)	α
CO	7	0,06 %/10 mm HG	0,65
CO2	17	0,15 %/10 mm HG	0,67

d) Essais à long terme.

Pour celui-ci, une minuterie provoquait l'injection, toutes les demi-heures d'un gaz "bas" (faible teneur en CO₂, CO, O₂) et d'un gaz "haut". Un data-logger relevait simultanément les indications de pression, de température et les sorties des analyseurs placés dans une armoire non thermostatisée.

- Stabilité de zéro.

Analyseur	σ (mV)	σ (% vol.)
CO	7	0,012
CO2	4	0,012

Cette excellente stabilité de zéro correspond bien à ce qu'on attendait des appareils UNOR, au vu de leur réalisation particulière et de leur électronique soignée.

- Stabilité sur gaz haut.

Appareil	σ_T (°C)	σ_P (mmHg)	$\sigma_{anal.}$ (%vol.)	Gamme
CO	1,4	4,42	0,08	0-10 %
CO2	1,4	4,42	0,10	0-20 %
O2	0,6	4,53	0,13	0-25 %

Remarque : Le O₂ rentre dans la classe CO-CO₂ du point de vue stabilité temporelle.

e) Influence de la présence de gaz étrangers.

Expérimentalement, on constate que pour une concentration constante en CO, l'analyseur CO donne des indications différentes, si l'on modifie le pourcentage de CO₂, d'O₂ ou d'H₂ dans l'échantillon gazeux. Il en est de même pour l'analyseur CO₂.

Ce phénomène résulte de deux causes :

- L'existence d'un recouvrement des bandes d'absorption du CO et du CO₂ dans le spectre I.R. émis ("sensibilité transversale").
- Que ce recouvrement existe ou non, il y a modification de la largeur des bandes d'absorption, due à la présence de molécules de gaz étranger ("Pressure broadening" ou élargissement par modification des pressions partielles des composants de l'échantillon).

Au stade de précision atteint, il devenait nécessaire de quantifier l'effet global de ces deux phénomènes regroupés sous le vocable "Phénomène d'interférence".

Des essais ont donc été effectués au C.N.R.M. Les analyseurs étaient placés dans une armoire thermostatée (élimination des effets de température), la pression absolue était mesurée : n'étaient pris en considération que les résultats successifs compris dans une période de pression constante. Les pompes débitent un débit constant (de par leur construction), ce qui élimine la dernière cause possible de variation intempestive du signal.

Les figures 26 a et 26b donnent les courbes d'interférence pour les analyseurs CO à 10 % de CO et CO₂ à 10 % de CO₂ respectivement. Le tableau ci-dessous donne les résultats plus complets et notamment les "coefficients d'interférence" calculés à partir des courbes assimilées à des droites (à une erreur du second ordre près) :

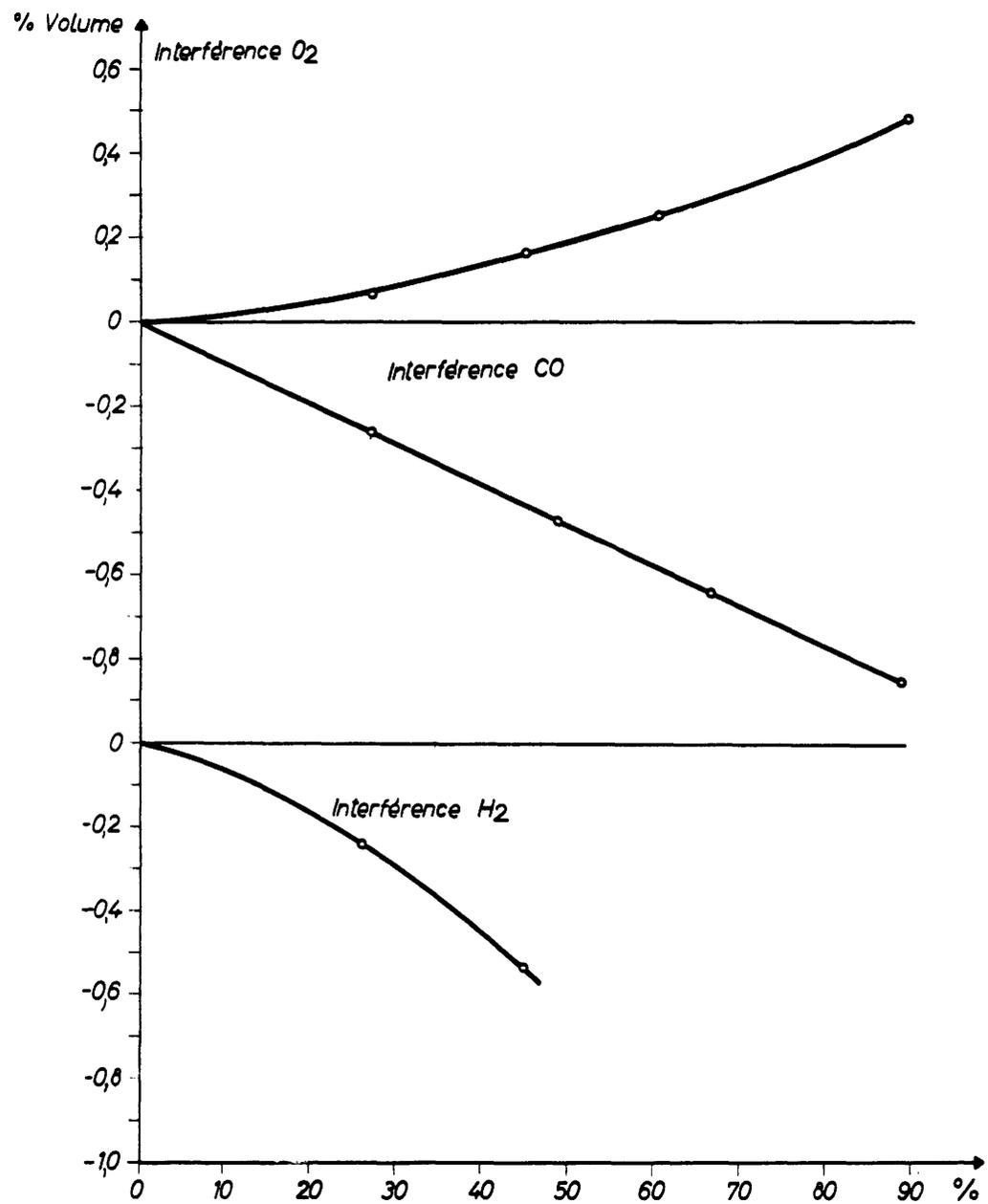


Fig. 26a - Courbes d'interférence UNOR CO₂ à 10% CO₂.

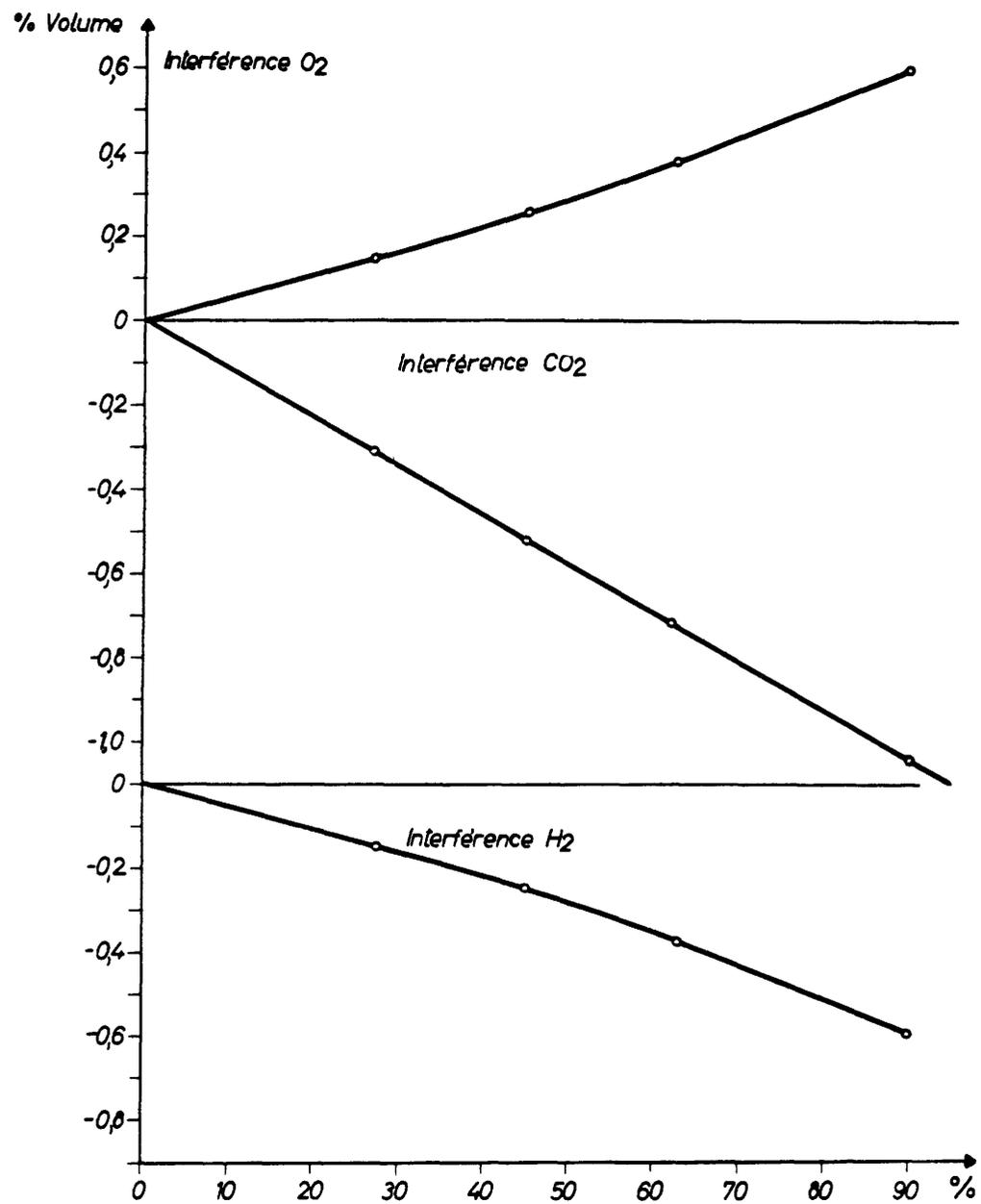


Fig. 26b - Courbes d'interférence UNOR CO à 10% CO.

	ANALYSEURS		
	CO2	CO	CO
%	10 % CO2	10 % CO	5 % CO
<u>Interfé-</u> <u>rences</u>			
O2	+0,054 % / 10 % O2	+0,067 % / 10 % O2	+0,038 % / 10 % O2
CO ou CO2	-0,094 % / 10 % CO	-0,116 % / 10 % CO2	-0,067 % / 10 % CO2
H2	-0,11 % / 10 % H2	-0,66 % / 10 % H2	-0,040 % / 10 % H2

Remarques :

1. Pour de faibles variations de gaz étranger, les écarts peuvent être importants ; ainsi :
 - à 10 % CO, une variation de 20 % CO2 provoque une erreur de 0,23 % par défaut. L'indication sera donc de 9,770 % CO au lieu de 10. De telles conditions peuvent se rencontrer en aciérie.
 - à 10 % CO2, une variation de 20 % CO provoque une erreur de 0,19 %. Elle serait encore plus importante pour 20 % CO2.
2. Ces erreurs sont du même ordre de grandeur que les précédentes.
3. Ces résultats sont spécifiques des analyseurs étudiés, et ne peuvent donc être extrapolés à d'autres, même de marque identique. L'allure des courbes est cependant la même pour tous les analyseurs I.R.
4. Les mêmes essais conduits sur le SERVOMEX montrent que celui-ci est insensible à ce phénomène.

4. Les tiroirs de correction.

Les tests évoqués ci-dessus nous permettent de classer les causes d'erreurs en deux groupes :

- Les erreurs systématiques : - linéarité ;
- temps de réponse ;
- phénomène d'interférence.

- Les erreurs aléatoires : - instabilité des analyseurs
- influence de la pression ;
- influence de la température.

Il importe de diminuer les unes et les autres.

a) Les erreurs aléatoires.

L'influence de la température (variations à court terme) est minimisée par la thermostatisation de l'armoire contenant les analyseurs. Les deux autres influences (variations à long terme) sont contrebalancées par des tarages périodiques sur deux gaz de référence stables. De ce fait, une régulation de la pression de l'échantillon à analyser se révèle inutile (tarage avant chaque essai).

b) Les erreurs systématiques.

1°) Linéarité.

Le tarage automatique se révèle plus facile (nécessité de deux points de référence seulement) et plus précis, si la caractéristique à corriger est linéaire. La lecture est également plus aisée. Dans le cas des analyseurs IR, chaque tiroir possède donc une carte de linéarisation de la courbe d'étalonnage obtenue en IV.C.3.a. On a alors :

Analyseur Analyseur	Erreur de linéarité en % du fond d'échelle	Erreur de linéarité en % VOL	Gamme
CO	0,4 %	0,04 %	0 - 10 %
CO2	0,4 %	0,08 %	0 - 20 %

Dans le cas du paramagnétique, aucune correction n'est nécessaire.

2°) Temps de réponse.

- Analyseurs UNOR.
.....

Les analyseurs possèdent un filtre de sortie passif de type LC destiné à supprimer le signal modulé à 6,25 Hz. Des oscillogrammes de temps de réponse effectués avant ce filtre ont montré que celui-ci ne permettait pas de satisfaire aux exigences de temps de réponse et de taux d'ondulation résiduelle du signal.

Un filtre actif de type Butterworth a été monté dans le tiroir de correction en lieu et place du filtre passif. Après plusieurs essais, le filtre choisi est d'ordre 4 avec une fréquence de coupure de 1,5 Hz. Un ordre supérieur diminue encore le temps de réponse, mais présente un dépassement trop important à une variation échelon de concentration. Un choix d'une fréquence de coupure plus petite diminuerait également T 90, mais l'ondulation résiduelle du signal de sortie devient trop importante.

Ces essais peuvent se résumer comme suit :

Analyseur	T90 montée sans filtre	T90 descente sans filtre	T90 filtre passif	T90 filtre actif
CO	0,3 sec	0,5 sec	2 sec	1 sec
CO2	0,7 sec	0,3 sec	2,3 sec	1,2 sec

Cette amélioration permet donc de gagner un facteur 2 sur le temps de réponse et un facteur 3 sur l'ondulation résiduelle du signal qui passe de 6 à 2 mV.

- Analyseur O₂.
.....

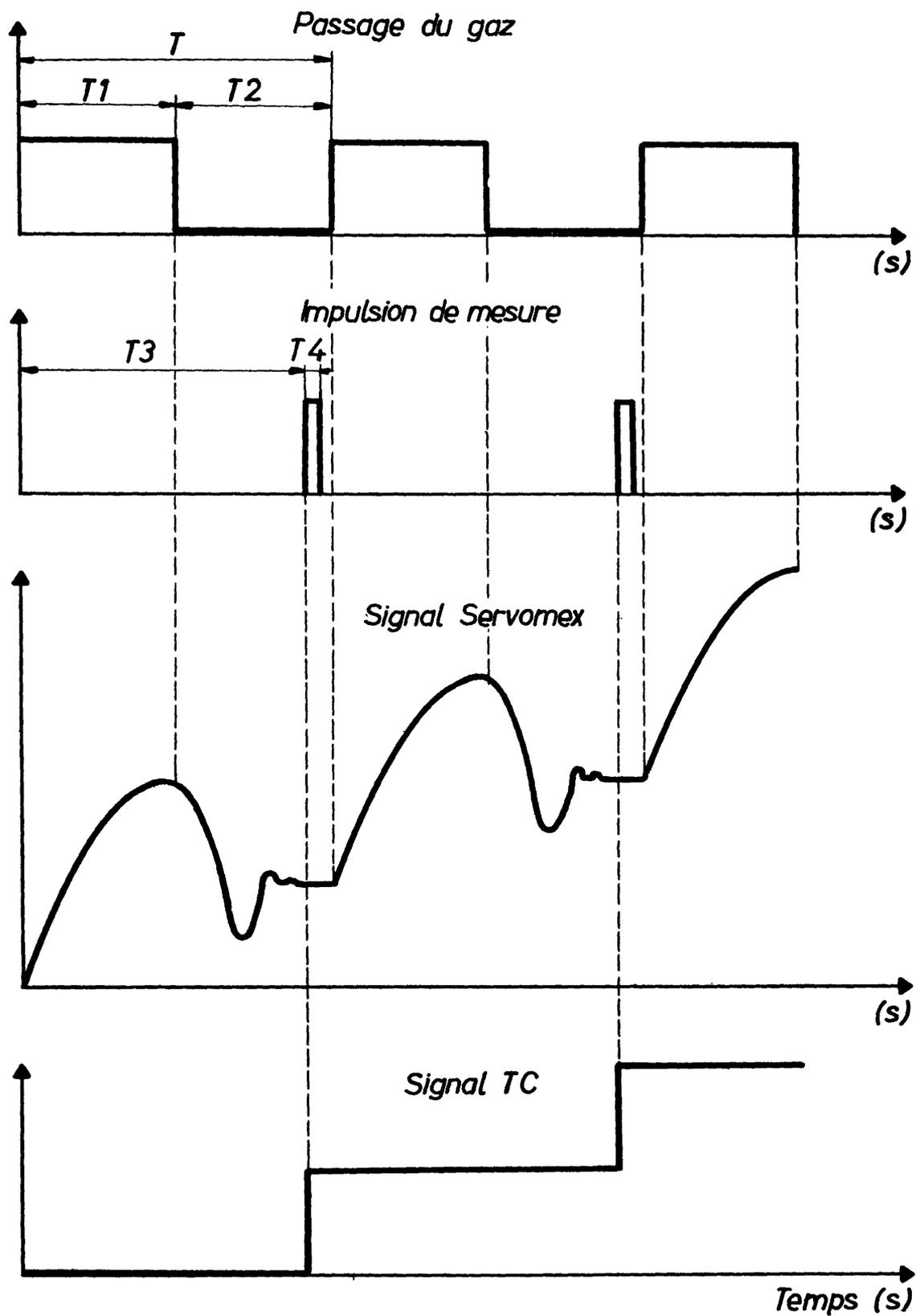
Le même filtre est employé pour le O₂. Il permet d'abaisser les fluctuations résiduelles et d'augmenter ainsi le débit jusqu'à 30 l/h. Le temps de réponse correspondant est ainsi abaissé à 9,6 secondes.

Ce temps étant encore trop long vis-à-vis de ceux des analyseurs infrarouges, un système dit "impulsionnel" a été mis au point au C.N.R.M. Le principe en est le suivant (fig. 27).

Le gaz est admis dans la cellule de mesure pendant le temps T_1 , sous la forme d'une impulsion de débit, dont la pression est réglable par un rotamètre monté dans le by-pass contournant l'appareil. La cellule de mesure se stabilise ensuite pendant T_2 et le gaz est entièrement détourné dans le by-pass. En T_3 , une mesure est effectuée et gardée en mémoire pendant la durée T du cycle. Le signal de sortie du tiroir de correction (dans lequel se trouve l'amplificateur à mémoire) évolue donc par échelons successifs.

Quelques remarques s'imposent :

1. Il importe de diminuer le cycle T : l'approximation par échelons épousera d'autant mieux la courbe réelle d'évolution de la concentration d'oxygène.
2. Il importe également de diminuer le temps T_2 : la mesure effectuée en T_3 représente en fait la concentration d'oxygène en T_1 . Il existe donc un temps mort systématique $T_3 - T_1$, qui s'ajoute à ceux des conduites et des analyseurs.
3. Il importe de donner à T_1 une valeur telle que la totalité du gaz remplissant la cellule de mesure soit remplacée à chaque impulsion de débit.



*Fig.27 - Système impulsionnel Servomex.
Schéma de principe.*

4. La pression d'entrée du gaz joue son rôle dans le point 3.
5. Il subsiste une indétermination de T secondes dans la mesure du temps mort propre au système "Analyseur + commande impulsionnelle". Elle peut être levée en partie en extrapolant la courbe de réponse vers les faibles valeurs.

A la suite d'essais réalisés sur ces bases, les valeurs suivantes ont été adoptées :

- Pression d'entrée : réglée au maximum compatible avec le décrochage de l'analyseur.
- $T = 3$ sec.
- $T_1 = 0,8$ sec.
- $T_2 = 2,2$ sec.

Pour ces valeurs, un temps de réponse T_{90} de 6 secondes a pu être obtenu pour une fluctuation résiduelle de ± 5 mV (soit $\pm 0,013\%$ vol.) sur le palier de la courbe de réponse.

En mars 1970, une tête de mesure à amortissement plus rapide a été montée sur le O2 et de nouvelles valeurs de T_1 , T_2 et T ont été déterminées :

$$\begin{aligned} T &= 1,5 \text{ sec.} \\ T_1 &= 0,75 \text{ sec.} \\ T_2 &= 0,75 \text{ sec.} \end{aligned}$$

De ce fait, le temps de réponse a pu être abaissé à 3,3 sec. La figure 28 compare les courbes de réponse obtenues pour les trois essais suivants :

- courbe 1 : système normal ; débit dans la chambre de mesure : 30 l/h ; ancienne cellule.
- courbe 2 : système impulsionnel ; $T = 3$ sec ; ancienne cellule.
- Courbe 3 : système impulsionnel ; $T = 1,5$ sec ; nouvelle cellule.

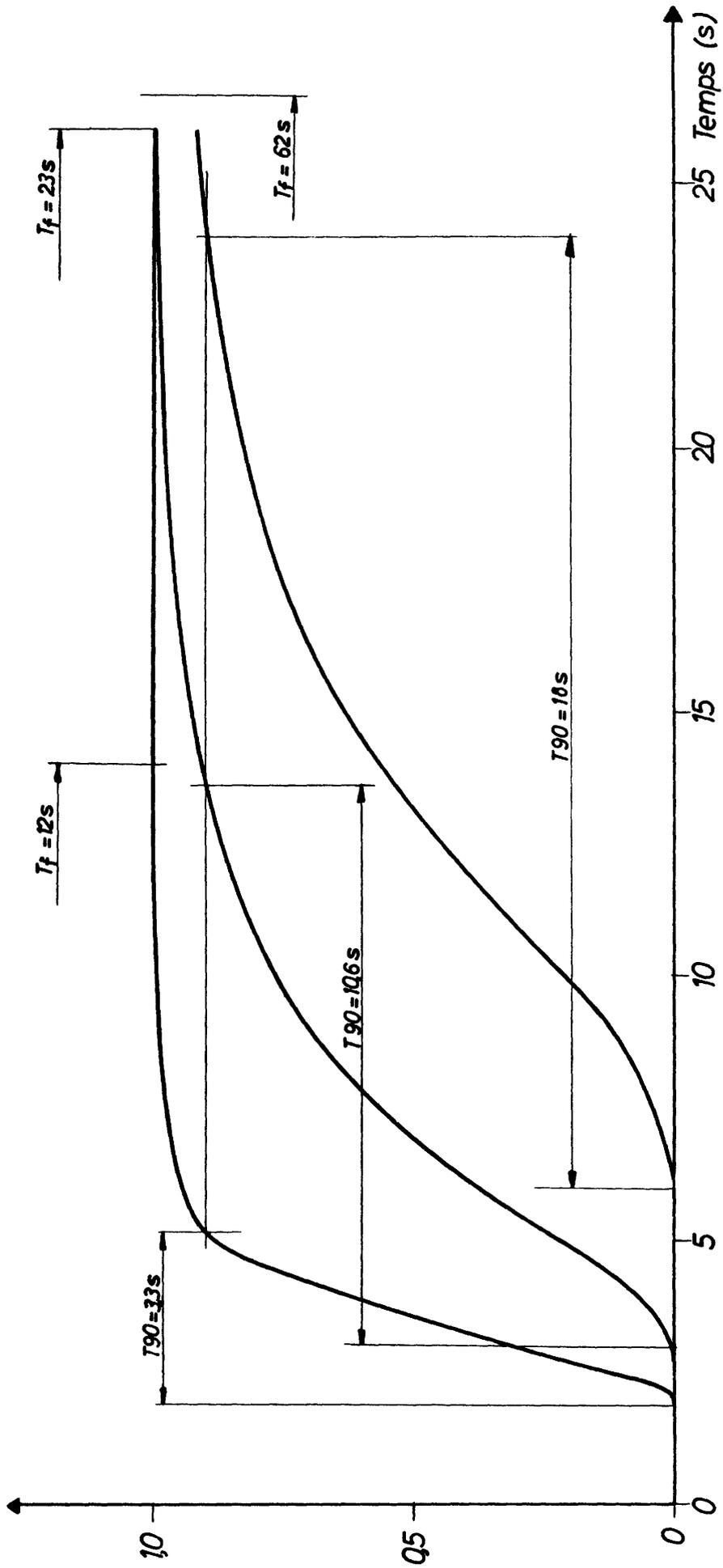


Fig. 28 - Gains - Système impulsionnel Servomex.

Remarques :

1. Ces trois essais ont été réalisés dans des conditions identiques sur l'installation existant à Chertal, conduite de prélèvement non connectée.
2. Puisque la présence de la pompe, des filtres et des conduites introduit un amortissement supplémentaire déjà mentionné, l'ordre de grandeur des temps de réponse est supérieur à celui obtenu lors d'essais sur analyseurs seuls.
3. Du fait de cet amortissement et par la disposition du SERVOMEX en tête de file, les trois analyseurs ont à peu près les mêmes temps de réponse :

CO : 3,5 sec.

CO₂ : 4,2 sec.

O₂ : 3,3 sec.

4. Une nouvelle amélioration du T_{90} du SERVOMEX pourrait encore être espérée. Du fait de l'amortissement plus important de la nouvelle cellule, des impulsions plus violentes peuvent être appliquées, sans provoquer de décrochage du rayon lumineux : il suffirait donc d'augmenter la pression à la sortie de la pompe.

Conclusions:

1. Le système impulsif donne un gain remarquable vis-à-vis du système normal, quant au T_{90} des courbes de réponses.
2. Le gain de temps est encore plus important sur la valeur finale du palier de la courbe (voir figure 28). C'est là, sans doute, le principal avantage du système impulsif.

Analyseur SERVOMEX	Système normal	Système impulsif	
		T = 3 sec.	T = 1,5 sec.
T_{90}	18 sec	10,6 sec	3,3 sec
T_{final}	60 sec	23 sec	12 sec

3°) Correction d'interférence.

Les erreurs dues à ce phénomène étant du même ordre de grandeur que les autres, il devenait nécessaire de les compenser. Chaque tiroir de correction possède donc une carte de correction d'interférence, dont le principe est basé sur l'équation :

$$(\% \text{ CO})_{\text{réal.}} = (\% \text{ CO})_{\text{brut}} + (\% \text{ CO})_{\text{brut}} \left[a \% \text{ CO}_2 + b \% \text{ O}_2 \right]$$

où a et b sont les "coefficients d'interférence" trouvés en IV.C.3.e.

4°) Les tiroirs de correction.

La figure 29 montre le schéma de principe d'un tiroir de correction complet (celui du CO₂). Chaque fonction est groupée sur une carte de circuit imprimé et peut être facilement supprimée si elle s'avère inutile. Dans le tiroir de correction O₂, par exemple, il n'y a ni carte de linéarisation (voir I.C.3.a), ni carte de correction d'interférence (voir I.C.3.e), mais celle-ci est remplacée par une carte mémoire pour le système impulsif. Le schéma est suffisamment explicite. Insistons seulement sur les différentes liaisons nécessaires entre tiroirs. La précision de tarage est de ± 5 mV, soit 0,05 % fs.

D. Performances du circuit de mesure de l'humidité des fumées.

1. Précision globale de la mesure.

L'hygromètre Agmel jouit d'une précision de 0,2°C sur la mesure du point de rosée du gaz. La température est mesurée par un thermocouple Cu-Cst suivi d'un transmetteur mV/MA d'une précision de 0,1 %. La précision totale de la mesure du point de rosée vaut donc 0,3°C. La pression dans la tête de mesure est fournie par un capteur de pression absolue STATHAM (Précision 0,1 %). (conduite en dépression).

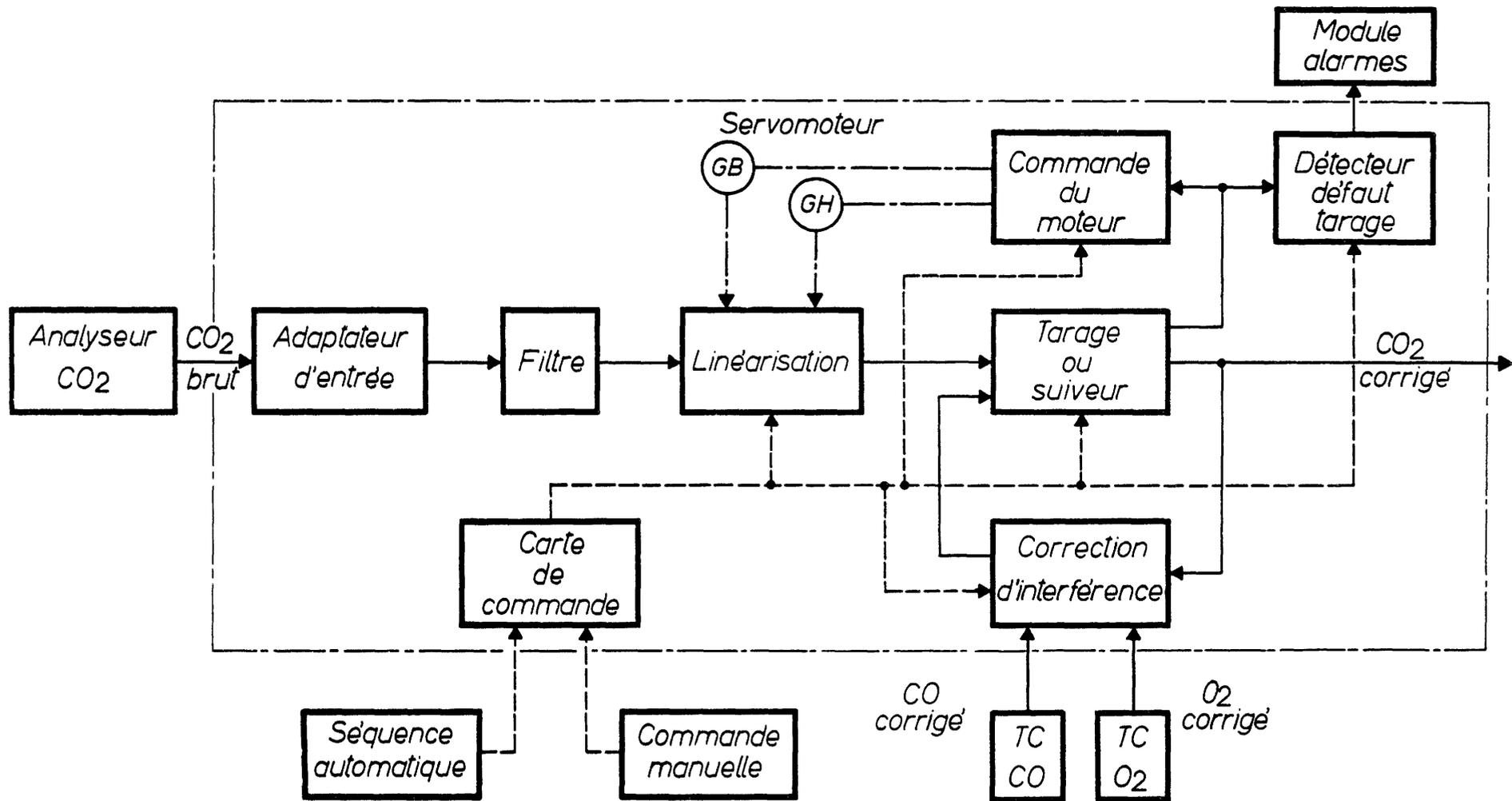


Fig. 29 -Tiroir de correction. -Schéma de principe.

Le calcul de l'humidité absolue du gaz se fait d'après la formule :

$$H \text{ absolue à } P \text{ mm Hg et } t^{\circ}\text{C} = \frac{HS}{P} \times \frac{TR}{T} \times P_0$$

où HS est l'humidité déterminée en entrant la température du point de rosée TR sur les abaques fournies par le constructeur. (HS = humidité spécifique à la saturation et à 760 mm Hg).

E. Caractéristiques des équipements d'analyse du son et de la flamme.

1. Analyse son.

Comme nous l'avons vu, le bruit enregistré par le micro est amplifié et filtré. Quatre fréquences centrales de bandes passantes sont possibles : 150, 250, 350 et 450 Hz. Les caractéristiques de ces filtres sont rassemblées sur la figure 30.

Des enregistrements de bruit provenant du convertisseur de Chertal seront effectués dans un avenir proche sur enregistreur magnétique. Leur analyse spectrale nous permettra de déterminer la fréquence la plus caractéristique et d'adapter éventuellement le filtre.

Actuellement, le choix de 450 Hz semble donner d'excellents résultats.

2. Analyse de la flamme.

La cellule utilisée est de type OAP 12, visant dans l'I.R. L'électronique associée à celle-ci permet de choisir l'atténuation et l'amortissement désirés. Une cellule de compensation située dans le boîtier de visée et obturée permet de compenser la dérive de l'indication due à l'élévation de température du boîtier lors de la coulée.

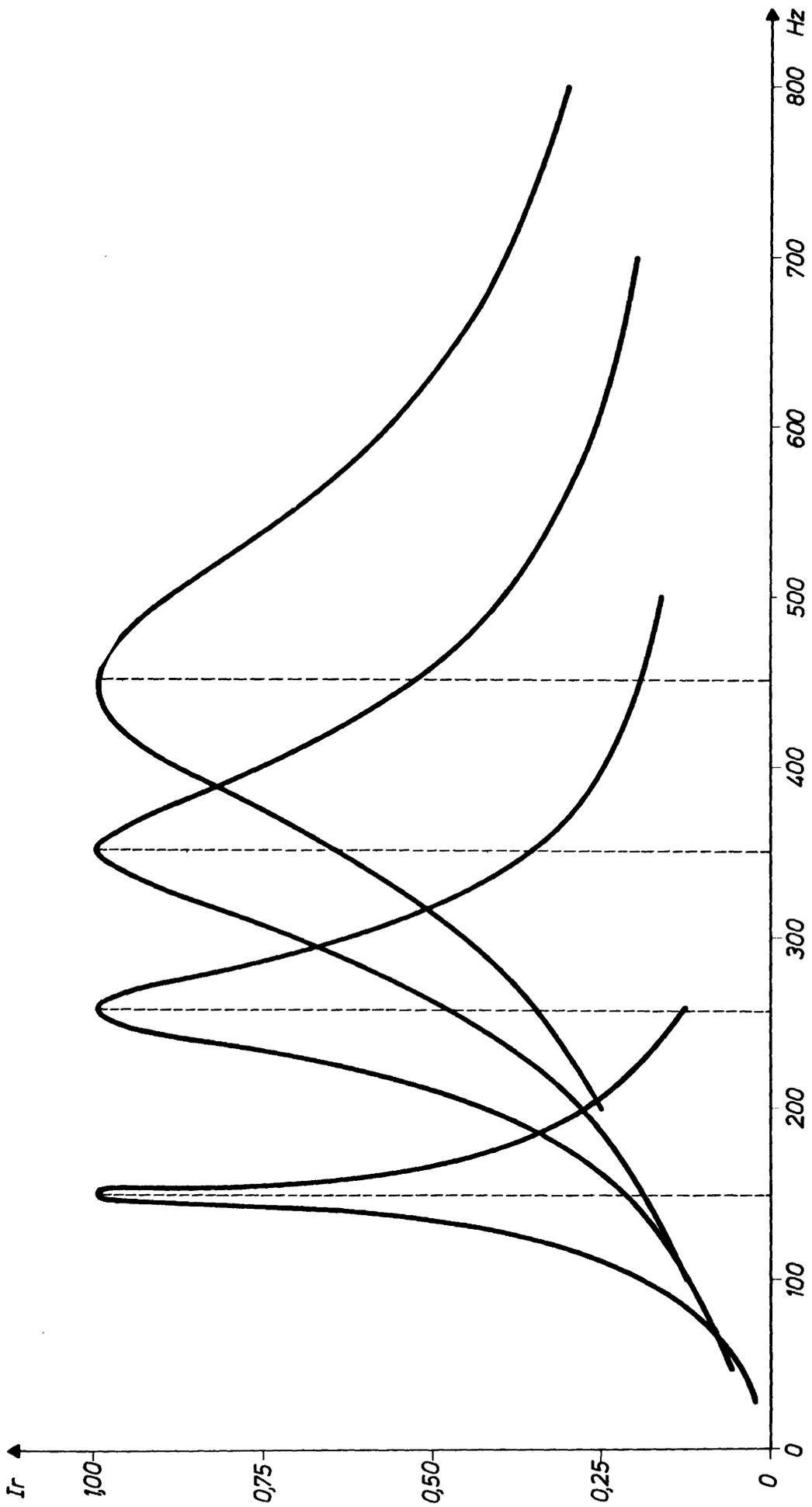


Fig.30 - Audiomètre - Sélection de fréquence.

V. PREMIERS RESULTATS.

=====

La station de mesure peut dès maintenant être considérée comme opérationnelle. Dès le mois de janvier, des essais préliminaires ont cependant été effectués. Nous les décrirons brièvement ainsi que les résultats obtenus.

A. Processus.

Depuis janvier 1970, chaque signal a fait l'objet d'enregistrements séparés en vue de s'assurer de leur qualité et de parfaire les réglages.

Quelques coulées d'essais ont ensuite été enregistrées sur le data-logger, de façon à surveiller le comportement d'ensemble de l'instrumentation.

Une quinzaine de coulées complètes sont actuellement enregistrées et dépouillées au C.N.R.M. pour mettre au point les procédés de calcul, d'une part, et, d'autre part, pour détecter des éventuels défauts de mesure qui n'apparaîtraient pas a priori.

B. Système d'injection de chaux.

Après étalonnage simultané de tous les capteurs de pression en nos laboratoires, deux campagnes d'essais ont été effectuées dès le mois de janvier 1970 pour analyser le fonctionnement du KLINGER.

Les onze mesures déjà décrites (II.B) étaient enregistrées simultanément sur data-logger toutes les 3 secondes (précision), sur enregistreurs magnétiques (facilité de dépouillement sur le calculateur analogique) et sur enregistreur galvanométrique (visualisation immédiate sur place). En outre, un signal de référence pouvait être injecté à tout moment sur n'importe quel canal pour indiquer le début et la fin des périodes de perturbations

imposées à certaines grandeurs (position tuyère, position pointeau, débit d'oxygène....).

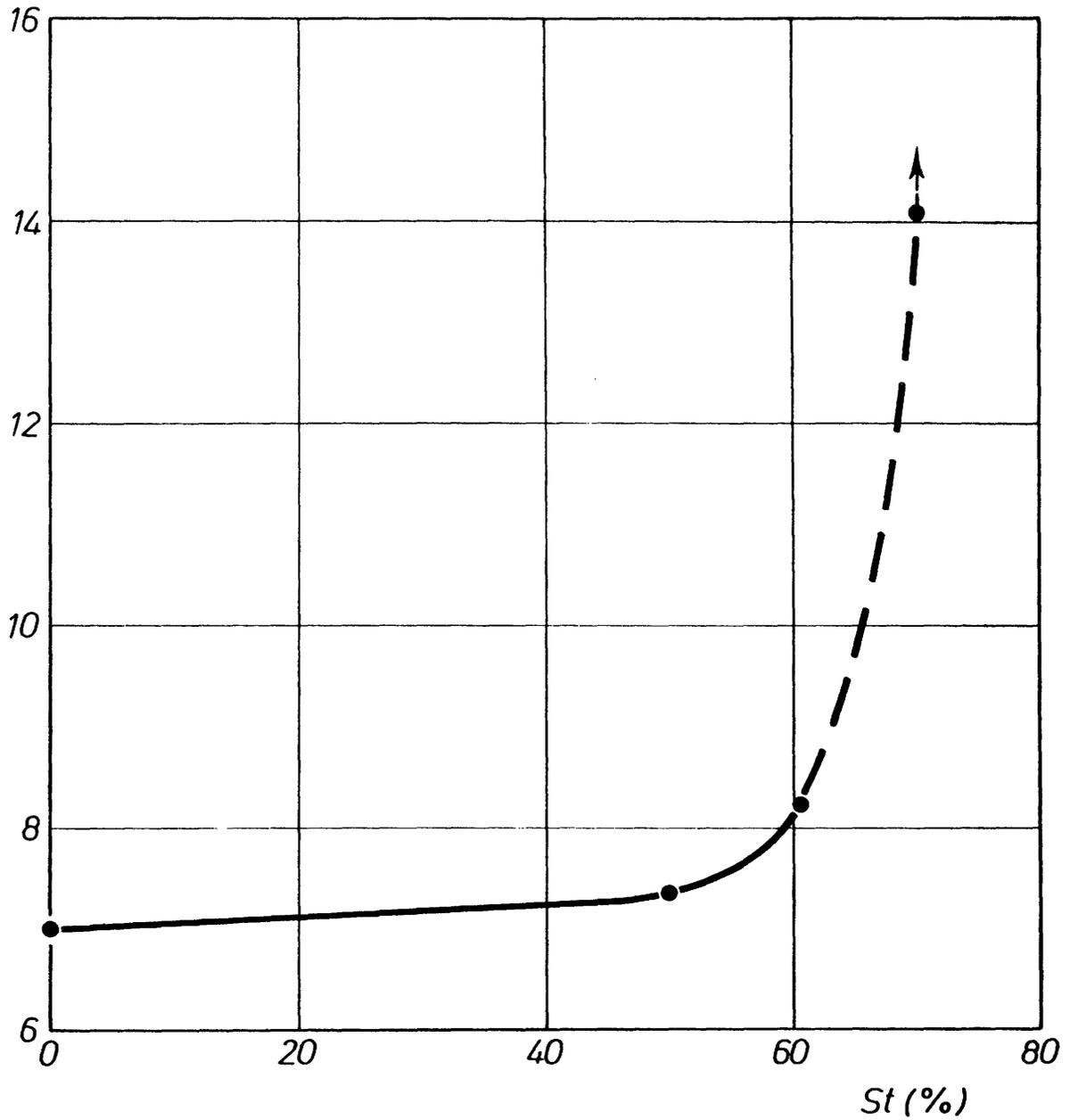
Un programme de perturbations systématiques ayant été mis au point , une première campagne d'essais avait pour but de tester le fonctionnement du KLINGER en marche normale. Une deuxième campagne avait pour objet l'étude des pertes de charge produites pour différentes ouvertures de la tuyère, le pointeau et la vanne 12 étant fermés (pas d'injection de chaux). La mesure de la perte de charge était donc donnée par la valeur de P_{ob} .

Les essais ont conduits aux conclusions suivantes :

1. La caractéristique de la tuyère $P_{ob} = f (St)$ pour Q_{oa} fixé, n'est pas linéaire (fig. 31). Il en est de même pour tout autre débit d'oxygène.
2. Les variables Sp et St ne peuvent être prises valablement comme grandeur d'action (corrélation insuffisante avec Q_{cAo})
3. L'installation d'une vanne modulante, sur la conduite AT ou sur la conduite LD est nécessaire pour remplacer la tuyère en tant que grandeur d'action, en vue d'une régulation en boucle fermée du débit de chaux.

Cette vanne est en cours d'installation. Des essais seront ensuite repris pour confirmer les résultats obtenus.

$P_{ob} (kg/cm^2)$



La flèche indique une pression P_{ob} non stabilisée et toujours croissante.

Fig.31 _ Essais avec soufflage d'oxygène seul.
Diagramme $P_{ob}=f(St)$ avec $Q_{oa}=400 Nm^3/min$.

VI. CONCLUSIONS.

=====

La station de mesure installée par le C.N.R.M. à l'aciérie LD-AC de la S.A. Métallurgique ESPERANCE-LONGDOZ à Chertal est dès maintenant opérationnelle.

Le présent rapport se subdivise en quatre parties :

1. Énumération et description des mesures disponibles.

Les équipements installés par le C.N.R.M. sont décrits plus particulièrement, notamment l'analyse des gaz et la mesure de l'humidité des fumées.

2. Situation et description de la station de mesure.

Chacune des baies électroniques de mesure est décrite. Un paragraphe est consacré à l'équipement d'enregistrement des données.

3. Performances de l'appareillage.

L'équipement d'analyse gaz fait l'objet d'une analyse détaillée de ses différents composants. Les essais décrits ont donné les résultats suivants:

- temps de parcours du gaz entre la sonde et les analyseurs : 6,25 sec.;
- temps de parcours du gaz dans la hotte entre la lance et la sonde : 2,5 sec. ;
- temps de réponse global de la mesure : temps mort : 9 sec.
temps T90 : 11 sec.
- ces temps pourraient encore être réduits par quelques modifications mineures.

Un paragraphe important décrit en outre les essais de réception des analyseurs et les améliorations qui leur ont été apportées (tiroirs de corrections et système "impulsionnel" pour l'analyseur d'oxygène).

4. Premiers résultats.

Les essais préliminaires ont été effectués pour toutes les mesures disponibles et un enregistrement continu de celles-ci peut commencer.

Les résultats des mesures effectuées sur le système d'injection de chaux pulvérulente sont également résumés.

+ +

+

+

REMERCIEMENTS.
=====

Qu'il nous soit permis de remercier ici les Services Thermique, Electrique et Mécanique de la S.A. Métallurgique d'ESPERANCE-LONGDOZ ainsi que les techniciens de l'Atelier Mécanique et du Service Mesures et Contrôles du C.N.R.M. pour l'aide efficace qu'ils nous ont apportée dans la réalisation de cette installation.

+ +

+

+

AFFINAGE DES FONTES PHOSPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

DETERMINATION DE LA VITESSE DE DECARBURATION
PAR MESURE DE LA TEMPERATURE DES FUMÉES

par

H. VOLL D. RAMELOT



DETERMINATION DE LA VITESSE DE DECARBURATION
PAR MESURE DE LA TEMPERATURE DES FUMÉES

par

H. VOLL et D. RAMELOT,
Ingénieurs au C.R.M.

SOMMAIRE

1.	Introduction	156
2.	Abréviations	158
3.	Emploi des analyseurs de gaz pour calculer la vitesse de décarburation	159
4.	Mesure de la température des fumées par thermocouple	160
5.	Essais réalisés	161
6.	Contrôle statistique de la corrélation entre la vitesse de décarburation et la température des fumées.	162
7.	Principe de l'étalonnage continu de la température des fumées.	164
8.	Résultats obtenus avec l'étalonnage continu du thermocouple.	167
9.	Evolution dynamique de la mesure de la température des fumées.	170
10.	Conclusions relatives au dépouillement	171
11.	Perspectives	172
	Résumé et conclusions	174
	Références	175
	Figures (3)	176
		à
	+	+
		178

1. INTRODUCTION

Le calcul de la vitesse de décarburation sur base des indications des analyseurs de gaz comporte un important délai. Celui-ci résulte du transfert des fumées entre le convertisseur et les analyseurs. Il est notamment fonction de la géométrie de la hotte et du débit des fumées, de la longueur et des pertes de charge des circuits de prélèvement et de conditionnement des échantillons et de la vitesse de réponse des analyseurs.

Des méthodes de substitution fournissant plus rapidement une information, ont été expérimentées et ont conduit à des résultats de qualité inégale ; à titre d'exemple, citons une mesure du rayonnement de la flamme (1), une mesure de la température des fumées par thermocouple (2), une même mesure par voie acoustique. Ces mesures fournissent d'utiles informations sur le cours ou à certains moments du soufflage ; par contre, la relation de leur indication avec la décarburation varie au cours du temps, sous l'effet de diverses influences perturbatrices. L'espoir de dépasser le stade actuel de l'obtention d'une indication qualitative ou semi-quantitative de la décarburation à l'aide de ces méthodes peut être envisagé à moyen terme seulement.

Néanmoins, pour aboutir à une réalisation à court terme, la mesure de la température des fumées par thermocouple, antérieurement exploitée par le C.R.M. (2), a été choisie parce qu'elle est bien corrélée à la décarburation, tout en ayant, sous certaines conditions, un temps de réponse réduit. L'originalité de la technique d'estimation de la vitesse de décarburation, exposée ci-dessous, réside dans l'introduction d'une méthode analytique d'étalonnage permanent des indications d'un thermocouple à l'aide des informations fournies par les analyseurs de gaz.

Les résultats obtenus à partir d'enregistrements effectués au cours de deux journées d'essais sont décrits en considérant successivement les aspects suivants :

- corrélation existant entre la température des fumées et la vitesse de décarburation déterminée par analyse des fumées ;
- précision de l'évolution estimée, compte tenu de l'étalonnage continu ;
- vitesse de réponse du capteur.

+ +

+

2. ABREVIATIONS.

		<u>Unités</u>
CO	Volume de CO dans les fumées de la hotte	%
CO2	Volume de CO2 dans les fumées de la hotte	%
GAZ	Volume total de CO et de CO2 dans les fumées de la hotte	%
QF	Débit normal des fumées	Nm3/min
VC	Vitesse de décarburation du bain	kgC/min
$\hat{V}C$	Valeur estimée de VC	kgC/min
T	Période de scrutation des grandeurs loggées	s
TH	Température des fumées dans la hotte mesurée par thermocouple	°C

+ +

+

3. EMPLOI DES ANALYSEURS DE GAZ POUR CALCULER LA
VITESSE DE DECARBURATION (VC)

La vitesse de décarburation du bain est calculée par la relation suivante :

$$VC = K * QF * \left(\frac{CO + CO_2}{100} \right) \quad [1]$$

où CO, CO₂ sont les teneurs en CO et CO₂ des fumées dans la hotte,

QF est le débit normal de ces fumées,

K est une constante valant $\frac{1}{1.864}$ kg carbone/Nm³

Les teneurs en CO et CO₂ des fumées sont déterminées par des analyseurs de gaz qui utilisent un échantillon de fumées prélevé à la sortie de la hotte (figure 1). L'indication des analyseurs n'est donc disponible qu'avec un délai résultant du transfert des fumées entre le convertisseur et les analyseurs.

Dès lors, en conduite manuelle, l'affichage de la vitesse de décarburation ainsi obtenue n'a qu'un intérêt réduit pour l'opérateur qui, par contre, dispose, par observation visuelle de la flamme, d'une information qualitative très rapide. En conduite automatique, la gouvernabilité est fortement détériorée par ce retard.

+ +

+

4. MESURE DE LA TEMPERATURE DES FUMÉES PAR
THERMOCOUPLE

Le délai qui affecte la détermination de la vitesse de décarburation à l'aide des analyseurs de gaz peut être réduit :

- soit par une méthode statistique de prédiction des indications des analyseurs,
- soit par l'emploi d'un capteur auxiliaire satisfaisant aux conditions suivantes :
 - bonne corrélation de son indication avec celle des analyseurs,
 - faible temps de réponse vis-à-vis des phénomènes se produisant au bec du convertisseur.

Dans cette seconde optique, un thermocouple a été placé dans la hotte (fig. 1). Il a été monté dans une canne pénétrant de 1,5 m dans celle-ci. La tête de mesure a été libérée de toute protection sur une longueur de 25 mm, de façon à réduire autant que possible l'inertie thermique et le temps de réponse du dispositif.

De plus, à ce niveau, la combustion du CO en CO₂ est généralement complète ; dès lors, la température observée est, pour une grande part, obtenue par la chaleur de combustion et est, dès lors, en relation avec la teneur en CO₂ des fumées.

+ +

+

5. ESSAIS REALISES.

A l'aide du data-logger de la cabine de mesure, dix-huit phases (dix phases 1 et huit phases 3) ont été enregistrées en scrutant les grandeurs suivantes avec une période de 3 secondes :

- température des fumées dans la hotte,
- teneur en CO et CO2 de ces fumées,
- pressions différentielle et absolue et température au venturi,
- hauteur de lance et débit d'oxygène.

Pour chaque scrutation, ont été calculés :

- le débit des fumées,
- la vitesse de décarburation par la relation [1] ,
- la teneur totale en oxyde de carbone et en anhydride carbonique des fumées : $GAZ = CO + CO2$

La figure 2 donne un exemple d'évolutions comparées de la vitesse de décarburation et de la température des fumées.

+ +

+

6. CONTROLE STATISTIQUE DE LA CORRELATION ENTRE
VC ET TH

Les droites de régression $VC = f (TH)$ ont été calculées pour chaque phase enregistrée. Les résultats sont consignés au tableau 1. Seuls les points où GAZ est compris entre 4 et 16 % ont été retenus.

Ces résultats indiquent :

- une bonne corrélation entre ces deux grandeurs (voir les coefficients de corrélation),
- mais un écart-type résiduel (σ) non négligeable des paramètres de la droite de régression;
- de plus, ces paramètres diffèrent d'une phase à l'autre.

Dans ces conditions, l'utilisation d'une relation linéaire unique entre VC et TH est à exclure. Il est indispensable de développer une technique de calcul permettant de calibrer continûment TH à l'aide des indications des analyseurs. Cette technique doit être conçue de façon à réduire, autant que possible, la dispersion résiduelle observée.

+ +

+

TABLEAU 1 : CORRELATION LINEAIRE ENTRE VC ET TH :

$$VC = B * TH + C$$

Phase 1

Numéro de coulée	Coefficient de corrél.	B	C	Moy. (kgC/min)	σ
1	0.92	0.37	- 3.0	166	18.0
2	0.92	0.40	- 6.2	169	21.3
3(O)	0.97	0.49	- 47.3	182	13.0
4	0.91	0.38	2.0	207	16.9
5	0.92	0.39	- 6.4	181	22.4
6	0.94	0.43	- 27.4	179	18.6
7	0.96	0.39	- 9.1	168	17.8
8	0.96	0.41	- 27.9	185	14.9
9	0.96	0.45	- 38.5	193	20.0
10	0.95	0.39	- 30.4	210	20.1

(O) Phase partiellement loggée

Phase 3

Numéro de coulée	Coefficient de corrél.	B	C	Moy. (kgC/min)	σ
1	0.96	0.61	- 62.4	137	14.7
2	0.97	0.59	- 58.8	105	16.2
3	0.91	0.56	- 60.3	159	36.8
4	0.97	0.55	- 58.6	164	15.1
5	0.87	0.53	- 50.4	82	13.4
6(*)	-	-	-	-	-
7	0.96	0.59	- 70.6	114	12.5
8(*)	-	-	-	-	-
9	0.91	0.47	- 41.7	135	15.9
10	0.94	0.72	-113.3	116	15.8

(*) Phase non loggée

7. PRINCIPE DE L'ETALONNAGE CONTINU DE LA TEMPERATURE
DES FUMÉES.

Au temps $t = nT$, la valeur estimée de VC, $\hat{V}C$, est calculée par la relation :

$$\hat{V}C(nT) = VC(nT - Td) + \frac{THP(nT) - THP(nT - Td)}{PTVC} \quad [2]$$

où T = période de scrutation,

n = nème scrutation depuis le début de la phase considérée,

Td = délai pur entre les indications du thermocouple et des analyseurs,

$\hat{V}C(nT)$ = valeur estimée de la vitesse de décarburation au temps $t = nT$,

VC(nT) = valeur calculée par [1] de la vitesse de décarburation au temps $t = nT$,

THP(nT) = température des fumées indiquée par le thermocouple et ayant subi l'amortissement et le décalage existant entre les indications du thermocouple et des analyseurs,

PTVC = pente de la relation linéaire existant entre VC et TH ; cette grandeur correspond au terme $(\frac{1}{B})$ du tableau 1.

Dans cette relation, tous les termes peuvent être mesurés ou calculés en temps réel, à l'exception de PTVC dont la valeur n'est pas connue "a priori". Pour les coulées dont les résultats sont décrits dans ce rapport, PTVC a été pris égal à :

2.35 pour toutes les phases 1,
1.75 pour toutes les phases 3.

En adoptant des valeurs légèrement différentes, les résultats sont sensiblement les mêmes ; il en résulte que la qualité des résultats n'est guère altérée ou améliorée quand PTVC varie autour de ces valeurs.

Pour les coulées qui, ultérieurement, seront suivies en temps réel, il faudra choisir l'une des trois politiques suivantes :

- garder une pente constante de coulée à coulée,
- adopter la pente obtenue par le calcul de régression effectué sur les données de la coulée précédente,
- adopter une pente variable résultant d'une moyenne évolutive effectuée sur plusieurs des coulées précédentes.

Ce choix se fera sur la base des résultats d'un nombre plus élevé de coulées. Toutefois, le fait que, pour les coulées dépouillées, la valeur à adopter ne soit pas trop critique, indique que ce choix ne devrait pas être un problème difficile.

L'étalonnage continu qui vient d'être décrit est également complété d'une correction du deuxième ordre appelée compensation des écarts. Elle a pour but de tenir compte des dérives à court terme - de l'ordre de Td - qui affectent la relation : $\hat{V}C = f(TH, t)$, lors de fortes fluctuations de la vitesse de décarburation. Comme le montrent les résultats cités au paragraphe suivant, cette compensation permet d'améliorer légèrement les résultats.

Ultérieurement et si nécessaire, l'étalonnage décrit ci-devant sera complété de modifications systématiques de la pente, lors de perturbations extérieures connues et dont un effet significatif et reproductible aurait été mis en évidence par voie statistique. L'intérêt de telles modifications ne peut être mis en évidence que sur la base du dépouillement d'un plus grand nombre de données.

+ +

+

8. RESULTATS OBTENUS AVEC L'ETALONNAGE CONTINU
DU THERMOCOUPLE.

La qualité de l'estimation de la vitesse de décarburation, à l'aide du thermocouple étalonné comme décrit en 7, a été caractérisée par le pourcentage de points loggés pendant le soufflage pour lesquels la différence ($VC - \hat{VC}$) est supérieure à 25 kgC/min. Ces résultats sont donnés au tableau 2.

Pour chaque phase étudiée, en plus du nombre de points, trois pourcentages sont cités :

Pourcentage I : celui obtenu avec l'étalonnage continu,

Pourcentage II : celui obtenu avec l'étalonnage continu et
 la compensation des écarts,

Pourcentage III : celui obtenu avec l'étalonnage continu (comme
 I), mais en excluant les points qui provo-
 quent la compensation des écarts.

Ces trois résultats ont chacun une signification propre. En effet, le premier et le deuxième pourcentages se rapportent à l'ensemble des points loggés et indiquent les résultats de l'estimation en utilisant des méthodes statistiques d'étalonnage plus ou moins complexes. Le troisième pourcentage exclut pratiquement les quelques points se rapportant à des conditions très particulières de soufflage, où l'estimation de la décarburation par la température s'avère être également la moins bonne.

C'est le cas notamment lors de l'addition massive et rapide d'une addition très riche en oxygène, lors d'un allumage difficile provoquant une très forte oxydation de la scorie, lors d'une forte variation de l'allure du soufflage. Ces phénomènes donnent lieu généralement à de très fortes -encore que courtes - accélérations de la décarburation. Dans ce cas, la combustion est souvent incomplète au niveau du thermocouple ou bien la gamme normale de l'analyseur CO₂ est dépassée. Etant donné que ces points correspondent à des circonstances exceptionnelles qu'un soufflage plus régulier devrait par ailleurs espacer, le troisième pourcentage donne également une information intéressante sur la qualité de l'estimation réalisée.

Enfin, il faut noter que, lors de ces périodes particulières de soufflage, la relation entre l'indication du thermocouple et celle des analyseurs reste qualitativement variable : ainsi, une forte décarburation accompagnée d'une combustion incomplète se traduit par un accroissement de la température des fumées ; par contre, l'estimation est quantitativement moins bonne.

Les évolutions comparées de VC et de $\hat{V}C$ au cours d'une première phase sont présentées, à titre d'exemple, à la figure 3.

+ +

+

TABLEAU 2 : POURCENTAGE DE POINTS CALCULES, POUR LESQUELS

$$|VC - \hat{VC}| > 25 \text{ kgC/min.}$$

Phase 1

Numéro de coulée	Nombre de points	Pourcentages		
		1	2	3
1	376	11.0	10.5	8.5
2	389	9.0	9.0	7.0
3(0)	194	5.0	5.0	5.0
4	299	13.5	13.0	6.5
5	395	10.5	10.0	8.5
6	338	10.0	10.0	6.0
7	350	5.5	5.0	5.0
8	296	7.0	7.0	6.5
9	300	13.0	13.0	8.5
10	297	10.0	10.0	9.0

(0) Phase partiellement loggée

Phase 3

Numéro de coulée	Nombre de points	Pourcentages		
		1	2	3
1	131	8.0	3.5	1.5
2	140	10.5	9.0	5.5
3	138	21.0	20.0	8.0
4	142	16.0	15.0	9.5
5	115	8.0	7.5	7.0
6 (*)	-	-	-	-
7	119	7.5	5.0	3.5
8 (*)	-	-	-	-
9	115	16.0	13.0	9.5
10	160	10.0	10.0	7.0

(*) Phase non loggée

9. EVOLUTION DYNAMIQUE DE LA MESURE DE LA
TEMPERATURE DES FUMÉES.

L'intérêt d'une estimation de la décarburation par un capteur auxiliaire est d'autant plus grand que ce capteur fournit une réponse plus rapide aux actions qui le sollicitent.

Les évolutions temporelles des indications des analyseurs de gaz, de la hauteur de lance et du débit d'oxygène sont comparées en (3). Grâce à des techniques de filtrage analogues à celles décrites dans ce rapport, il a été établi que le thermocouple est influencé, avec un délai de l'ordre de 3 secondes, par un phénomène se produisant au bec.

De plus, au cours des deux journées d'essais, aucun garnissage n'est apparu sur la tête de mesure. Par contre, la réponse dynamique des analyseurs s'est légèrement et régulièrement modifiée au cours de la seconde journée d'essais ; ceci provenait certainement d'une modification de la perte de charge dans le circuit de prélèvement et de conditionnement des échantillons. Une adaptation de la relation temporelle entre les indications du thermocouple et des analyseurs a pu être réalisée, vu la progressivité de la modification observée. Une adaptation identique peut évidemment être également réalisée dans le cas d'une application en temps réel.

+ +

+

10. CONCLUSIONS RELATIVES AU DEPOUILLEMENT.

- 10.1. Les résultats en 6 indiquent une évidente corrélation entre les indications du thermocouple et des analyseurs des fumées. La nécessité d'un calibrage du premier par les seconds a été établie. Une technique d'étalonnage continu est proposée en 7.
- 10.2. Les résultats cités en 8 montrent qu'une estimation satisfaisante de la vitesse de décarburation peut être obtenue, pendant la plus grande partie du soufflage, à l'aide d'une mesure de la température des fumées. Pendant de courtes périodes, correspondant le plus souvent à de très fortes décarburations, l'estimation reste, sinon quantitativement, du moins qualitativement valable.
- 10.3. Le thermocouple est influencé par les phénomènes se produisant au bec avec un retard de l'ordre de 3 secondes.

+ +

+

11. PERSPECTIVES

Sont décrits ci-dessous :

- les possibilités d'exploitation de l'estimation de la décarburation par thermocouple,
- les développements nécessaires à sa mise en oeuvre.

11.1. Exploitation pratique de l'indication du thermocouple

11.1.1. Dans un premier stade et indépendamment de toute autre réalisation, la vitesse de décarburation estimée par mesure de la température des fumées est à afficher devant l'opérateur. Celui-ci disposera, continûment et avec un faible retard vis-à-vis de l'observation visuelle de la flamme, de cette intéressante variable de sortie.

11.1.2. Dans le cadre ultérieur d'une marche en guide opérateur, où une évolution de la vitesse de décarburation serait proposée comme consigne, l'opérateur disposerait en permanence des deux courbes de décarburation : la trajectoire de référence et la valeur estimée.

11.1.3. Dans le cadre d'une éventuelle marche en boucle fermée sur la vitesse de décarburation, la valeur estimée par thermocouple servirait de grandeur à réguler, de manière à améliorer la gouvernabilité de la régulation.

11.2. Travaux à exécuter

Le passage à une réalisation industrielle implique divers travaux, dont les principaux sont cités ici :

11.2.1. Capteurs de mesure

- Essayer divers types de cannes à thermocouple et faire un choix en fonction de la fiabilité obtenue; suivant l'importance des temps de fonctionnement obtenus, rechercher une méthode simple et éventuel-

lement mécanisée de remplacement du couple.

- Dans le même temps, déterminer l'influence des poussières, qui "chargent" le couple, sur le temps de réponse de ce dernier (ceci peut également constituer un critère de remplacement du couple).
- Maintenir en état opérationnel les autres capteurs de mesure utilisés lors de l'étalonnage continu.

11.2.2. Software de conduite

- Analyse et écriture des programmes de scrutation, d'estimation en temps réel de la décarburation par thermocouple et de filtrage adaptatif à exécuter entre phases en vue de préciser les relations temporelles et statistiques existant entre les signaux du thermocouple et des analyseurs.
- Préciser une politique de choix d'une pente PTVC (voir 7).

11.2.3. Hardware de support

- Réaliser le display pour l'opérateur.
- Connexion des capteurs au calculateur de l'aciérie.

RESUME ET CONCLUSIONS.

Le calcul de la vitesse de décarburation sur base des indications des analyseurs de gaz comporte un important délai résultant du transfert des fumées entre le convertisseur et les analyseurs.

Un thermocouple placé dans la hotte et dont les indications sont continuellement étalonnées à l'aide des analyseurs de gaz permet d'estimer la vitesse de décarburation plus rapidement et avec une précision satisfaisante.

Cette estimation peut être fournie en continu à l'opérateur au cours du soufflage. Elle permet également une amélioration de la gouvernabilité de la conversion, lors d'une marche automatisée.

+ +

+

REFERENCES

1. Brevet belge n° 712 694
MULLER F., SHEWRING D.,
"Contrôle des procédés LD et LD-AC",
Rapport C.R.M. DS.75/61.

DENIS E.,
"Relations entre le signal de visée de flamme et la
vitesse de décarburation au procédé LD-AC"
Rapport C.R.M., DS.25/71.
2. NILLES P., DENIS E., NOEL Y., HOLPER R., LUCKERS J.,
STOLZ C., VAN DEN HOVE C.,
"Automatic control of the blow of two 180 t LD con-
verters at Cockerill-Ougrée-Providence",
Metallurgical Reports, n° 15, June 1968.

NILLES P., DENIS E., MERKER F., DAUBY P.,
"Le contrôle de l'affinage au procédé LD",
Journées Internationales de Sidérurgie - Luxembourg
1970.
3. VOLL H.,
"Comportement dynamique du convertisseur 1 de l'acié-
rie LD-AC de Chertal (COCKERILL)"
Rapport C.R.M. - S 28/72

+ +

+

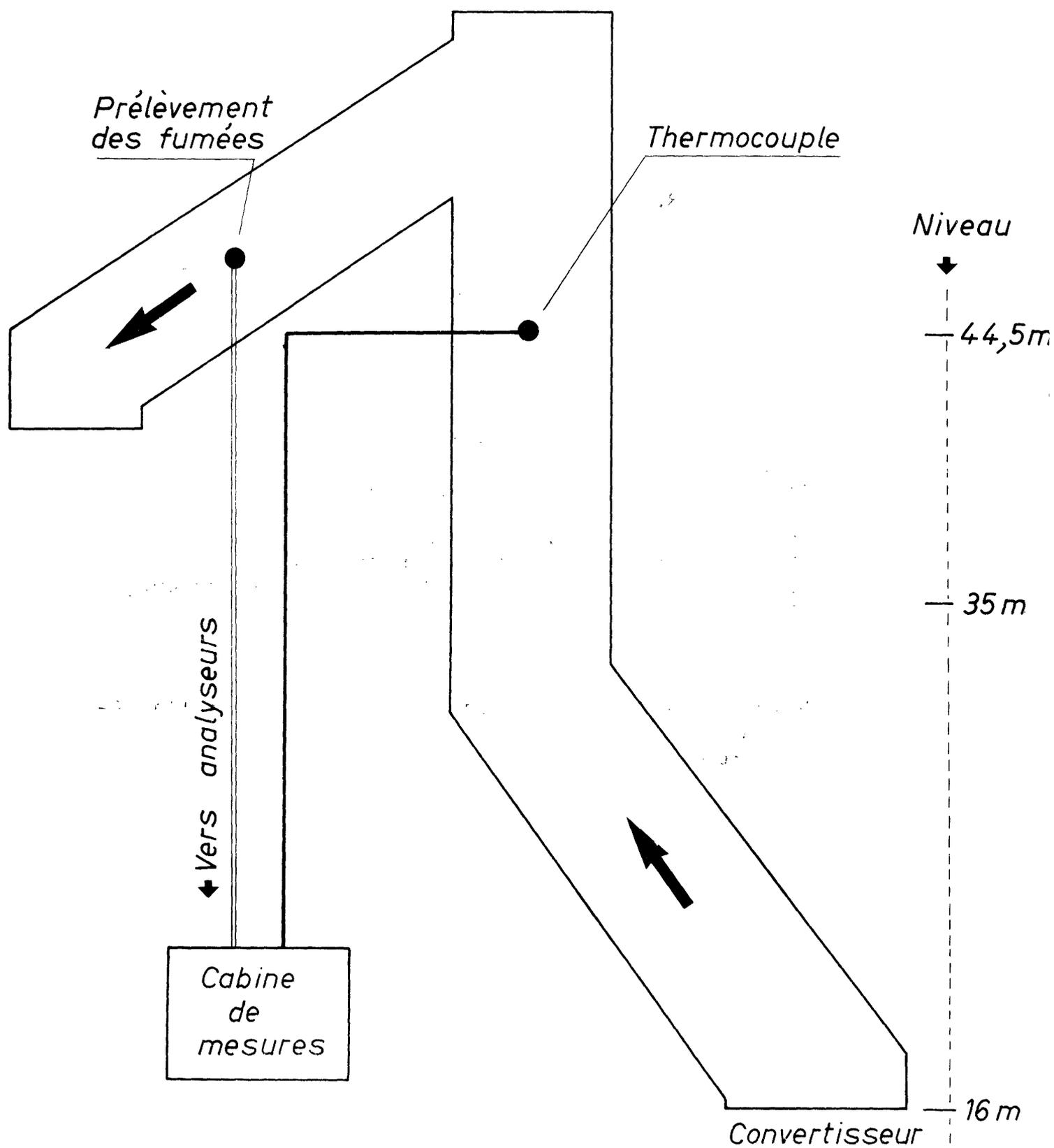


Fig.1 - Schéma d'implantation

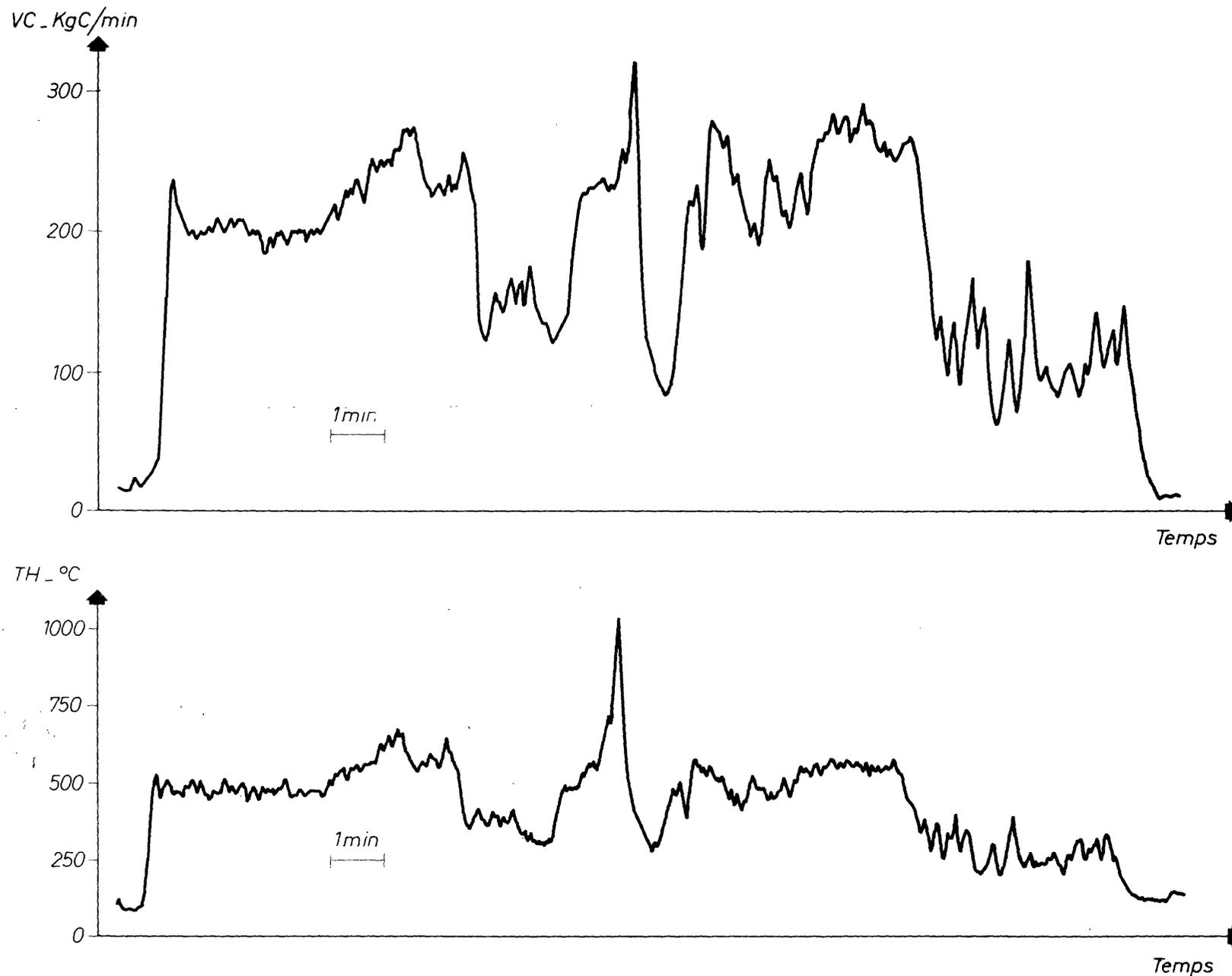


Fig.2 - Evolutions de la vitesse de décarburation (VC) et de la température des fumées (TH) au cours du soufflage

La figure représente le soufflage d'une phase 1. A remarquer le décalage temporel entre les 2 grandeurs

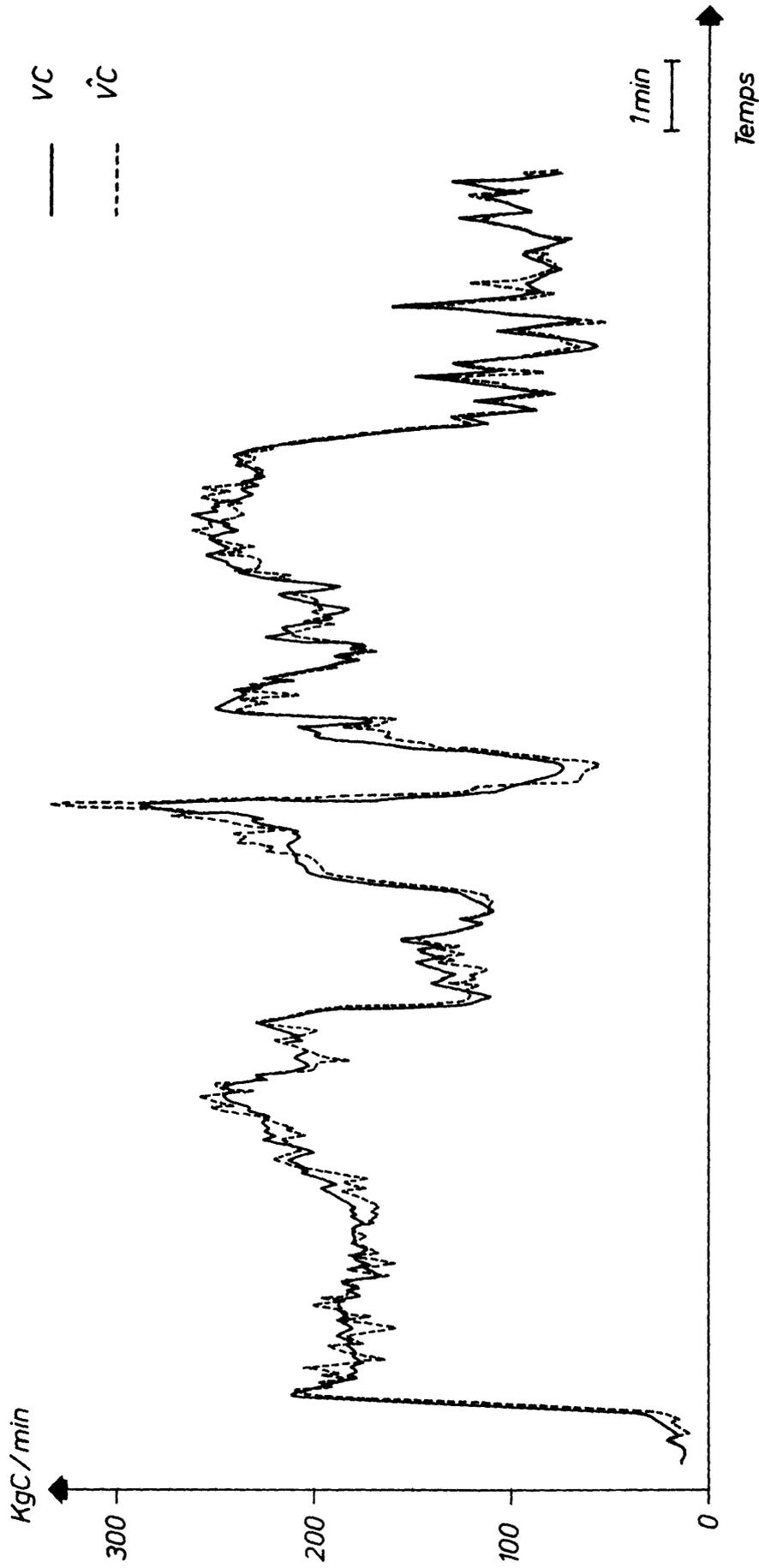


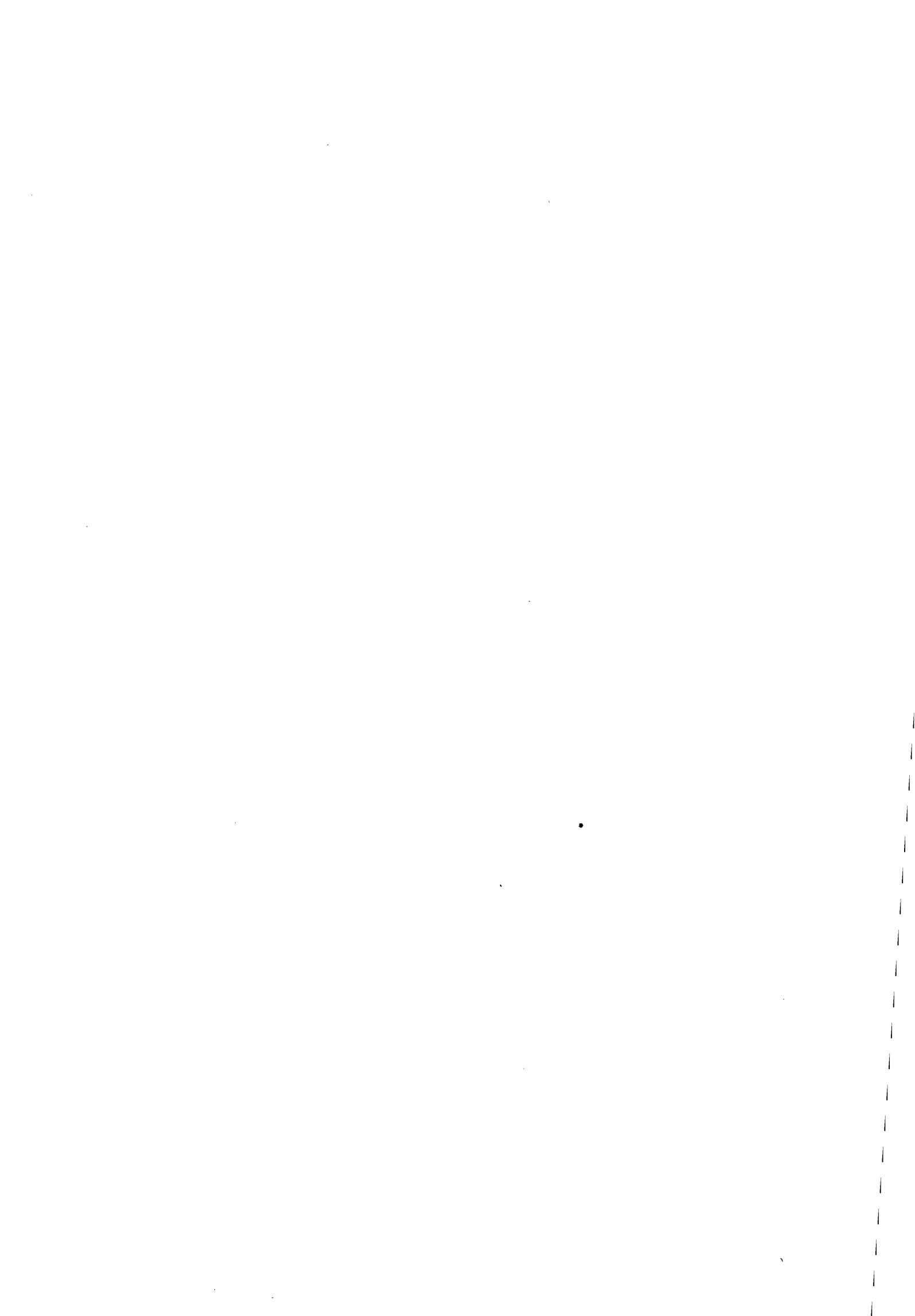
Fig. 3 – Comparaison de la vitesse de décarburation déterminée par analyse des fumées (VC) et de la vitesse de décarburation estimée à partir d'une mesure de température ($\hat{V}C$).

AFFINAGE DES FONTES PHOSPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU CONVERTISSEUR 1
DE L'ACIERIE LD-AC DE CHERTAL (COCKERILL)

par

H. VOLL



COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU CONVERTISSEUR 1
DE L'ACIERIE LD-AC DE CHERTAL (COCKERILL)

par

H. VOLL,
Ingénieur au C.R.M.

SOMMAIRE

1.	<u>INTERET DES ESSAIS DE PERTURBATIONS POUR L'ETUDE DU PROCESSUS</u>	182
2.	<u>DESCRIPTION DES ESSAIS</u>	183
	2.1. Implantation des capteurs utilisés	183
	2.2. Conduite des essais	184
3.	<u>TRAITEMENT DES DONNEES</u>	185
4.	<u>RESULTATS DU DEPOUILLEMENT DES ESSAIS</u>	187
	4.1. Classification des résultats	187
	4.2. Remarques concernant la validité des résultats	187
	4.3. Evolution des gains statiques	189
	4.4. Evolution temporelle de la vitesse de décarburation	189
	4.5. Conclusions relatives aux résultats précédents	191
	4.6. Influences secondaires	192
	4.7. Influence de la scorie	192
5.	<u>EXPLOITATION DES RESULTATS DES ESSAIS</u>	195
	<u>RESUME ET CONCLUSIONS</u>	196
	Références	197
	Figures (8)	198
	à	205

1. INTERET DES ESSAIS DE PERTURBATIONS POUR L'ETUDE DU PROCES-
SUS

Le contrôle d'un processus comporte habituellement deux étapes principales :

- l'identification du processus ou l'étude de son comportement : celle-ci permet d'aboutir à une connaissance strictement qualitative ou à une description plus ou moins complète par un modèle;
dans ce dernier cas, les équations mettent en évidence le comportement physique du procédé ou font appel à certaines caractéristiques observées statistiquement;
- la conduite du processus : sa conception et sa réalisation sont en relation directe avec les résultats obtenus lors de l'identification.

Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs ont tenté d'élaborer des modèles déterministiques du fonctionnement du convertisseur, basés sur une description physico-chimique des réactions dont il est le siège (1). Une des principales difficultés rencontrées en abordant ainsi le problème provient du caractère partiellement stochastique du processus. Une seconde raison est une connaissance très partielle du comportement dynamique du convertisseur, sous l'action de perturbations extérieures connues. Les essais de perturbations décrits ci-après apportent une contribution à cet aspect du problème. Les résultats obtenus par ces essais ont évidemment une incidence directe sur le mode de conduite à adopter.

+

+

+

2. DESCRIPTION DES ESSAIS

2.1. Implantation des capteurs utilisés

Un data-logger, installé dans une cabine de centralisation de mesures, a scruté, avec une période de 3 secondes, une série de capteurs dont l'implantation est représentée à la figure 1 et dont la liste est la suivante :

Désignation	Signification	Unités
QO2	Débit d'oxygène à la lance	Nm3/min
HL	Hauteur de la lance	cm
CO	Volume de CO dans les fumées	%
CO2	Volume de CO2 dans les fumées	%
O2	Volume d'O2 dans les fumées	%
QF	Débit des fumées	Nm3/min
WB	Poids de chaux fine injectée	kg
W1, 2, 3	Poids d'autres additions	kg

Le débit des fumées est calculé à partir de mesures de pression différentielle, de pression absolue et de température faites au venturi. La vitesse de décarburation VC est calculée par la relation :

$$VC = K \cdot QF \cdot \left(\frac{CO + CO2}{100} \right)$$

où $K = \frac{1}{1.864}$ kgC/Nm3.

Cette valeur de VC est donc calculée à partir de la mesure de la composition des fumées et de leur débit.

2.2. Conduite des essais

Trois campagnes de perturbations ont été enregistrées. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Numéro	Date	Nombre de coulées	Perturbations
1	Juin 71	12	Forcées
2	Juillet 71	30	Naturelles
3	Octobre 71	10	Forcées

Au cours des campagnes 1 et 3 (perturbations forcées), l'opérateur maintenait constants Q02 et HL pendant 2 minutes, puis il modifiait volontairement l'une de ces deux grandeurs. Ce nouvel état était maintenu pendant une nouvelle période de deux minutes, puis une nouvelle variation était produite. Vu l'incidence de telles opérations sur le déroulement du soufflage, l'opérateur avait le libre choix de la grandeur à modifier, de l'amplitude et du sens de sa variation. De plus, s'il estimait toute modification des grandeurs d'action défavorable, la variation était postposée; grâce à ces précautions, les essais n'ont pas provoqué de débordements, ni altéré la marche du convertisseur.

Au cours de la campagne n° 2, aucune perturbation systématique n'a été effectuée. Toutefois, des modifications simultanées de plusieurs grandeurs d'action ont été évitées, en vue de faciliter le dépouillement.

+

+

+

3. TRAITEMENT DES DONNEES

Les données subissent tout d'abord un traitement préalable consistant en un contrôle de validité, une conversion en unités physiques et un rangement en mémoire de masse de l'ordinateur où sont effectuées toutes les opérations de calcul (fig. 2).

Ensuite des bilans (carbone et oxygène) sont effectués à partir de la composition des fumées. La vitesse de décarburation et la répartition de l'oxygène soufflé en sont déduits.

A ce stade commence le dépouillement proprement-dit des essais de perturbations. Après avoir sélectionné un type de fonction de transfert et un set de données où apparaissent une ou plusieurs perturbations, une adaptation automatique de la fonction de transfert est réalisée; les coefficients retenus sont ceux conduisant à la minimalisation du carré moyen de l'écart existant entre la vitesse de décarburation calculée à partir des indications des analyseurs de gaz et la sortie du filtre représentant la fonction de transfert (fig. 3).

Parmi les 5 types de filtres utilisés pour traiter les données, deux ont été retenus sur la base des résultats obtenus, à savoir :

- le filtre du premier ordre, dénommé dorénavant F 1,
- un ensemble de deux filtres du premier ordre, en structure parallèle, dénommé F 2.

Leur expression fréquentielle et l'allure de leur réponse temporelle sont indiquées à la fig. 4; la fig. 5 montre, à titre d'exemple, comment les résultats apparaissent sur le diagramme d'un traceur de courbes digital.

Afin de réduire l'incidence du choix préalable d'une trajectoire de référence de VC sur les résultats obtenus, une technique d'apprentissage basée sur un principe similaire, mais en utilisant, comme données, les valeurs relatives des grandeurs d'action est également utilisée. Cette seconde méthode sert principalement de contrôle de la première, car elle permet de prendre en considération des périodes de soufflage où HL et Q02 varient tous deux.

Après l'obtention de l'ensemble des résultats se rapportant à une même période de soufflage (voir 4.1.), une exploitation finale de ceux-ci consiste à choisir une fonction de transfert s'adaptant au mieux à l'ensemble des cas traités.

+

+

+

4. RESULTATS DU DEPOUILLEMENT DES ESSAIS

4.1. Classification des résultats

Les résultats ont été regroupés en quatre périodes, de façon à tenir compte, dans une certaine mesure, de l'état du bain et du niveau des actions, au moment où se produisent les perturbations. La fig. 6 montre comment s'est effectué ce découpage.

4.2. Remarques conditionnant la validité des résultats

Certaines remarques préalables à la présentation des résultats doivent être faites quant à l'observabilité des grandeurs considérées, à la non-stationnarité du processus et à la non-linéarité des effets des grandeurs d'action.

4.2.1. Observabilité des grandeurs

Les 3 grandeurs principalement utilisées ici sont le débit d'oxygène, la hauteur de lance et la vitesse de décarburation. La mesure du débit d'oxygène n'offre pas de difficulté particulière. La précision de la mesure de la hauteur de la lance vis-à-vis du bain est limitée par la connaissance de l'usage du revêtement et la fréquence des pigeages réalisés en cours de campagne. Le calcul de VC utilise les indications des analyseurs de gaz et le débit des fumées calculé par des mesures faites sur un venturi placé dans la cheminée. Les performances obtenues sont décrites ailleurs (2). Des observations consignées dans ce rapport et d'autres essais effectués ultérieurement indiquent que la mesure du débit des fumées humides donne lieu à des réserves dues à la nature du dépoussièrage.

4.2.2. Non-stationnarité du processus de conversion

Cette caractéristique du comportement du bain est l'une des sources des difficultés rencontrées dans les études effectuées sur les convertisseurs à oxygène. Elle nécessite le développement de modèles cohérents de la conversion destinés à préciser l'évolution des trajectoires des grandeurs à régler. Les essais de perturbations ne se substituent donc pas à ces études de modèles, mais les complètent, en donnant des indications à court terme (0 à 2 minutes) sur le comportement probable du convertisseur lors d'une modification d'une grandeur d'action. Ceci justifie, d'une part, la fréquence de reproduction des perturbations forcées qui a été adoptée et indique, d'autre part, la validité dans le temps des résultats obtenus. C'est le rôle du modèle de préciser la trajectoire de référence autour de laquelle des modifications plus ou moins considérables sont apportées en changeant les grandeurs d'action.

4.2.3. Non-linéarité des effets des grandeurs d'action

Des modifications d'une grandeur d'action effectuées autour de niveaux différents ou avec des états de bain-scorie différents doivent conduire à des résultats différents. Par contre, au cours d'une période déterminée (voir 4.1.), les gammes de variation habituelles des grandeurs d'action sont sensiblement les mêmes et les écarts de comportement du bain et de la scorie plus réduits. Aussi, dans ces conditions, l'hypothèse de linéarité peut-elle être mieux acceptée. Ceci constitue, par ailleurs, une justification nécessaire de la division du soufflage en plusieurs périodes.

4.3. Evolution des gains statiques

Le gain statique est ici défini par le rapport entre une variation de VC et la variation correspondante de HL ou de QO2, lorsque le régime est atteint.

La fig. 7 montre, pour chaque période du soufflage, les valeurs moyennes obtenues pour ces gains et la dispersion des résultats. Le nombre de cas dépouillés est également précisé. Les résultats obtenus pour la période 1 avec HL et pour la période 4 avec HL et QO2 sont donnés sous réserve, compte tenu du petit nombre d'essais et de la dispersion élevée observée.

4.4. Evolution temporelle de la vitesse de décarburation

Les résultats cités en 4.3. indiquent seulement l'importance de l'effet final observé, après une variation de HL ou de QO2.

Le tableau I précise quelle est l'évolution temporelle habituelle de la vitesse de décarburation, suite à une modification du débit d'oxygène ou de la hauteur de la lance. Les paramètres des meilleures fonctions de transfert retenues y sont listés. L'allure de ces fonctions de transfert a déjà été précisée au paragraphe 3 et à la fig. 4.

Pour la période 3, les cas où le débit d'oxygène croît (↗) et ceux où il décroît (↘) sont dissociés, car ils conduisent à des résultats quelque peu différents.

Enfin, le "degré de confiance", qui peut être associé à ces diverses valeurs, est précisé; il est d'autant meilleur qu'à la fois, le nombre de cas traités est plus grand et la dispersion des réponses plus faible.

TABLEAU I

PARAMETRES DES FONCTIONS DE TRANSFERT

$\Delta QO2 \rightarrow \Delta VC, \Delta HL \rightarrow \Delta VC$

Relation	Période	Nombre de cas	Type de filtre	Sens de la variation	Paramètres						Qualité de la solution
					K	Td	τ	K'	Td'	τ'	
QO2 - VC	1	5	1	↗ et ↘	0.70	19	5				bonne
	2	5	2	↗ et ↘	0.97	18	11	- 0.12	40	2	bonne
	3	7	2	↘ ↗	1.85	20	5	- 0.28	45	3	bonne
					1.85	20	5	- 0.44	45	3	bonne
4	3	1	↗ et ↘	0.40	20	12				faible	
HL - VC	1	2	1	↗ et ↘	- 0.80	19	5				moyenne
	2	14	2	↗ et ↘	- 1.23	20	11	0.38	49	3	bonne
	3	7	2	↗ et ↘	- 2.13	21	6	0.43	42	3	bonne
	4	4	1	↗ et ↘	- 0.50	20	12				faible

Unités : QO2 m3/min
 HL cm
 VC KgC/min

K, K' kgC/mn/m3/min ou kgC/min/cm
 Td, Td' secondes
 τ, τ' secondes

4.5. Conclusions relatives aux résultats précédents

4.5.1.

Le choix de fonctions de transfert de formes simples est dû à la nature des perturbations réalisées. Ce sont des variations en échelons dont l'analyse est gênée par les bruits du processus. Le choix de cette méthode d'essais est néanmoins justifié par sa mise en oeuvre aisée et parce qu'elle s'accommode de la non-stationnarité du processus.

4.5.2.

L'effet premier des grandeurs d'action sur le convertisseur est quasi-immédiat (délai de 0 à 3 secondes); les valeurs de T_d sont, en effet, à mettre en parallèle avec les résultats d'essais d'injection d'oxygène décrits en (2).

4.5.3.

La mise en évidence d'une réponse de type inverse (filtre F 2) pendant les périodes 2 et 3, qui sont celles où l'émulsification du bain est la plus importante, est conforme à l'idée suivant laquelle, une fois perturbé, un convertisseur serait soumis à des oscillations amorties, qui tendent à le ramener à un nouvel état stable et dont la première oscillation serait mise en évidence par la forme de réponse retenue. Ainsi, par exemple si, après une période de maintien à un niveau donné, la lance est relevée, les caractéristiques du jet se modifient et la décarburation directe décroît. L'oxygène se porte davantage sur la scorie, accroît la vitesse de formation d'oxyde de fer et provoquera ultérieurement un accroissement de la décarburation à partir de l'émulsion (décarburation indirecte). A titre d'exemple, la fig. 5 montre l'amélioration apportée par l'emploi d'un filtre de type F 2 plutôt que d'un filtre F 1, dans le cas de perturbations successives de HL, lors du passage de la chaux fine (période 2).

4.6. Influences secondaires

Plusieurs essais se rapportant à une même grandeur et à une même période ont été regroupés pour en déduire la meilleure fonction de transfert. Dès lors, ont été comparés des essais, où d'autres grandeurs pouvaient différer d'un essai à l'autre.

Ainsi il a été observé que :

- en périodes 2 et 3, lors d'une perturbation du débit d'oxygène, le gain statique est généralement plus élevé quand la hauteur de lance est plus faible, toutes les autres conditions étant les mêmes;
- quand la hauteur de lance est supérieure à 3 mètres, les valeurs des gains statiques chutent fortement. Ceci a été observé au cours de la période 2, où, en vue de favoriser le mousage, l'opérateur peut être amené à relever, momentanément, la lance.

4.7. Influence de la scorie

Au cours d'un même essai de perturbation, seule une grandeur d'action (HL ou QO2) a été modifiée, en évitant toute modification d'autres grandeurs. Toutefois, par la nature même du système, le comportement de la scorie joue indirectement un rôle et est une source de dispersion lors de l'examen des résultats regroupés par période.

En effet, au cours du soufflage, l'oxygène non utilisé par le carbone sert à la formation des oxydes donnant naissance à la scorie; de plus, l'oxygène accumulé dans la scorie sous forme d'oxyde de fer peut être restitué et utilisé pour provoquer un surcroît de décarburation. S'il est qualitativement simple d'expliquer de telles échanges, il est, par contre, malaisé de calculer l'état de la scorie avant la perturbation et de prévoir son évolution au cours de celle-ci.

Il est admis que globalement, ce qui rend le jet plus "mou" (réduction de QO₂, accroissement de HL) favorise l'oxydation de la scorie. Cet effet peut être différent suivant que la scorie est plus ou moins oxydée au moment de la perturbation.

A titre d'exemple, considérons des essais où se produit une variation de QO₂, au cours de la période 3. La teneur résiduelle en carbone du bain est de 0.8 à 1.15 %.

Si 1 = indice se rapportant à la valeur d'une grandeur avant la perturbation,

2 = indice se rapportant à la valeur d'une grandeur après la perturbation,

POSC = estimation du poids d'oxygène accumulé dans la scorie,

FeScorie = estimation de la teneur en fer de la scorie,

$$\Delta QO_2 = (QO_2)_2 - (QO_2)_1$$

$$\Delta VC = (VC)_2 - (VC)_1$$

les six essais de perturbation considérés ci-après présentent les caractéristiques suivantes :

Cas	HL Cm	QO ₂ Nm ³ /min	ΔQO ₂ Nm ³ /min	$\frac{\Delta VC}{\Delta QO_2}$ Nm ³ /min	POSC kg	FeScorie %	Moment en Période 3
1	114	363	- 47	1.87	5350	5.75	début
2	115	311	- 53	1.70	5600	6	milieu
3	115	310	- 52	1.37	6400	8.5	fin
4	130	353	- 95	1.35	6550	9.5	fin
5	130	310	52	1.57	6500	9	fin
6	152	355	95	1.26	5250	5.6	milieu

Les valeurs de POSC et de FeScorie sont estimées par extension des résultats obtenus en (3). Vu l'importante dispersion affectant ces résultats, on ne doit attribuer à ces estimations qu'une valeur semi-quantitative.

Pour les divers cas considérés, le soufflage est arrivé à un point tel que la quasi totalité de l'oxygène passant à la scorie forme des oxydes de fer, la formation de P₂O₅, MnO,... étant fort réduite.

De plus, les perturbations sont réalisées en présence d'une scorie dont la teneur en fer varie d'un cas à l'autre.

La figure 8 met en relation les valeurs des gains statiques, de la teneur en oxygène et en fer de la scorie. Toute variation de QO₂ entraîne une modification des caractéristiques du jet et influe sur l'émulsion; toutefois, une même variation conduit à un gain statique plus élevé lorsque la scorie est pauvre en fer. Ainsi, par exemple, lors d'une réduction de QO₂, le jet mollit et la part de l'oxygène de la lance se fixant sur la scorie croît. Ce glissement est toutefois plus marqué si, toutes choses égales, la scorie est pauvre en fer; dans ce cas, la chute de la décarburation est plus forte et les gains associés à cette perturbation sont plus grands.

+

+

+

5. EXPLOITATION DES RESULTATS DES ESSAIS

Les résultats du présent rapport peuvent être exploités comme suit :

5.1. Dans un premier stade et indépendamment de toute autre réalisation, les valeurs des gains statiques peuvent être affichées devant l'opérateur, sous une forme permettant une interprétation aisée. Par souci de simplification, seules les valeurs des gains se rapportant à la période en cours de soufflage sont à indiquer.

5.2. Dans le cadre ultérieur d'une marche en guide opérateur, l'écart entre la vitesse de décarburation réelle et sa consigne peut être automatiquement traduit en une variation conseillée de HL ou de QO2.

5.3. Dans le cadre d'une éventuelle marche en boucle fermée, ces résultats doivent servir au dimensionnement du régulateur.

+

+

+

RESUME ET CONCLUSIONS

L'influence des grandeurs d'action (hauteur de lance et débit d'oxygène) a été étudiée à partir d'essais de perturbations naturelles et forcées, réalisées au cours du soufflage.

Après une description des essais et des méthodes de dépouillement utilisées, les meilleures fonctions de transfert obtenues sont présentées. L'allure des réponses obtenues dépend de l'état d'avancement du soufflage au moment de la perturbation; elle est également influencée par l'émulsivité du bain. L'influence d'autres éléments, comme le comportement de la scorie, est discutée à la lumière des résultats obtenus.

Les possibilités d'exploitation de ces résultats en contrôle, tant manuel qu'automatique, sont également décrites. En marche manuelle, les résultats obtenus peuvent être valorisés en indiquant à l'opérateur l'évolution des gains au cours du soufflage. En contrôle automatique, ils sont nécessaires au dimensionnement du régulateur de boucle.

+

+

+

REFERENCES

1. Journées Internationales de Sidérurgie, C.N.R.M.;
Amsterdam 1965, Luxembourg 1970.

MEYER H.W., PORTER W.F., SMITH G.C. et SZEKELY J.,
"Slag metal emulsions and their importance in BOF
steelmaking"
Journal of Metals, July 1968.

NILLES P.E., DENIS E.M.,
"Problems of Oxygen transfer in BOF Steelmaking", 1969.
Journal of Metals, July 1969.
2. RAMELOT D., STOLZ C., VOLL H., BALTHAZART G.,
"Description de la station de mesure installée à
l'aciérie LD-AC de la S.A. Métallurgique d'Espérance-
Longdoz"
Rapport C.R.M. - DS 25/70.
3. DAUBY P., BOELENS J., LEROY C.,
"Enseignements tirés d'une campagne de prélèvements
d'échantillons de métal et de scorie en cours de souf-
flage LD-AC phase 1".

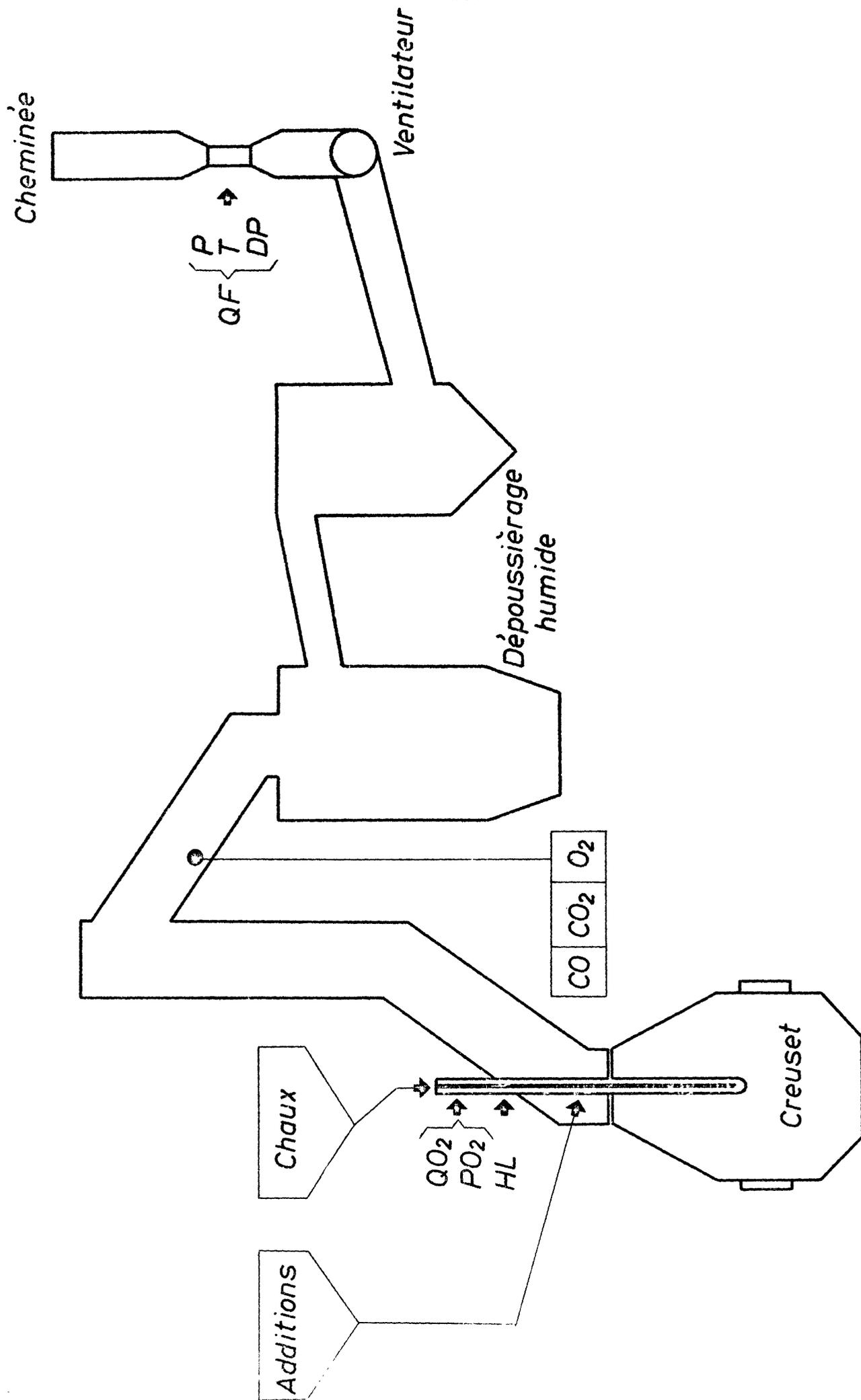


Fig.1 - Instrumentation

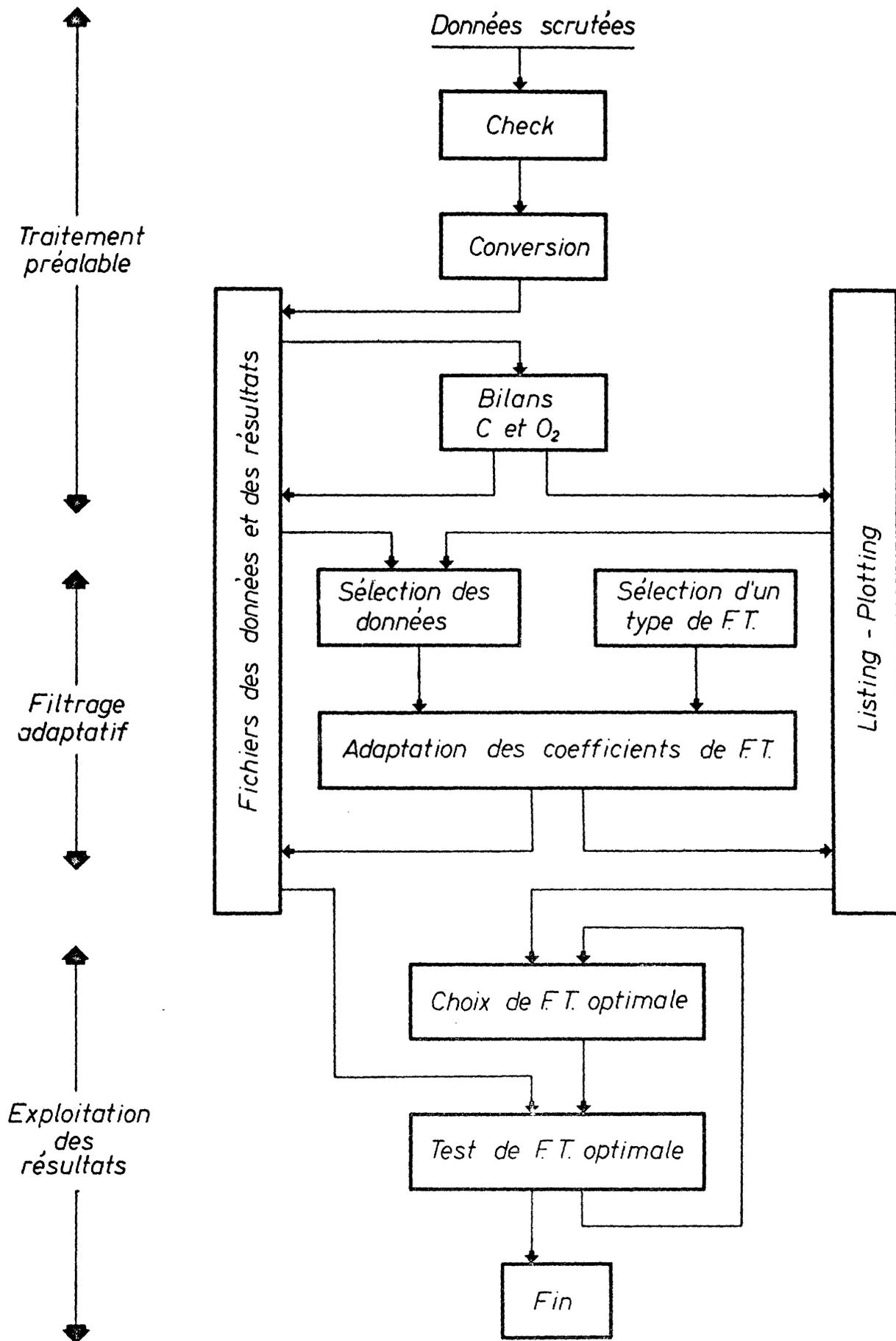


Fig.2 - Représentation schématique de la recherche des fonctions de transfert (F.T.)

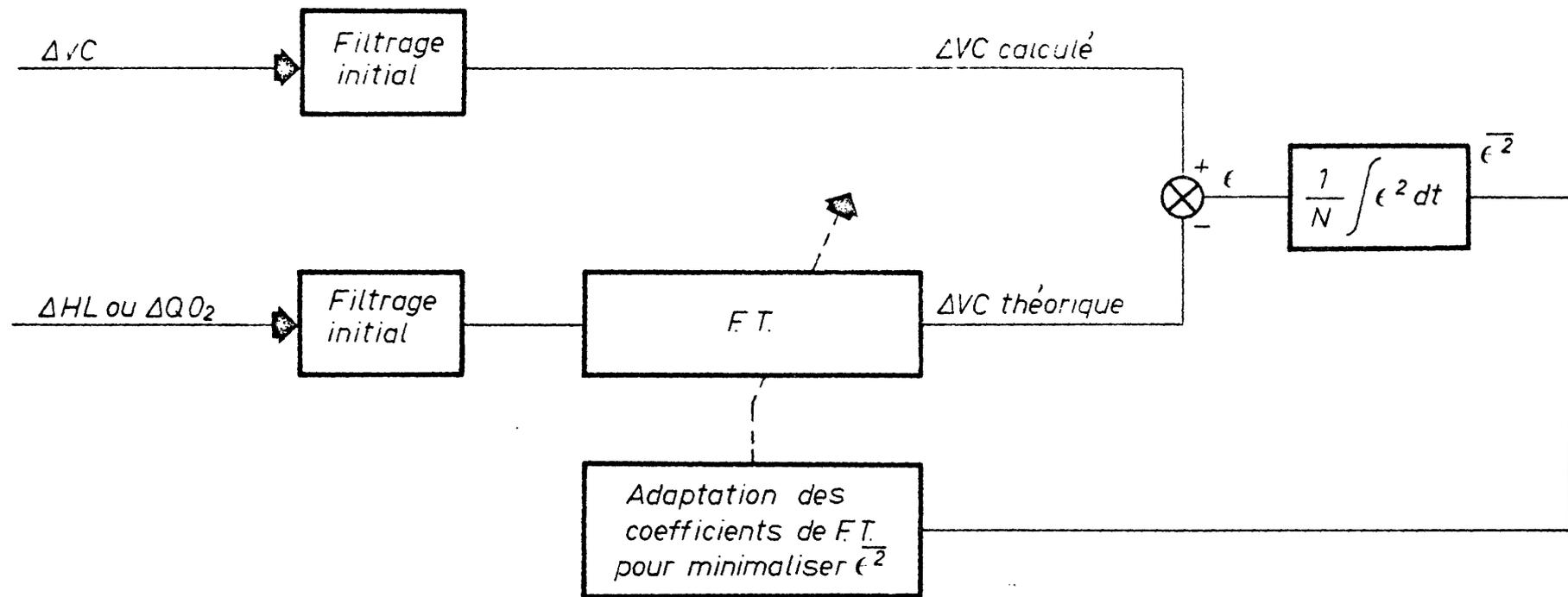
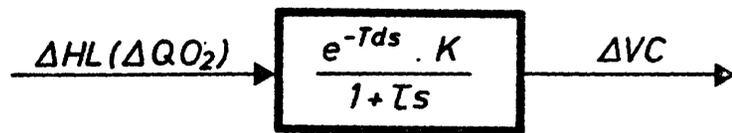
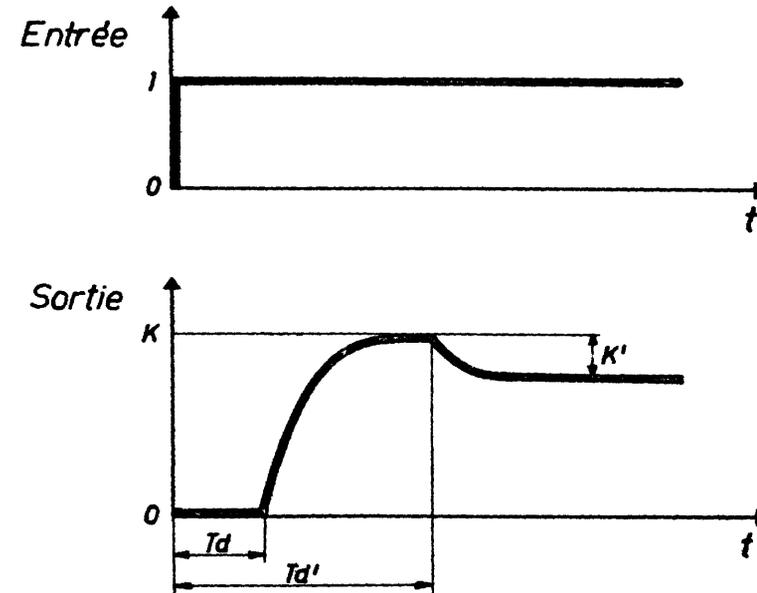
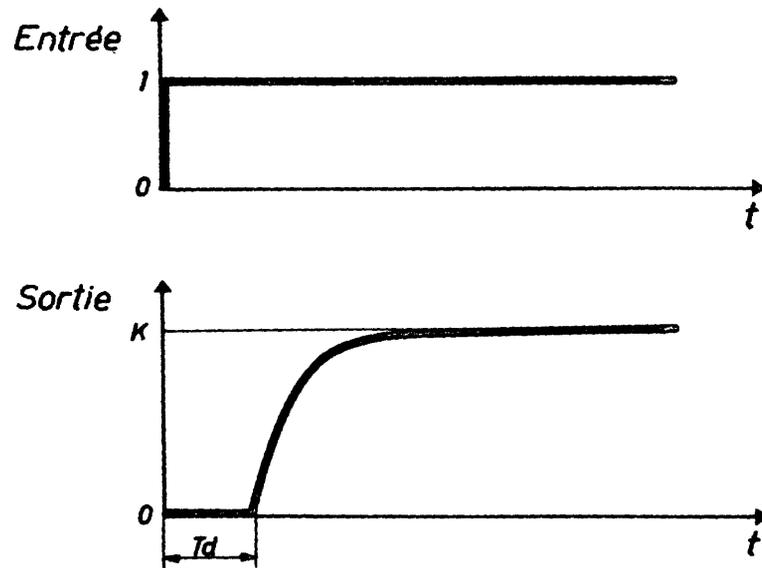
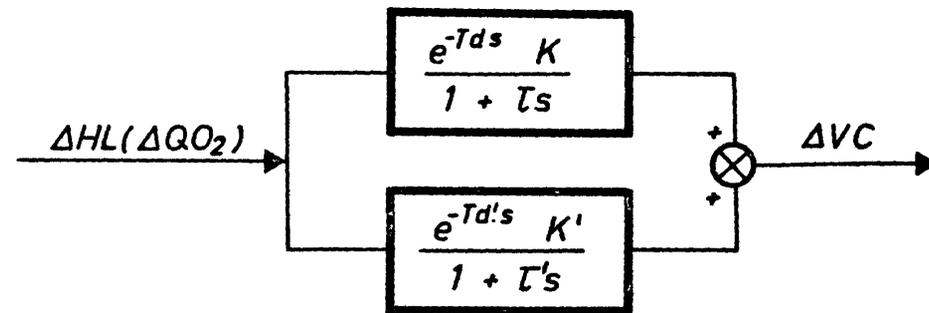


Fig.3 - Recherche de la fonction de transfert $\Delta HL(\Delta QO_2) \rightarrow \Delta VC$ par filtrage adaptatif



F1. Filtre du premier ordre



F2. Filtre donnant une réponse inverse si $KK' < 0$

Fig.4. Filtres retenus pour représenter les fonctions de transfert $\Delta HL \rightarrow \Delta VC$, $\Delta QO_2 \rightarrow \Delta VC$

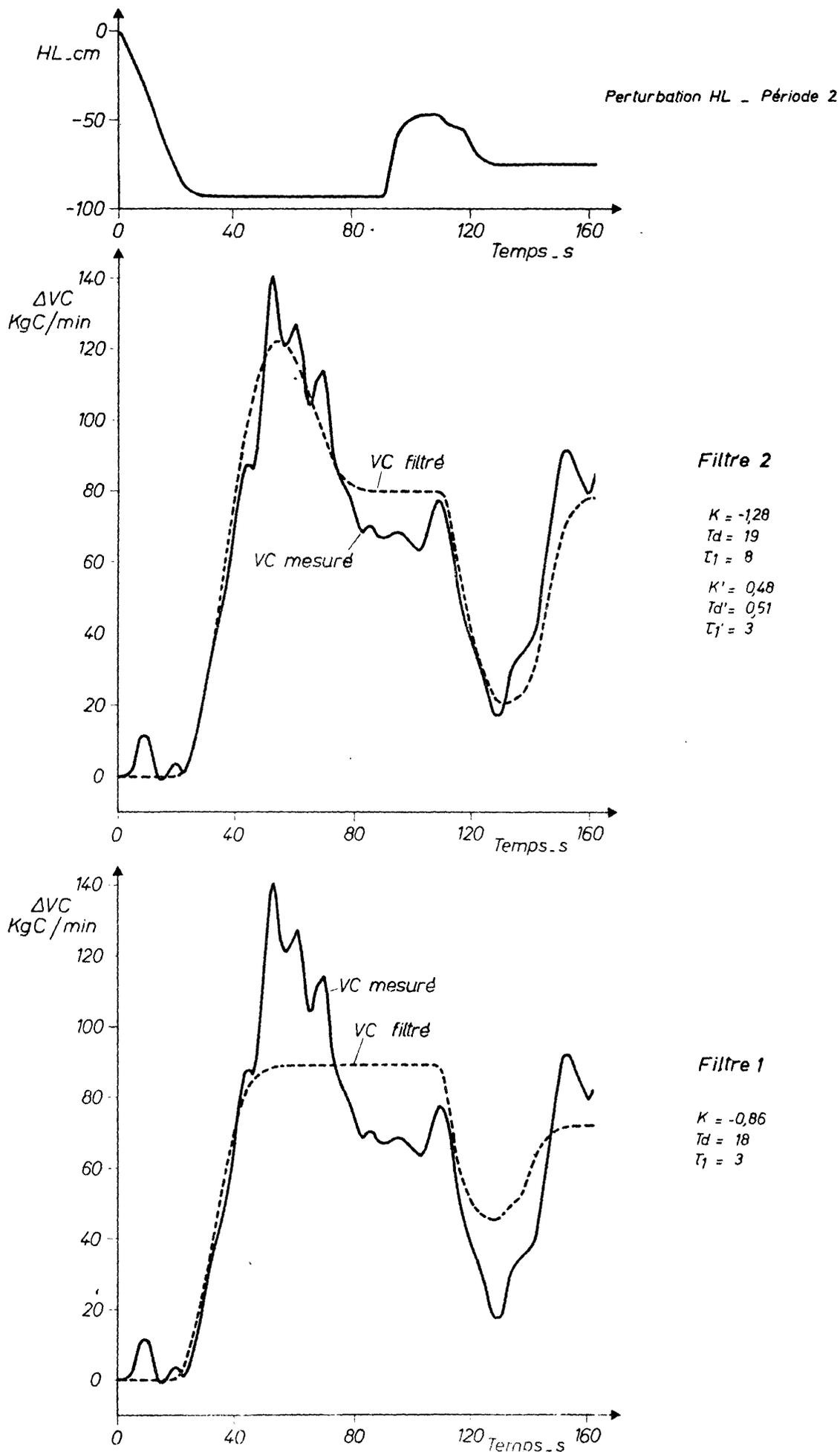


Fig.5 - Exemple de filtrage adaptatif
Comparaison de résultats obtenus avec les filtres 1 et 2

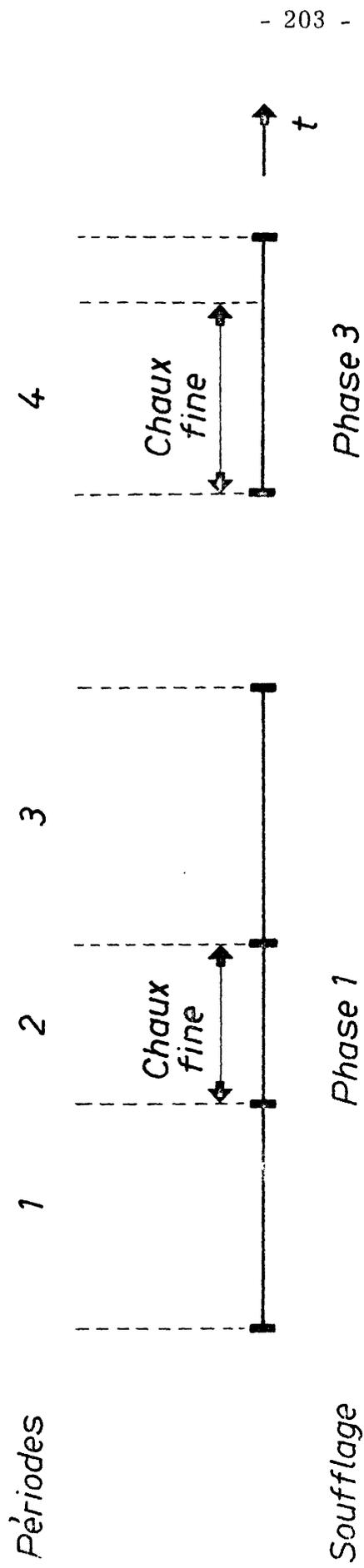


Fig.6 - Regroupement des résultats par découpage du soufflage en périodes

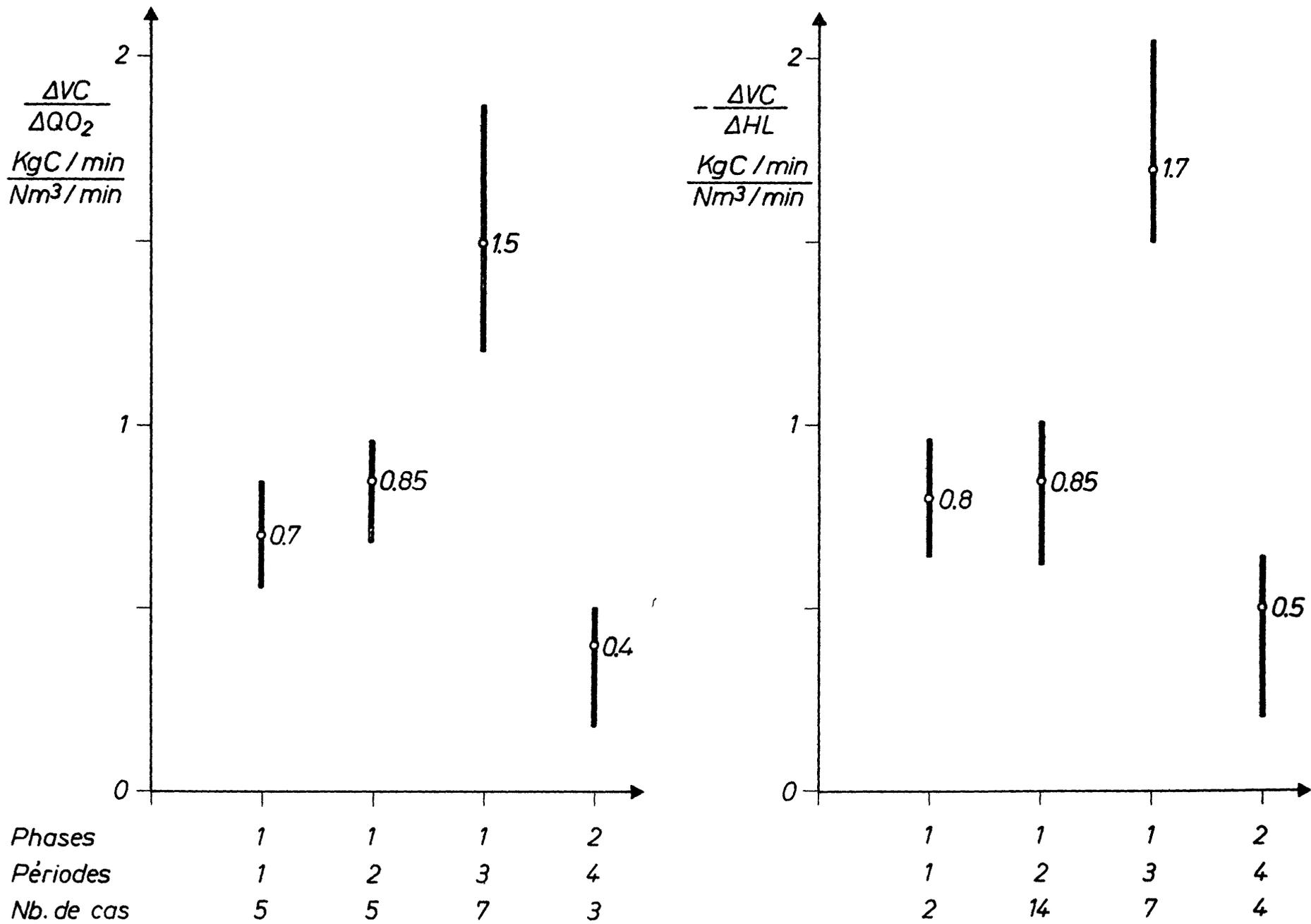


Fig. 7_ Gains statiques

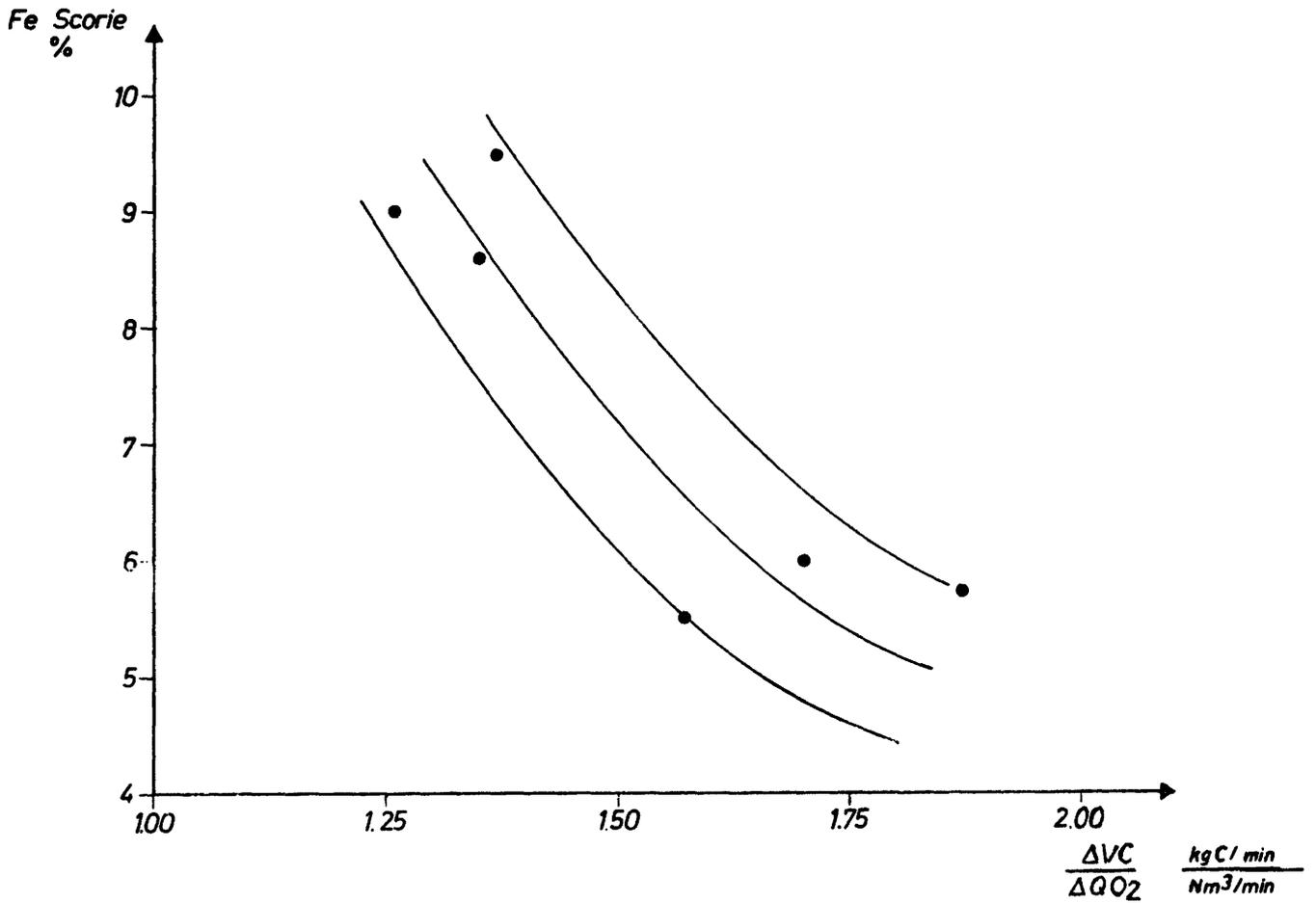
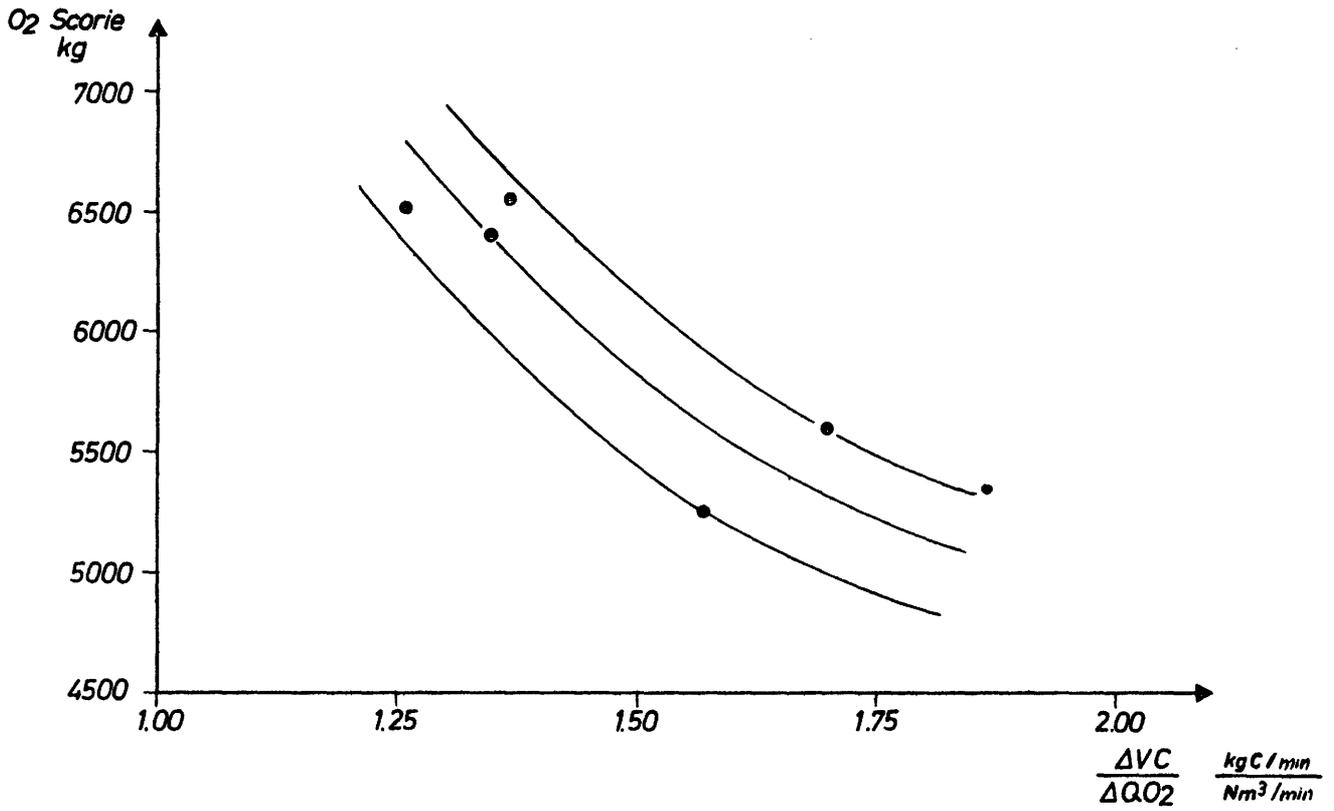


Fig. 8 - Influence de la scorie

AFFINAGE DES FONTES PHOSPHOREUSES EN UNE PHASE
AVEC DECRASSAGE EN COURS DE SOUFFLAGE

ENSEIGNEMENTS TIRES D'UNE CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS
D'ECHANTILLONS DE METAL ET DE SCORIE
EN COURS DE SOUFFLAGE LD-AC PHASE 1

par

P. DAUBY

J. BOELENS

Cl. LEROY

T A B L E D E S M A T I E R E S

<u>AVERTISSEMENT</u>	211
<u>INTRODUCTION</u>	213
<u>1. DE L'ECHANTILLONNAGE DU METAL ET DE LA SCORIE.</u>	215
1.1. Points de prélèvement des différents échantillons.	215
1.2. Description de l'installation de prélèvement en cours de soufflage.	216
1.2.1. Moule de prélèvement.	216
1.2.2. Tige.	217
1.2.3. Le câble et son tambour d'enroulement.	218
1.2.4. Performance de l'installation.	218
1.3. Préparation et analyse des échantillons.	219
1.4. Nombre d'échantillons prélevés.	220
<u>2. DE LA FIABILITE DES DONNEES COLLECTEES.</u>	221
2.1. Précision des analyses scorie et fonte.	221
2.2. Influence du poids de scorie entraîné dans la poche à fonte.	222
2.3. Réaction fonte/scorie à l'enfournement.	223
2.4. Précision des poids des matières enfournées en cours de soufflage.	225
2.5. De l'homogénéité du bain pendant le soufflage.	226
2.6. Composition des émulsions métal/scorie.	227

3. <u>DU TRAITEMENT DES DONNEES.</u>	229
3.1. Données disponibles.	229
3.2. Méthode de calcul.	230
3.2.1. Principe.	230
3.2.2. Equations.	231
3.2.3. Hypothèses.	233
4. <u>RESULTATS DE CALCUL ET INTERPRETATIONS METALLURGIQUES.</u>	236
4.1. Evolution dans le temps de quelques grandeurs caractéristiques du soufflage.	237
4.1.1. Poids de scorie recyclée remise en solution.	237
4.1.2. Poids de carbone éliminé.	238
4.1.3. Hauteur de lance et mise de chaux.	238
4.1.4. Poids de phosphore éliminé.	239
4.1.5. Poids de scorie formée.	240
4.1.6. Ecart à la saturation en chaux.	240
4.1.7. Commentaires sur ces résultats.	241
4.2. Evolution de la composition de la scorie.	242
4.3. Evolution de la composition du bain.	244
5. <u>RESUME.</u>	245
Références.	247
<u>Annexe 1</u> : Signification des symboles utilisés dans les équations.	288
<u>Annexe 2</u> : Simulation du modèle statique sur calculateur analogique.	290
<u>Annexe 3</u> : Sur la fusion des mitrailles.	298
<u>Annexe 4</u> : Considérations diverses concernant l'équilibre métal/scorie et la position des scories par rapport au liquidus	301

ENSEIGNEMENTS TIRES D'UNE CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS
D'ECHANTILLONS DE METAL ET DE SCORIE
EN COURS DE SOUFFLAGE LD-AC PHASE 1

par

P. DAUBY, J. BOELENS, Cl. LEROY.

Avertissement.

L'étude dont nous décrirons ci-dessous les résultats vise à parfaire nos connaissances du processus LD-AC et s'inscrit dans le cadre de la recherche C.E.C.A. - C.R.M. concernant l'affinage en une phase de fonte phosphoreuse avec décrassage en cours de soufflage.

On y examine le mécanisme des réactions de scorification se déroulant dans les convertisseurs, en particulier les conditions de formation et de débordement de la scorie, en d'autres mots, l'évolution de la composition et du poids de la scorie à chaque instant du soufflage.

C'est afin d'atteindre cet objectif que nous avons décidé d'effectuer une campagne de collecte d'informations durant l'affinage des charges de fonte phosphoreuse dans une cornue LD-AC de 160 t à COCKERILL-Chertal.

A côté de l'enregistrement en continu, pendant le soufflage, de toutes les grandeurs d'action (débit d'oxygène, hauteur de lance, additions,) et de toutes les grandeurs de sortie (débit et analyse des fumées, son, cellules de visée de la flamme, température des fumées, etc...)(*), notre campagne d'essais a consisté à prélever des échantillons de métal et de scorie aux trois stades suivants :

- avant et après l'enfournement de la fonte sur la scorie recyclée,
- pendant le soufflage et ce, sans l'arrêter,
- après soufflage, cornue rabattue.

Dans le présent rapport, nous discuterons des enseignements métallurgiques que nous avons tirés de cette campagne de prélèvements d'échantillons.

+ +

+

(*) Cet aspect de l'étude (enregistrement en continu) est commenté par ailleurs (1, 2).

Introduction

Ainsi que nous l'avons déjà suggéré ci-dessus, l'idée maîtresse de notre étude a consisté à trouver l'évolution, durant le soufflage de la phase 1, de certains paramètres propres à caractériser la scorie formée, en particulier les lois de scorification du silicium, du phosphore, du manganèse et du fer ; notons que ceci suppose, outre certains coefficients physico-chimiques, la loi de dissolution de la chaux nouvellement enfournée avec comme corollaire celle de remise en solution de la scorie recyclée.

Pour étudier ce problème, nous avons travaillé à l'aide de bilans matières. Pour ce faire, nous disposons d'un outil de calcul simple, "le modèle statique", dont les équations sont bien connues (*) et nous avons eu l'idée de l'appliquer, non plus seulement pour le calcul du rabattement en fin de phase, mais aussi pour chacun des stades intermédiaires pour lesquels des prélèvements en cours de soufflage avaient été opérés.

Le premier chapitre de notre rapport est consacré à la collecte des échantillons, la description de l'installation, la préparation des échantillons, les méthodes d'analyses, etc...

Ensuite, le modèle statique faisant intervenir le calcul de nombreux bilans matières, nous examinerons la fiabilité des différents termes intervenant dans ces équations. Il s'agira de la précision, tant du poids des matières enfournées que des analyses reçues, de l'homogénéité du bain, de la propreté des échantillons prélevés. Quelques considérations seront également émises quant à la composition des émulsions "métal-scorie".

(*) Signalons que ce modèle statique que nous avons mis au point précédemment (3) est utilisé actuellement à Chertal pour le calcul des enfournements sur chacune des 3 cornues.

Le troisième chapitre est consacré à une description de la mise en application sur calculateur analogique du modèle statique. Ce type de calculateur s'est avéré en effet être le plus apte à la résolution de notre problème.

Dans le quatrième chapitre, on aborde la description des résultats de calcul ainsi que leur interprétation métallurgique. On montre comment les différents éléments scorifiables se combinent avec l'oxygène disponible et quelle peut être l'influence de la vitesse de décarburation. Ce faisant, on suppose connu en continu, à l'aide d'un capteur adéquat, le poids de carbone brûlé (*).

Le dernier chapitre enfin est relatif à quelques considérations concernant la vitesse de formation de la scorie, sa position quant au liquidus, son écart à la saturation, etc...

+ +

+

(*) L'analyse gaz par exemple nous permet de déterminer cette grandeur en première phase avec une dispersion de l'ordre de 120 kg pour 3500 kg brûlés, ce qui correspond à une dispersion d'environ 0,075 % sur la composition du bain en fin de phase.

1. DE L'ECHANTILLONNAGE DU METAL ET DE LA SCORIE.

1.1. Points de prélèvement des échantillons.

Au cours de la campagne d'essais relative à la présente étude, nous avons prélevé des échantillons aux différents stades suivants :

- Scorie retenue depuis la coulée précédente.
- Fonte avant enfournement dans le convertisseur : en fait, pour des raisons de productivité de l'aciérie, nous n'avons jamais opéré de prélèvement dans la poche de chargement (poids : environ 125 t). Par contre, un échantillonnage a été réalisé dans chacune des poches torpilles (\pm 150 t) arrivant à Chertal. Le contenu d'une poche de chargement correspondant suivant le cas à la vidange d'une ou de plusieurs poches torpilles, on a calculé l'analyse moyenne s'il y avait lieu.
- Scorie surnageant la fonte dans la poche de chargement et entraînée dans le convertisseur.
Fonte après enfournement.
- Métal et scorie en fin de chaque phase.
- Métal et scorie au cours du soufflage de la première phase.

Tous les prélèvements hors soufflage ont été faits à la louche. Quant aux prélèvements en cours de soufflage, ils ont été réalisés à l'aide du dispositif original décrit ci-dessous.

1.2. Description de l'installation de prélèvement en cours de soufflage.

Tous les échantillons de métal que nous avons recueillis au cours de notre étude ont été prélevés par immersion dans le bain d'un moule tronconique du type "bombe IJmuiden".

Au début de notre campagne d'essais, ces bombes, dont le poids atteignait près de 27 kg étaient attachées au bout d'un câble d'acier et descendues ainsi dans le convertisseur. La durée de vie de cet arrangement fut malheureusement assez médiocre. En effet, à chaque plongée, le câble pénétrait dans le bain métallique avec la bombe de prélèvement ; il s'y consumait et se rompait dès la seconde descente.

Afin d'éviter cet inconvénient, nous avons décidé de disposer la bombe le long d'une tige en acier longue de 4 m reliée elle-même au câble de descente qui s'enroule plus haut sur un tambour. Les figures 1 et 2 donnent une idée générale du système : outre une résistance accrue, il permet de descendre plusieurs bombes à la fois afin d'étudier l'homogénéité du bain. De plus, durant la plongée, la tige se garnit d'une croûte d'émulsion, dont on constitue des échantillons pour l'analyse.

1.2.1. Les moules de prélèvement.

On voit à la figure 3 la disposition des moules le long de la tige d'acier : il y en a deux. Les guides métalliques que l'on voit sur la photo et qui encadrent les godets ont pour but d'éviter les accrochages dans le creuset et dans la hotte lors de la remontée.

Les deux godets sont distants d'une trentaine de centimètres sur la verticale. La hauteur du bain dans la cornue étant de l'ordre de 1 m, on constate qu'en réglant adéquatement la profondeur de plongée de la tige dans le bain, il est possible d'obtenir deux échantillons prélevés respectivement au tiers et aux deux tiers de la hauteur du bain.

Le volume intérieur des bombes est de 180 cm³, ce qui correspond à un poids d'échantillon métallique de l'ordre de 1100 g. Pour la plongée, chaque godet est coiffé d'un couvercle en acier embouti qui fond après la traversée de la couche de scorie. Grâce à cela, la concentration en inclusions de scorie dans les échantillons de métal est négligeable.

Lors des premiers essais de prélèvement, les tiges étaient également munies de petites nacelles dont le but était de récolter de l'émulsion métal/scorie au cours de la remontée. Ce système n'a cependant jamais donné satisfaction, soit que les nacelles fondaient, soit que le poids d'émulsion récolté était très faible.

1.2.2. La tige de prélèvement.

La tige de prélèvement est en acier ordinaire pour ronds à béton. Son diamètre est de 30 mm. Son attache au câble d'acier cité plus haut est constituée d'une espèce de crochet tel que représenté à la figure 4. Il permet une interchangeabilité rapide et aisée des tiges entre deux prélèvements. Ce point est important : comme signalé ci-dessus, à chaque remontée en effet, la tige ressort chargée de métal et de scorie et ne peut plus être utilisée pour le prélèvement suivant.

La tige pénètre dans le convertisseur parallèlement à l'axe de la lance à oxygène et à 80 cm de celle-ci.

1.2.3. Le câble et son tambour d'enroulement.

Le câble de remontée (0,500 % C et 0,725 % Mn) s'enroule via une poulie sur un tambour commandé par un moteur-réducteur (*) (fig. 4 et 5).

L'ensemble tambour-réducteur est monté sur un chariot mobile dont le chemin de roulement est constitué par une poutre en I. Le dispositif complet est protégé des flammes par un caisson en acier refroidi lors des prélèvements par de l'air comprimé.

Le chariot comporte un bras mu par air comprimé qui, en pivotant, se place exactement au-dessus de l'une des deux ouvertures pratiquées dans la hotte de part et d'autre du trou de la lance à oxygène.

Les commandes de translation du chariot et de pivotement du bras ainsi que les descentes et remontées du câble se font à distance par boutons-poussoirs.

1.2.4. Performance de l'installation.

Sur un total de 41 plongées effectuées à l'aide du dispositif décrit ci-dessus, 33, c'est-à-dire 80 %, ont été couronnées de succès.

Pour trois coulées, la tige est remontée sans avoir pénétré dans le bain. Les cinq autres échecs sont à imputer au câble qui s'est rompu durant la remontée, soit qu'il avait été brûlé par le jet d'oxygène de la lance, soit qu'il avait été détérioré par les flammes sortant du convertisseur.

(*) Moteur de 2 CV, asymétrique triphasé à cage fermée, 1500 tr/min. Vitesse de remontée = 1 m/sec. Frein moteur. Réducteur "Brown Radicon", Accouplements à chaîne.

Une solution à cet état de chose aurait été de relever de quelques mètres le chemin de roulement du chariot : nous aurions ainsi pu utiliser des tiges de prélèvement plus longues et le câble, de ce fait, n'aurait plus pénétré si profondément dans la cornue. Il n'a toutefois pas été possible d'effectuer cette modification à Chertal en temps utile.

1.3. Préparation et analyse des échantillons.

En ce qui concerne les échantillons de métal et de scorie prélevés en dehors du soufflage, la préparation et la méthode d'analyse utilisée ont été classiques. Hors des échantillons métalliques, on a prélevé des copeaux qui ont ensuite été analysés par voie chimique. Pour les échantillons de scorie qui ont, rappelons-le, tous été prélevés à la louche, on a d'abord effectué un broyage (270 mesh), puis une séparation magnétique du fer métallique et enfin un dosage par fluorescence des rayons X.

Pour des échantillons de métal prélevés en cours de soufflage, la procédure a été semblable à celle mentionnée ci-dessus.

Quant aux échantillons d'émulsion métal/scorie, nous avons adopté le schéma suivant. Lorsqu'on retire la tige de prélèvement hors du convertisseur, elle est habituellement tapissée sur près de 2 m d'une couche d'émulsion. A la figure 6, on en voit une photo. Cette couche est détachée au marteau et séparée en deux échantillons correspondant respectivement aux parties supérieure et inférieure de la tige. La matière est ensuite traitée dans un broyeur à boulets pendant 30 minutes. Après tamisage, on opère une séparation magnétique ; on obtient ainsi deux fractions : l'une de métal de toutes dimensions contenant encore de la scorie, l'autre de scorie. Cette scorie,

finement broyée, est soumise à une nouvelle séparation magnétique avant d'être envoyée au laboratoire pour être dosée par fluorescence. C'est cet échantillon que nous appellerons par la suite "scorie prélevée en cours de soufflage".

La fraction mixte est alors broyée à nouveau puis tamisée et séparée magnétiquement afin d'en extraire la partie métallique habituellement désignée sous le nom de "billes" d'émulsion du fait de son aspect. A ce stade de la préparation, les billes sont encore impropres au dosage, si bien qu'il est nécessaire de les purifier encore par lavage dans une solution à 10 % HNO₃ suivi d'un séchage à l'alcool. Afin d'éviter tout danger d'oxydation ultérieure durant leur transport en laboratoire, ces billes sont conservées dans des tubes à essais remplis d'alcool.

1.4. Nombre d'échantillons prélevés.

Globalement, on peut résumer comme suit la situation :

- 128 coulées ont été suivies au data-logger. Pour toutes ces coulées, en plus de l'analyse fonte, nous disposons des analyses métal et scorie en fin de chaque phase.
- Pour 54 de ces coulées, nous avons, en plus, des échantillons prélevés avant et après enfournement (de la fonte ou des mitrilles).
- Enfin, pour 16 coulées, nous avons effectué des prélèvements de métal et de scorie au cours du soufflage de la phase 1. Le nombre total d'échantillons remontés s'élève à 60 de métal, 78 d'émulsion et 51 de scorie.

2. DE LA FIABILITE DES DONNEES COLLECTEES.

Etant donné que les considérations métallurgiques que nous développerons au chapitre 4 sont basées sur des bilans matières, il importe d'estimer dès à présent la précision que l'on peut attendre de ces calculs. C'est le but du présent chapitre.

2.1. Précision des analyses scorie et fonte.

Pour 33 coulées, nous disposons d'analyses venant de deux laboratoires auxquels nous avons envoyé des échantillons de scorie prélevés simultanément hors d'une même louche en fin d'affinage. La comparaison des valeurs moyennes obtenues par fluorescence des R.X. s'établit comme suit :

Labo	% CaO	% Fe
A	45,5	28,7
B	47,4	26,0

Aux figures 7 et 8, nous avons reporté les valeurs individuelles de ces différents dosages. On peut montrer aisément par calcul que la différence entre les deux familles est significative.

Si l'on désigne par Δ l'écart entre chaque couple de valeurs rendues, on peut calculer la dispersion des écarts ainsi calculés par rapport à leur valeur moyenne. Si on exclut deux valeurs aberrantes pour le % CaO, on trouve les valeurs suivantes :

	Δ (% CaO)	Δ (% Fe)
σ	0,92	1,15

La dispersion trouvée est de l'ordre du pourcent ; c'est donc là l'ordre de grandeur auquel on doit s'attendre pour la précision des calculs que nous décrirons plus loin (§ 4.2.).

En ce qui concerne la composition de la fonte, nous n'avons pas fait de dosages comparatifs afin de déterminer les écarts possibles entre deux laboratoires. Nous mentionnerons cependant à ce sujet qu'une usine affiliée signale un décalage (de l'ordre de 0,1 %) entre les teneurs en phosphore dosées par spectro ou par chimie. Ce fait pourrait être expliqué par l'hétérogénéité des échantillons. De meilleurs résultats pourraient sans doute être obtenus en broyant les échantillons.

2.2. Influence du poids de scorie entraîné dans la poche à fonte.

Lorsque, au début de notre exploitation, nous avons calculé les poids de scorie formée tant en cours qu'en fin de soufflage, nous avons constaté que suivant le bilan matière choisi (CaO, SiO₂ ou P₂O₅), nous obtenions des valeurs différentes (§ 3.2.3.). En fait, le bilan CaO conduisait à une valeur comprise entre celles tirées des bilans P₂O₅ (trop haut) et des bilans SiO₂ (trop faible).

Nous avons déjà signalé au paragraphe 2.1. que l'erreur sur le P₂O₅ pouvait être attribuée à la méthode d'analyse.

En ce qui concerne le SiO₂, nous avons pensé que cet écart devait être dû à des entrées parasites de silice dans le

convertisseur. A cet effet, nous avons effectué pour une vingtaine de coulées des prélèvements de scorie surnageant la fonte. Les résultats d'analyse sont groupés dans le tableau ci-dessous :

Eléments	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	MgO	Fe	Al ₂ O ₃
Moyenne (%)	10,68	48,76	0,44	6,8	3,69	18,81	4,85
Minimum (%)	7,6	40,4	0,3	4,1	2,8	11,1	3,7
Maximum (%)	12,8	53,9	0,7	8,6	5,4	25,2	6,2

Estimant à Chertal le poids de scorie entraînée dans la poche à fonte à 8 kg par tonne de fonte, on constate donc au vu de ces analyses que cette scorie a pour effet d'introduire dans le système une quantité de silice équivalente à :

$$8 \text{ kg} \times \frac{48,76}{100} \text{ SiO}_2 \times \frac{28}{60} \times \frac{1}{10} = 0,182 \% \text{ Si dans la fonte}$$

Inversément, 0,182 % de silicium conduit en fin de soufflage à une variation du poids de scorie calculé de l'ordre de 40 kg/t fonte, soit près de 15 % du poids total.

2.3. Réactions accompagnant l'enfournement de la fonte liquide sur la scorie recyclée.

On se souvient qu'au cours d'une étude antérieure (4), le C.R.M. a suivi une quarantaine de coulées pour lesquelles des prélèvements de fonte et de scorie ont été réalisés avant et après enfournement. Il s'agissait de coulées non consécutives.

Sans entrer dans le détail de cette étude, nous rappellerons simplement les modifications moyennes de composition

de la fonte et de la scorie qui avaient été observées lors de l'enfournement.

Variations du	C	P	Si	Mn	S
Moyenne (%)	- 0,300	- 0,330	- 0,260	- 0,080	+ 0,003
σ	0,167	0,199	0,131	0,093	0,006

Variations du	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	S	Fe
Moyenne	+ 2,39	+ 2,13	+ 2,21	+ 0,25	+ 0,064	- 4,53
σ	2,79	1,28	1,05	0,29	0,040	3,03

A la figure 9, on trouvera, dans un système CaO', FeO'_n, P₂O₅' à 5 % SiO₂ (5), la situation de la partie liquide des scories, respectivement avant et après enfournement.

Depuis cette étude, les conditions de séchage de la scorie retenue ont été modifiées. De plus, on pouvait se demander si les réactions à l'enfournement suivaient, de coulée à coulée, une certaine évolution dans le temps : évolution qui aurait permis, en début de soufflage, de prévoir l'amplitude des réactions. Nous avons dès lors décidé, pour la présente campagne de collecte d'informations, de prélever à nouveau des échantillons de fonte avant et après enfournement. Toutefois, aucun échantillonnage de scorie après enfournement n'a été effectué vu le caractère pénible de ce travail.

A la figure 10, on trouvera pour 38 coulées consécutives la variation de composition de la fonte après son chargement dans le convertisseur.

En plus d'une forte dispersion, on ne constate aucune tendance dans le temps. Nous recherchons actuellement les raisons des variations observées. Nous craignons cependant qu'après son enfournement, le bain de fonte ne soit plus homogène (stratification) et que l'analyse dépende de l'endroit où on a prélevé l'échantillon.

2.4. Précision des poids des matières enfournées en cours de soufflage.

Nous avons vu ci-dessus que des imprécisions pouvaient être introduites dans les calculs à cause de la dispersion des analyses (question de méthode d'analyse, de qualité de prélèvement, de réaction à l'enfournement, etc...).

Afin de mettre en évidence l'influence du facteur "poids des additions", nous avons examiné une série de 38 coulées consécutives qui ont été suivies au data-logger.

Aux figures 11, 12 et 13, nous avons comparé sur diagrammes les poids de chaux, de pailles, ainsi que les volumes d'oxygène communiqués d'une part, au Centre de Calcul par interphone et, d'autre part, enregistrés automatiquement sur logger.

On constate pour la chaux en poudre un écart de l'ordre de 3 %, ce qui vraisemblablement devrait être dû à des erreurs de mesure et à des vitesses de fermeture de vanne. En ce qui concerne le volume d'oxygène soufflé, on observe une assez nette différence. Celle-ci est imputable, soit à la manière de comptabiliser l'oxygène (repérage de l'allumage et de la fin du soufflage), soit à la précision des appareillages, soit encore au système de fluidisation de la chaux (7).

Quant aux autres additions telles que pailles, scraps, fonte grenillée etc..., les différences entre interphone et logger sont aléatoires et ainsi qu'on le voit à la figure 12, semblent ne dépendre que de l'"attention" avec laquelle on communique au centre de calcul les informations.

Nous évaluons actuellement l'incidence de ces différences sur les calculs de récurrence effectués d'une coulée à l'autre pour optimiser le modèle statique.

2.5. De l'homogénéité du bain pendant le soufflage.

Nous avons vu plus haut (§ 1.2.1.) que lors d'une même plongée dans le convertisseur, deux échantillons écartés d'une trentaine de centimètres sur la verticale étaient prélevés simultanément.

Il nous a paru intéressant de comparer les compositions de ces deux échantillons afin de nous faire une idée de l'homogénéité du bain au moment du prélèvement. Dans ce but, nous avons reporté aux figures 14 et 15 les teneurs en carbone, phosphore, manganèse et soufre du métal dosées dans chacun des échantillons. La correspondance observée, quoiqu'elle contienne la dispersion propre à l'analyse en laboratoire, démontre une bonne homogénéité du bain.

En ce qui concerne le silicium, il n'a pas été possible de tracer un semblable diagramme vu que déjà au moment du premier prélèvement (vers la quatrième minute du soufflage), le silicium était entièrement scorifié.

2.6. Composition des émulsions métal / scorie.

Pour examiner l'homogénéité des émulsions métal/scorie, nous avons, semblablement à ce qui a été dit au paragraphe précédent, reporté aux figures 16 et 17 les teneurs en carbone et en phosphore des deux échantillons d'émulsion prélevés le long de la tige d'immersion. Quoique entachés d'une dispersion plus grande que dans le cas des échantillons du bain, les résultats présentent encore une assez bonne concordance. La dispersion est sans doute liée au fait que la progression des réactions d'oxydation n'est pas identique au sein même de l'émulsion.

En ce qui concerne plus précisément l'importance des réactions entre métal et émulsion, on en trouvera aux figures 18 à 21 une première estimation.

En moyenne, les niveaux des analyses se situent comme suit :

Elément	% C	% P	% Mn	% S
Emulsion	1,30	0,66	0,21	0,044
Bain	1,74	0,78	0,20	0,044

On observe en particulier que les billes de métal contenues dans l'émulsion sont nettement plus décarburées que le bain. Ce fait est en accord avec les résultats de P. KOZAKEVITCH (6) qui avait estimé la composition des émulsions à partir de prélèvements effectués autour du convertisseur après débordement et plus rapprochés de la fin du soufflage.

En ce qui concerne la déphosphoration, il apparaît à la figure 19 que celle-ci est aussi avancée, du moins à partir du niveau de 1 %. Ce point précis mériterait une étude ultérieure particulière.

En ce qui concerne le manganèse et le soufre, contrairement aux résultats de la littérature (6), on n'a pas observé de différences sensibles entre émulsion et bain.

3. DU TRAITEMENT DES DONNEES.

De précédentes études du C.R.M. concernant le procédé LD ont permis d'établir les équations régissant la dynamique des réactions se déroulant lors du soufflage LD et principalement l'évolution de la décarburation (8). Ce modèle faisait abstraction du phosphore du fait que, dans de nombreuses aciéries LD, la teneur en phosphore de la fonte utilisée est suffisamment basse pour éviter tout problème.

Afin d'aboutir à un modèle dynamique des réactions pour le procédé LD-AC, nous avons décidé ensuite d'entreprendre des essais de simulation sur calculateur analogique en vue d'établir les équations descriptives de la déphosphoration.

Les premières tentatives de description de la réaction de déphosphoration à l'aide d'une formulation purement théorique ayant conduit à des résultats fortement dispersés, le problème a été repris sur la base de mesures effectuées pendant les campagnes d'essai à Chertal.

Nous décrirons dans ce qui suit la nature des informations et du matériel disponibles pour cette étude et exposons ensuite dans le chapitre 4 les résultats obtenus.

3.1. Données disponibles.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons essentiellement à la phase 1 du soufflage.

Pour notre étude, nous disposons de 16 coulées (cf. § 1.4.) au cours desquelles ont été effectuées des prises

d'échantillons de métal et de scorie. Nous disposons bien entendu aussi de grandeurs classiques loggées qui permettent de calculer, en cours de soufflage, l'évolution du carbone éliminé, de l'oxygène fourni par la lance, de la hauteur de lance, de la chaux enfournée, etc... Parmi ces 16 coulées, il en existe en réalité 9 pour lesquelles on a simultanément des analyses de métal et de scorie :

- avant soufflage,
- au rabattement,
- aux moments de prélèvement des échantillons.

Les données relatives à ces 9 coulées "complètes" servent de base à notre étude.

3.2. Méthode de calcul.

3.2.1. Principe.

Le modèle statique du C.R.M. (3) comporte fondamentalement un ensemble de 6 équations reprises ci-dessous permettant de relier l'analyse de la scorie aux éléments scorifiés issus des matières enfournées (fonte liquide, fontes diverses, scorie recyclée, mitrailles, chaux, etc...). Il comporte un certain nombre de paramètres qui ont été fixés pour le moment correspondant au rabattement où toutes les matières enfournées sont alors à l'état liquide.

On conçoit aisément que ce modèle statique, dont les équations ne constituent rien d'autre que des bilans de matières, doit aussi pouvoir s'appliquer à un moment intermédiaire du soufflage, à condition de ne faire entrer en jeu que les matières liquides à ce moment.

On voit alors directement l'utilité de ce modèle : puisque l'on connaît les analyses de la fonte et de la scorie

à un moment déterminé, il doit théoriquement être possible de définir l'état du système qui satisfait à ces analyses et, en particulier, de connaître la quantité de matière (introduite à l'état solide) qui est liquide au moment considéré.

C'est dans cette optique que le modèle statique a été utilisé pour exploiter les données relatives aux neuf coulées dont il a été question plus haut.

De manière à avoir une grande souplesse pour adapter les coefficients du modèle pour chaque point d'échantillonnage, nous l'avons simulé sur calculateur analogique.

3.2.2. Description des équations (9).

Les équations du modèle qui suivent sont présentées sous la forme utilisée pour la simulation. On trouvera à l'annexe 1 la signification des différents symboles.

$$(1) P2O5 = B_1 - (CaO + SiO_2 + XMnO + XMgO + 1,33 Fe) \quad (\text{en } \%)$$

$$(2) XMnO = \frac{(XMnF - XMnB/HPF1) + 0,1 QMRTF + 0,1 QMMTF}{0,775 \cdot 10^{-3} \cdot PSCTF} \quad (\text{en } \%)$$

$$(3) SiO_2 = CaO \cdot \frac{D}{C} + \frac{P2O5}{22,9 (PF - PB/HPF1) + QPRTF} [XX] \quad (\text{en } \%)$$

$$\text{avec } XX = 21,42(SiF - SiB/HPF1) + QSRTF + QSGTF \\ - QCRTF \cdot D/100 + QSETF$$

$$(4) CaO = 1,57 P2O5 + 1,86 SiO_2 + 1,125 Fe - XFE \quad (\text{en } \%)$$

$$(5) XMgO = CT \quad (\text{en } \%)$$

$$(6) \text{ Fe} = 91,74 \times a_{\text{FeO}} \times N'' - 1,283 \text{ (en \%)}$$

avec :

$$N'' = 0,01786 \text{ CaO} + 0,0141 \text{ XMnO} - 0,01667 \text{ SiO}_2 - 2,11 \text{ P}_2\text{O}_5 \\ + 0,0248 \text{ XMgO} + 0,00741 \text{ Fe} + 0,021$$

Aux équations de base ci-dessus, on adjoint les équations qui donnent :

- le poids de scorie formée par tonne de fonte :

$$(7) \text{ PSCTF} = \frac{100}{\text{P}_2\text{O}_5} [22,9 (\text{PF} - \text{PB}/\text{HPF1}) + \text{QPRTF}] \text{ (kg/tf)}$$

- la quantité totale de chaux présente dans la scorie formée

$$(8) \text{ MCCTF} = \text{PSCTF} \cdot \frac{\text{CaO}}{\text{C}} \text{ (kg/tf)}$$

- la quantité de chaux enfournée

$$(9) \text{ MCETF} = \text{MCCTF} - \text{QCRTF} \text{ (kg/tf)}$$

- la quantité d'oxygène dans la scorie formée :

$$(10) \text{ POSCTF} = \text{PSCTF} \left(0,2255 \frac{\text{XMnO}}{100} + 0,397 \frac{\text{XMgO}}{100} + 0,564 \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{100} \right. \\ \left. + 0,533 \frac{\text{SiO}_2}{100} + 0,33 \frac{\text{Fe}}{100} \right) \text{ (kg/tf)}$$

Nous donnons dans l'annexe 2 les détails de la simulation de ce système d'équations sur calculateur analogique.

Ayant décrit les principales équations intervenant dans nos calculs, il est utile, avant de présenter les résultats obtenus, de définir les hypothèses de travail.

3.2.3. Hypothèses de calcul.

Une première remarque est relative à la composition des matières enfournées.

3.2.3.1. Composition des matières enfournées.

Lors des premières applications du modèle, il est apparu (et cela a été confirmé par des coulées élaborées sans laitier retenu) que les valeurs de SiO₂ et P₂O₅ calculées présentaient un écart systématique par rapport aux valeurs mesurées. Des investigations à ce sujet ont mis en évidence :

- que l'on négligeait un apport important de silice par la scorie enfournée avec la fonte, (§ 2.2.).
- que la mesure du pourcentage de phosphore de la fonte était, pour les valeurs habituellement réalisées, en excès par rapport au pourcentage réel (§ 2.1.).

Cela nous a conduit à introduire dans le modèle deux termes correctifs :

- un terme QSETF représentant la quantité de SiO₂ enfournée avec la fonte : pour une charge moyenne de 125 t de fonte liquide, on a estimé qu'on retenait dans la poche de chargement environ 1,0 t de scorie à 48 % de SiO₂. Cela conduit à QSETF = 4 kg/t
- une analyse en phosphore de la fonte inférieure de 0,1 % par rapport à la valeur mesurée.

3.2.3.2. Remarque concernant la vitesse de dissolution de la chaux.

Nous avons admis que la scorie recyclée depuis la coulée précédente est, avant le début du soufflage, à l'état solide et qu'au cours du soufflage, elle se remet progressivement en solution, libérant ainsi les éléments qui la composent. Ces éléments s'ajoutent aux autres éléments nouvellement scorifiés. Le poids de scorie recyclée dissoute à un moment donné (PSCRTE) est déterminé par un bilan CaO :

$$\left(\begin{array}{l} \text{Chaux de la sco-} \\ \text{rie recyclée} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{chaux de la sco-} \\ \text{rie formée} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{chaux enfournée} \\ \text{dissoute} \end{array} \right)$$

Toutefois, si l'on connaît à chaque instant le poids de chaux enfournée (chaux en roche et chaux en poudre), on ne connaît pas encore très bien, à l'heure actuelle, la loi de mise en solution de cette chaux. Tout au plus, on peut admettre une certaine hiérarchie entre la chaux en poudre et la chaux en roche, la première entrant plus vite en solution que la seconde. Pour éviter d'émettre à ce propos une hypothèse supplémentaire, nous avons défini, pour chaque instant où des échantillons de matière ont été prélevés, les deux états limites suivants.

- a) Une limite inférieure du poids de scorie recyclée redissoute : on suppose ici que toute la chaux enfournée au moment du prélèvement est dissoute. Le complément de chaux nécessaire pour satisfaire au bilan CaO doit être fourni par une certaine fraction de scorie recyclée. Il est à noter que cette hypothèse est la seule considérée pour les calculs en fin du soufflage, moment où toutes les matières solides enfournées sont liquéfiées.

b) Une limite supérieure du poids de scorie recyclée redissoute : on suppose que tout le CaO nécessaire provient en premier lieu de la scorie retenue redissoute.

Le complément éventuel de chaux nécessaire au bilan CaO est fourni par une fraction de la chaux enfournée.

3.2.3.3. Pertes en chaux.

On a admis qu'il y avait pendant le soufflage une perte en fines de chaux égale à 5 % (poudre + roche).

3.2.3.4. Augmentation de la température du bain.

On a supposé que la température du bain variait linéairement, en fonction du volume d'oxygène soufflé, entre celle de la fonte et celle mesurée au rabattement.

Si l'on se réfère à des mesures de température effectuées en cours de soufflage (10), on verra que cette hypothèse correspond bien à la réalité.

Il est par ailleurs intéressant de rappeler ici que dans le cadre de notre étude du processus LD, nous avons établi un bilan thermique en continu (11). Ce modèle qui ne faisait intervenir que des considérations théoriques/thermodynamiques permettait en particulier d'estimer l'effet des additions en cours de soufflage sur la trajectoire de la température.

Signalons enfin que, pour le calcul des équilibres physico-chimiques, on a supposé que la température de la scorie était égale à celle du bain métallique.

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS METALLURGIQUES.

Comme signalé ci-dessus (§ 3.2.3.2.), nous avons, pour chaque prélèvement effectué en cours de soufflage, assigné deux valeurs extrêmes à la vitesse de dissolution de la chaux enfournée. Ce faisant, nous ne trouvons plus une seule valeur, mais bien un couple de valeurs (minimum et maximum) pour toutes les grandeurs calculées par le modèle.

La figure 22 donne, pour une coulée, un exemple de résultats ainsi obtenus. Il s'agit ici de l'évolution du poids de scorie formée au cours du soufflage.

Si l'on joint entre elles les valeurs minima et maxima calculées, le diagramme 22 fait apparaître une zone à l'intérieur de laquelle évolue le poids de scorie formée. Pour connaître la trajectoire réellement parcourue par le poids de scorie, il est nécessaire de disposer d'informations complémentaires : il faudrait, par exemple, savoir quantifier les vitesses de dissolution de la chaux en roche et de la chaux en poudre.

Faute de données précises sur ce sujet, nous avons procédé de la façon suivante :

- Nous avons réparti les coulées en familles, en fonction de l'allure que présentaient leurs courbes.
- Il est ainsi apparu une zone commune à toutes les coulées appartenant à une même famille.
- C'est cette zone commune qui, schématisée par des hachures, sera reproduite dans tous les diagrammes que nous présenterons ci-dessous.

4.1. Evolution des quelques grandeurs caractéristiques du soufflage.

Dans le présent paragraphe, nous montrerons, en fonction du volume d'oxygène soufflé, l'évolution de quelques grandeurs importantes telles que les vitesses de remise en solution de la scorie retenue, d'élimination du carbone et du phosphore et de formation de nouvelle scorie. Nous verrons qu'en définitive, il y a une dépendance très étroite entre ces grandeurs d'une part, et l'action que l'opérateur exerce sur la lance, d'autre part.

4.1.1. Poids de scorie recyclée remise en solution (fig. 23).

Il est apparu que les coulées examinées pouvaient être scindées en deux familles se différenciant par la vitesse de remise en solution de la scorie recyclée.

Pour le groupe A, la mise en solution est relativement lente au début du soufflage, tandis que pour le groupe B, elle est nettement plus rapide. On voit, par exemple, que dans le cas A, on dissout 14 tonnes de scorie après avoir soufflé 5.000 Nm³ d'oxygène alors que, dans le cas B, on arrive au même résultat après 2.000 Nm³ seulement.

Afin de voir si ces différences de vitesse de remise en solution de la scorie recyclée trouvaient leur explication pour des conditions de soufflage différentes, nous avons, pour les coulées de chaque groupe, examiné ci-dessous le chemin moyen parcouru par la lance ainsi que l'évolution de la décarburation. Ces deux grandeurs sont particulièrement intéressantes, car directement mesurables et indépendantes de nos calculs.

4.1.2. Poids de carbone éliminé (fig. 24).

En ce qui concerne le poids de carbone éliminé, nous avons constaté qu'ici aussi, il était possible de répartir les coulées en deux familles.

Il est particulièrement intéressant de remarquer alors que l'ensemble des coulées examinées se répartit de la même façon que celle qui avait été observée au paragraphe précédent : les mêmes coulées se distribuent d'une manière analogue entre les deux familles.

Si l'on examine la figure 24 au point de vue vitesse de décarburation, on constate que les coulées du groupe A ont été décarburrées plus rapidement que celles de l'autre groupe.

4.1.3. Hauteur de lance et mise de chaux.

Si l'on examine les coulées suivies au point de vue hauteur de lance et mise de chaux, on constate, tout comme précédemment, qu'il est encore possible de constituer deux groupes de coulées.

A la figure 25, on observe que les coulées du groupe A ont été élaborées avec une lance évoluant à un niveau inférieur à celui des coulées du groupe B et cette différence est principalement marquée en début de soufflage ($H_L = 1,85$ m pour la famille A contre 2,3 m pour la famille B).

La figure 26 schématise par ailleurs le débit de chaux. On y voit que l'enfournement chaux a été analogue pour les deux familles.

Conséquences :

Des observations précédentes, il apparaît que deux techniques de soufflage sont utilisées. Elles se différencient par la trajectoire suivie par la lance :

- a) une hauteur de lance élevée entraîne :
une décarburation modérée,
une remise en solution rapide de la scorie recyclée au début du soufflage,
- b) une hauteur de lance basse entraîne :
une décarburation élevée,
une remise en solution lente de la scorie recyclée au début du soufflage.

Cette interdépendance de la vitesse de décarburation avec la vitesse de dissolution de la scorie recyclée apparaît clairement à la figure 27 où l'on a porté le taux de dissolution de la scorie recyclée par Nm³ d'oxygène soufflé en fonction du taux de décarburation. Ces deux grandeurs ont été calculées pour des périodes de soufflage délimitées par deux prélèvements d'échantillons.

On peut voir sur la figure que les points s'alignent bien. A titre d'information, la pente des droites qui ont été tracées est de - 28,5 kg de scorie recyclée par kg de carbone éliminé.

4.1.4. Poids de phosphore nouvellement scorifié (fig. 28).

Dans cette figure, QP205 représente la quantité de phosphore scorifié provenant du bain. Les deux groupes de coulées se différencient ici aussi.

Pour le groupe A, où l'on observait la plus forte décarburation et la plus lente mise en solution de la scorie

recyclée, la déphosphoration est la plus faible. Cette plus lente déphosphoration s'explique par le fait qu'une plus grande quantité d'oxygène se combine au carbone, qu'il y a donc moins de fer scorifié et, qu'enfin, la scorie recyclée n'apporte que lentement la chaux nécessaire pour fixer le P₂O₅ formé.

4.1.5. Poids de scorie formée (fig. 29).

On observe sur cette figure que, pour les coulées du groupe B, un poids donné de scorie liquide est formé après avoir soufflé un plus faible volume d'oxygène que pour les coulées du groupe A. Cette constatation s'explique par l'action conjuguée d'une mise en solution plus rapide de la scorie recyclée et d'une scorification également plus rapide des éléments du bain.

4.1.6. Ecart à la saturation en chaux de la scorie (fig. 30).

Semblablement aux diagrammes précédents, nous avons, pour chacune des deux familles A et B, représenté en fonction du volume d'oxygène soufflé, l'évolution d'un coefficient ΔCaO caractéristique de l'écart à la saturation en chaux de la scorie. Ce coefficient se calcule suivant la formule

$$\Delta\text{CaO} = \text{CaO} - (1,57 \text{ P}_{2}\text{O}_{5} + 1,86 \text{ SiO}_{2} + 1,125 \text{ Fe} - 6,75)$$

où le terme entre parenthèses représente la teneur en CaO à la saturation (12).

Sur la figure 30, on observe aussi l'influence de la hauteur de lance.

4.1.7. Commentaires sur ces premiers résultats.

Si l'on résume les observations faites jusqu'à présent, on s'aperçoit que les opérateurs d'aciérie conduisent le soufflage de la phase 1 suivant des chemins différents, ces derniers étant conditionnés par la position de la lance par rapport au niveau du bain.

Sur la figure 25, on remarque que, pour certaines coulées, la lance a été descendue d'une hauteur importante lorsque le volume d'oxygène soufflé était de 5.000 Nm³ : on a ainsi constitué le groupe de coulées A. Pour le groupe de coulées B, la descente de la lance est intervenue dès 2.000 Nm³.

En examinant les diagrammes précédents, on peut remarquer que les moments où cette action est introduite, semblent correspondre à un état bien déterminé de la scorie caractérisé par les chiffres suivants :

Scorie remise en solution	PSCR	14 t	(fig. 23)
Phosphore scorifié	QP205	2150 kg	(fig. 28)
Scorie formée	PSC	17 t	(fig. 29)
Ecart à la saturation	Δ CaO	- 15 %	(fig. 30)

Rappelons que toutes les valeurs rassemblées dans ce tableau ont été tirées de diagrammes tracés tous en fonction du volume total d'oxygène soufflé.

Si, par contre, on trace des diagrammes en fonction de la quantité POSC d'oxygène emmagasiné dans la scorie formée (oxygène apporté par la scorie recyclée + oxygène apporté par la lance), on constate que toutes les grandeurs du tableau précédent correspondent à une valeur bien définie de POSC, soit 4.000 kg. En particulier, si on se réfère à la figure 31 où on

trouve l'évolution du poids de scorie (PSC) en fonction de la quantité (POSC) d'oxygène présent dans cette scorie, on constate que les courbes tracées pour les groupes A et B sont pratiquement identiques.

Lorsque PSC atteint 17 tonnes, POSC vaut 4000 kg
--

Bien qu'on ne dispose pas d'informations expérimentales suffisantes en ce qui concerne les débordements, on peut supposer que, dans le cas du convertisseur de Chertal, la scorie atteint un niveau nécessitant une action sur la lance lorsqu'elle contient 4.000 kg d'oxygène (son poids étant alors de 17 t environ dont 14 t sont apportées par la scorie recyclée). On peut émettre l'hypothèse très probable que cette action sur la lance est introduite pour éviter le débordement.

Cette valeur unique de 4000 kg d'oxygène que nous avons trouvée, nous fait penser au vieil adage "Look after the slag and the metal will look after itself".

En d'autres termes, si l'on veut souffler toutes les coulées de la même façon, il nous faudra contrôler à tout instant POSC, le poids d'oxygène emmagasiné dans la scorie.

4.2. Evolution de la composition de la scorie.

Nous venons de voir que pour des coulées soufflées différemment, un même état de la scorie était atteint quand un même poids d'oxygène (POSC = 4.000 kg) y avait été emmagasiné.

Dès lors, afin de mieux grouper les différentes coulées, nous avons examiné l'évolution de la composition de la scorie en fonction de ce paramètre POSC.

Les figures 32 et 33 montrent l'évolution des teneurs en Fe, CaO, P₂O₅, SiO₂, MnO en fonction de la quantité d'oxygène calculée présente dans la scorie. Les points représentés correspondent aux différents prélèvements de scorie. On peut constater, ainsi que nous l'avions suggéré plus haut, que les groupes de coulées A et B se confondent et conduisent aux mêmes évolutions.

Les points présentent une certaine dispersion autour de l'évolution moyenne, mais il ne faut pas perdre de vue que ces résultats sont entachés d'une imprécision résultant des hypothèses de calculs (voir § 3.2.3.) et des analyses. On peut à ce sujet se référer à la figure 34 qui montre pour le P₂O₅, le SiO₂ et le MnO, l'écart entre les valeurs mesurées (analyses) et les valeurs calculées (modèle). On peut voir que de toute façon, on ne peut espérer descendre en dessous d'un σ de 0,8 %.

Aux figures 35 et 36, il nous a paru utile de représenter dans des diagrammes ternaires l'évolution de la composition des scories d'une part en fonction du temps et, d'autre part, en fonction du poids d'oxygène accumulé dans la scorie.

A la figure 35, on observe que pour les coulées du groupe A, ce n'est qu'aux environs de la 11ème minute de soufflage qu'on arrive en un endroit déterminé du diagramme, alors que dans le cas B, déjà à la 5ème minute, ce point est atteint. Cette observation est en accord avec ce qui précède. A Chertal, en effet, le débit moyen d'oxygène est de l'ordre de 400 Nm³/min. A la 5ème minute, le volume d'oxygène soufflé est donc de l'ordre de 2.000 Nm³ et à la 11ème minute, il est de 4.500 Nm³ environ.

Quant à la figure 36, elle représente la trajectoire des scories en fonction du poids d'oxygène POSC. Elle a été tracée à partir d'une évolution moyenne déduite des figures 32 et 33.

Nous verrons plus loin les conséquences de ces résultats sur la conduite de l'affinage.

4.3. Evolution de la composition du bain.

La figure 37 montre l'évolution des teneurs en phosphore et en manganèse du bain en fonction de l'oxygène présent dans la scorie. On peut tirer à ce sujet des conclusions semblables à celles relatives à la composition de la scorie.

Il est assez intéressant de faire remarquer à ce stade de notre exploitation que le fait d'avoir choisi la quantité d'oxygène accumulée dans la scorie pour caractériser son état a conduit à des évolutions présentant une dispersion raisonnable. Si nous avions pris comme paramètre le volume total d'oxygène soufflé, on aurait obtenu des résultats très dispersés ainsi qu'on peut le voir sur les figures 38 et 39.

5. R E S U M E

Parallèlement à la mesure de la vitesse de décarburation du bain métallique à l'aide de capteurs (analyse des gaz, température des fumées, ...), on sait que la connaissance, en cours de soufflage, de l'évolution de la composition de la scorie est du plus grand intérêt pour l'aciériste. Cette évolution détermine en effet les instants critiques du soufflage (débordement, projections), la reproductibilité des résultats métallurgiques (analyses et température au rabatement), etc....

Le but de notre étude a été plus précisément de rechercher les relations existant entre les mesures (c'est-à-dire la vitesse de décarburation et la hauteur de lance) et la formation de la scorie.

Pour 16 coulées pour lesquelles nous disposons d'échantillons prélevés en cours de soufflage, nous avons, dans un diagramme ternaire (CaO , P_{205} , FeO) examiné l'évolution de la scorie au cours du soufflage. On a constaté que pour les coulées à décarburation initiale lente, on est en présence d'une scorie de composition donnée dès la 5ème minute ; alors que pour les coulées à décarburation plus rapide, on n'atteint cette composition que vers la 11ème minute.

Par ailleurs, grâce à la programmation de notre modèle statique sur un calculateur analogique, nous avons pu, pour chaque instant du soufflage auquel nous avons prélevé des échantillons, calculer certaines grandeurs caractéristiques (poids de scorie formée, phosphore éliminé, etc...). Nous avons ainsi pu montrer que les coulées à vitesse de décarburation initiale plus lente conduisent à une redissolution plus rapide de la scorie recyclée.

Une exploitation plus complète des données a ensuite montré que l'état de la scorie formée au cours du soufflage, c'est-à-dire sa composition et son poids, pouvait être décrit d'une façon univoque à l'aide d'un seul paramètre, à savoir le volume d'oxygène qui, après décarburation (par ailleurs mesurée), est resté disponible pour la scorie.

On s'aperçoit ainsi que pour des conditions de soufflage différentes, il est possible d'atteindre un même état de scorie, c'est-à-dire, en particulier, un même potentiel d'oxydation pour des teneurs en carbone dans le bain différentes. Dans certains cas, cet état de choses peut conduire à des déséquilibres dangereux (débordement) entre les états d'oxydation de la scorie et du métal .

Par ailleurs, bien que ne disposant que de peu d'informations expérimentales en ce qui concerne les débordements, on a constaté que, dans le cas du convertisseur 1 de Chertal, la scorie atteint un état nécessitant une action sur la lance lorsqu'elle contient 4.000 kg d'oxygène (son poids à ce moment est d'environ 17 tonnes).

R E F E R E N C E S

- (1) H. VOLL, D. RAMELOT,
Détermination de la vitesse de décarburation par
mesure de la température des fumées.
- (2) H. VOLL,
Comportement dynamique du convertisseur 1 de l'acié-
rie LD-AC de Chertal.
- (3) P. DAUBY, N. BACH, P. HOFMANN, P. NILLES,
Charge calculation in Steelmaking,
C.R.M. Metallurgical Reports n° 15.
- (4) E. DENIS, F. MERKER,
Réactions à l'enfournement de la fonte phosphoreuse
avec la scorie recyclée.
C.I.T., mai 1971, p. 1257 - 1278.
- (5) H. KNÜPPEL, F. OETERS,
Das Phosphor-Sauerstoff-Gleichgewicht zwischen
flüssigem Eisen und kalkgesättigten Phosphatschlacken,
Stahl und Eisen, 81, Heft 22, 1961, p. 1437 - 1449.
- (6) P.V. RIBOUD, H. MARGOT-MARETTE, P. KOZAKEVITCH,
The physico-chemistry of refining,
5th LD Working Meeting in Düsseldorf, April 1969.
- (7) H. VOLL, G. BALTHAZART,
Etude du fonctionnement du distributeur de chaux de
la cornue 1 de l'aciérie LD-AC de Chertal en vue de
son automatisation.
- (8) P. NILLES, E. DENIS,
Problems of Oxygen Transfer in BOF Steelmaking,
Journal of Metals, July 1969, p. 74-79.
- (9) M. BOUDIN, H. JACOBS, P. DAUBY, P. NILLES,
Le contrôle de l'opération Thomas,
C.R.M. Metallurgical Reports n° 6, 1966, p. 27 - 38.

- (10) J. EIBL, M. TRUPPE,
Neue Entwicklung auf dem Gebiete der kontinuierlichen
Messung der Badtemperatur in LD-Tiegeln und ihre Bedeu-
tung für die Stahlerzeugung.
Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 114. Jahrgang,
Heft 11, (1969), p. 390-396.
- (11) F. MERKER,
Bilan thermique en continu du soufflage LD
Rapport interne du C.R.M.
- (12) A. DECKER,
Archiv für das Eisenhüttenwesen, 28, (1957) Heft 2,
p. 57-64.
- (13) J. DOI,
Ten years of LD Progress in Japan,
5th LD Working Meeting, Düsseldorf, April 1969.
- (14) R. SCIMAR,
The physico-chemical equilibrium of phosphorus in
Steelmaking,
Steel and Coal, 16th and 23rd March 1962.
- (15) P. COHEUR, A. DECKER,
Sur la physico-chimie de la conversion des fontes et
sur la dynamique des fluides dans le soufflage par le
haut,
Congrès International sur les Aciéries à l'Oxygène,
Le Touquet, sept. 1963.
- (16) H. MARGOT-MARETTE, P.V. RIBOUD,
Etude des températures de liquidus du système CaO,
P₂O₅.SiO₂.Oxyde de fer, Coupe à 15 et à 30 % FeO.
Mémoires Scientifiques, Rev. Métallurgie, LXIII, n° 11,
1960, p. 959 à 967 et LXVI, n° 7-8, 1969, p. 591 à 601

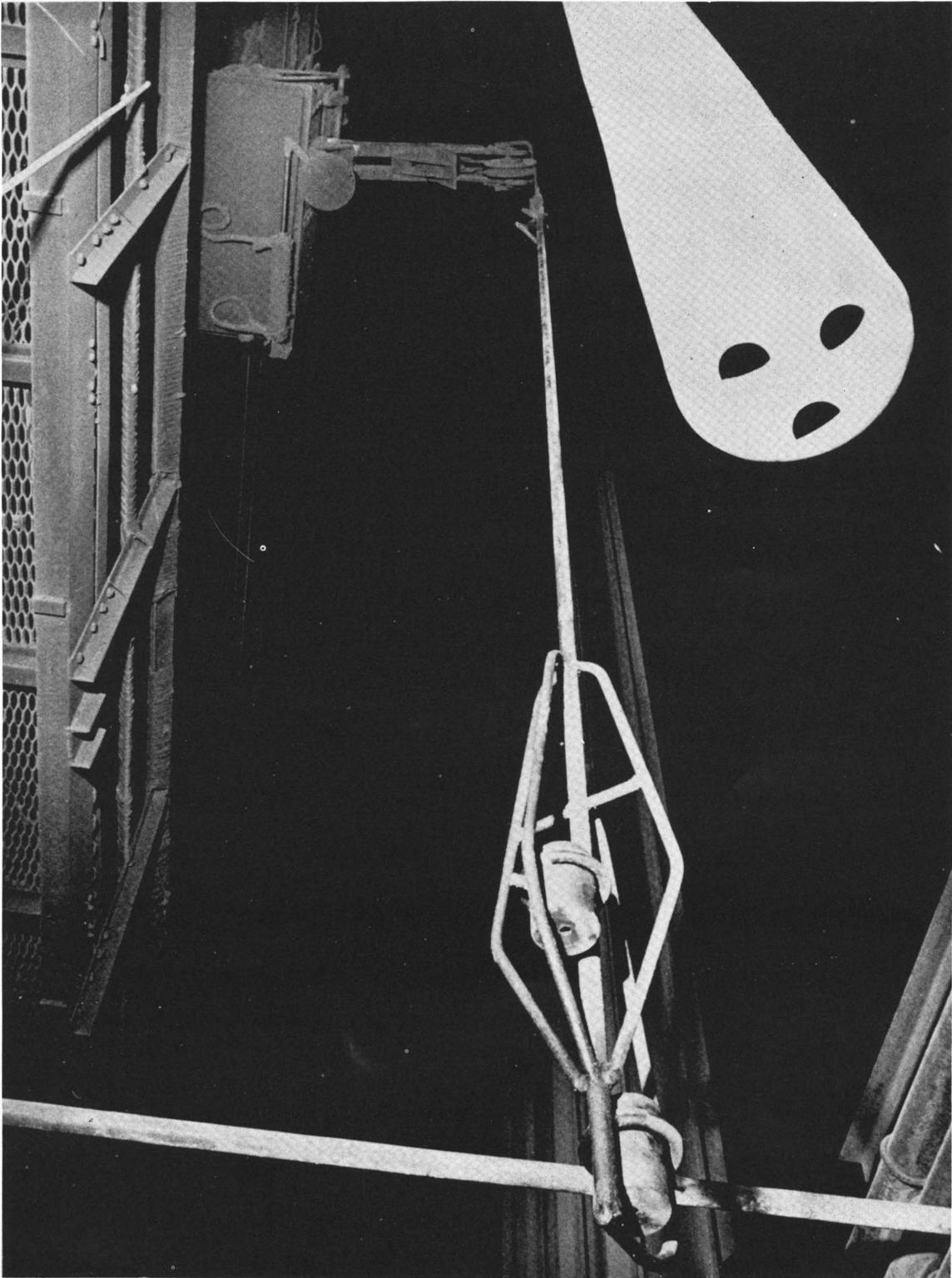


Fig. 1 · La tige de prélèvement d'échantillons
en cours de soufflage.

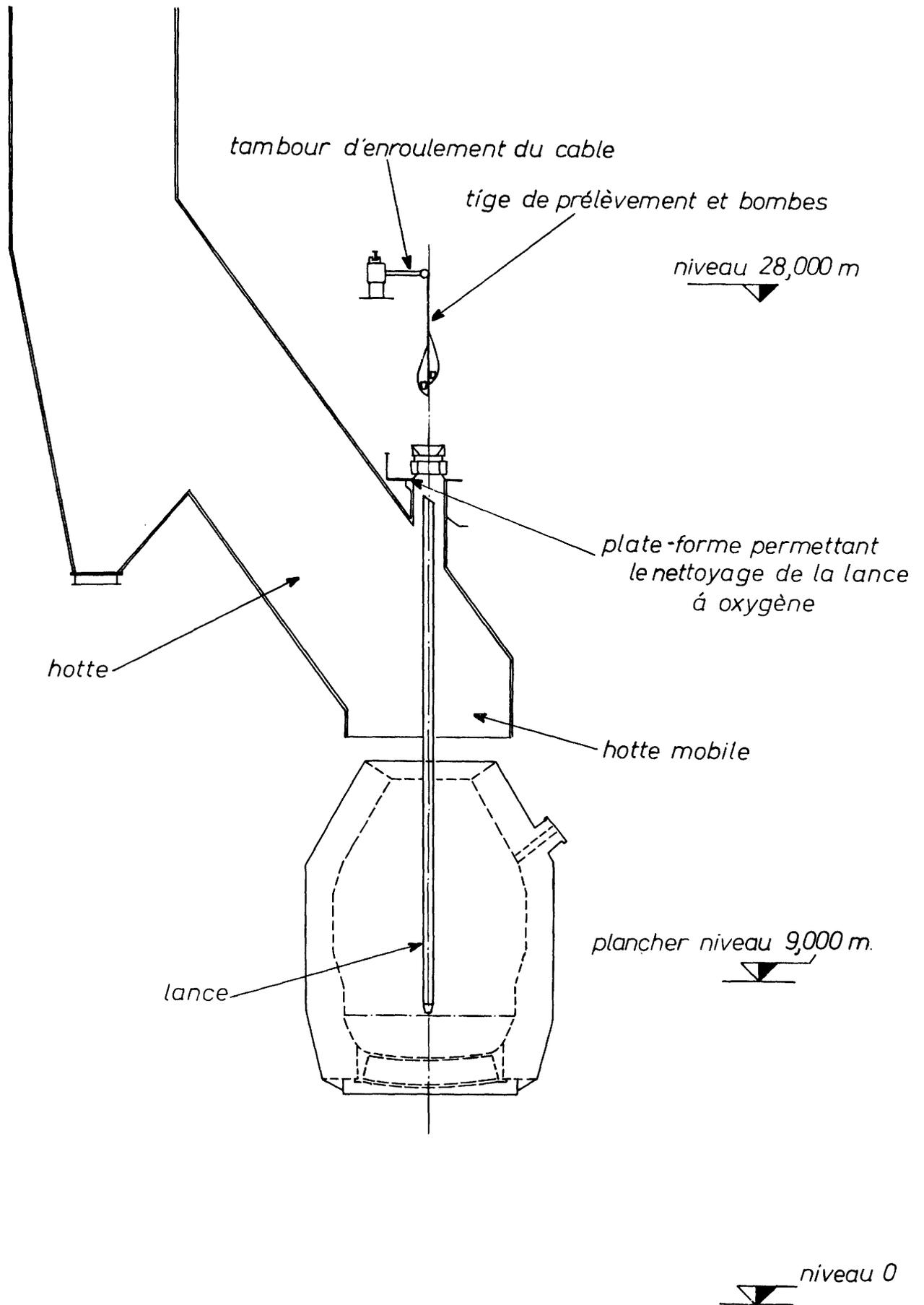


Fig. 2 : Localisation de l'installation de prélèvement

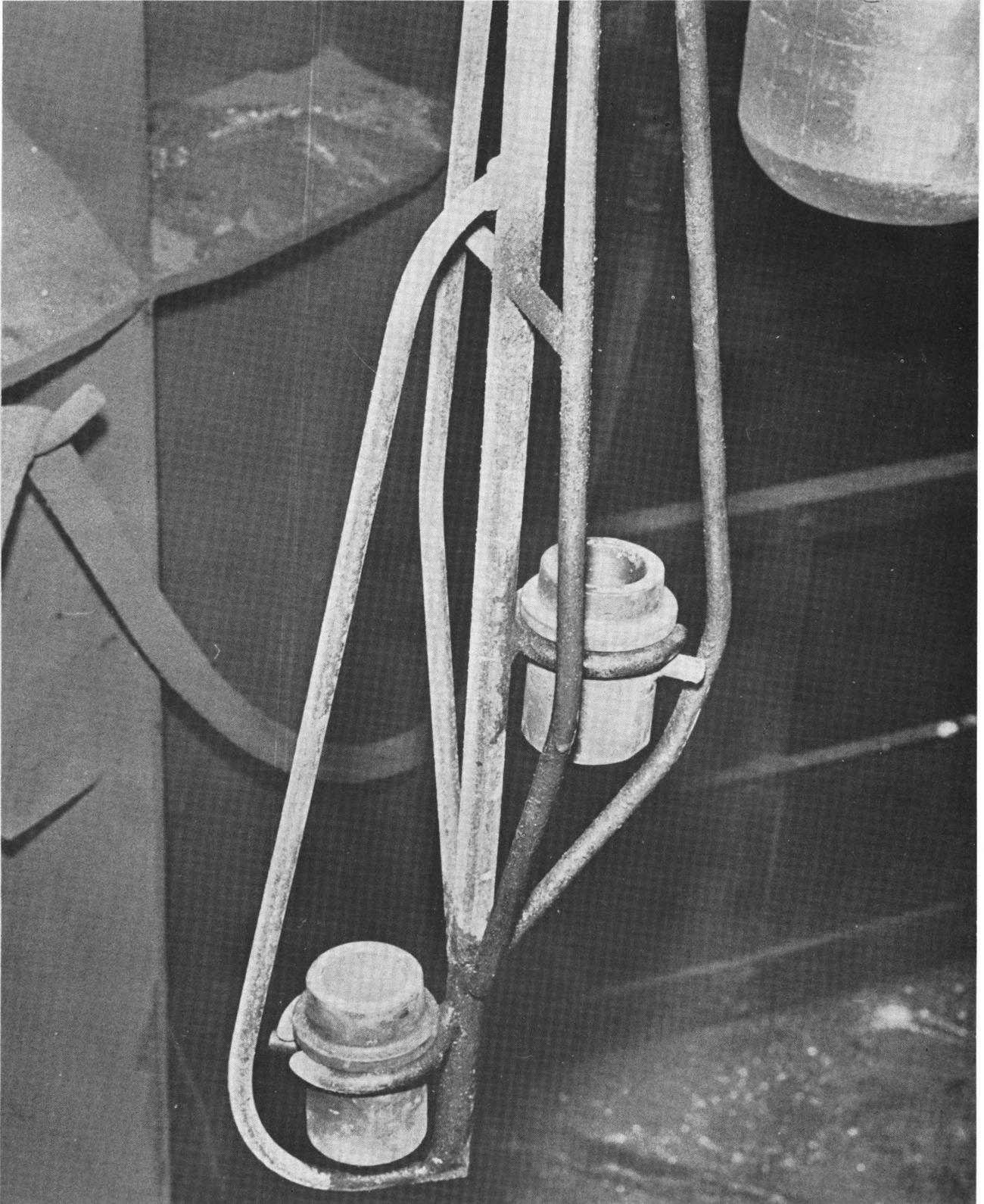


Fig. 3 : *Détail de la tige de prélèvement ;
La disposition des godets .*

C.R.M. - S 27/72

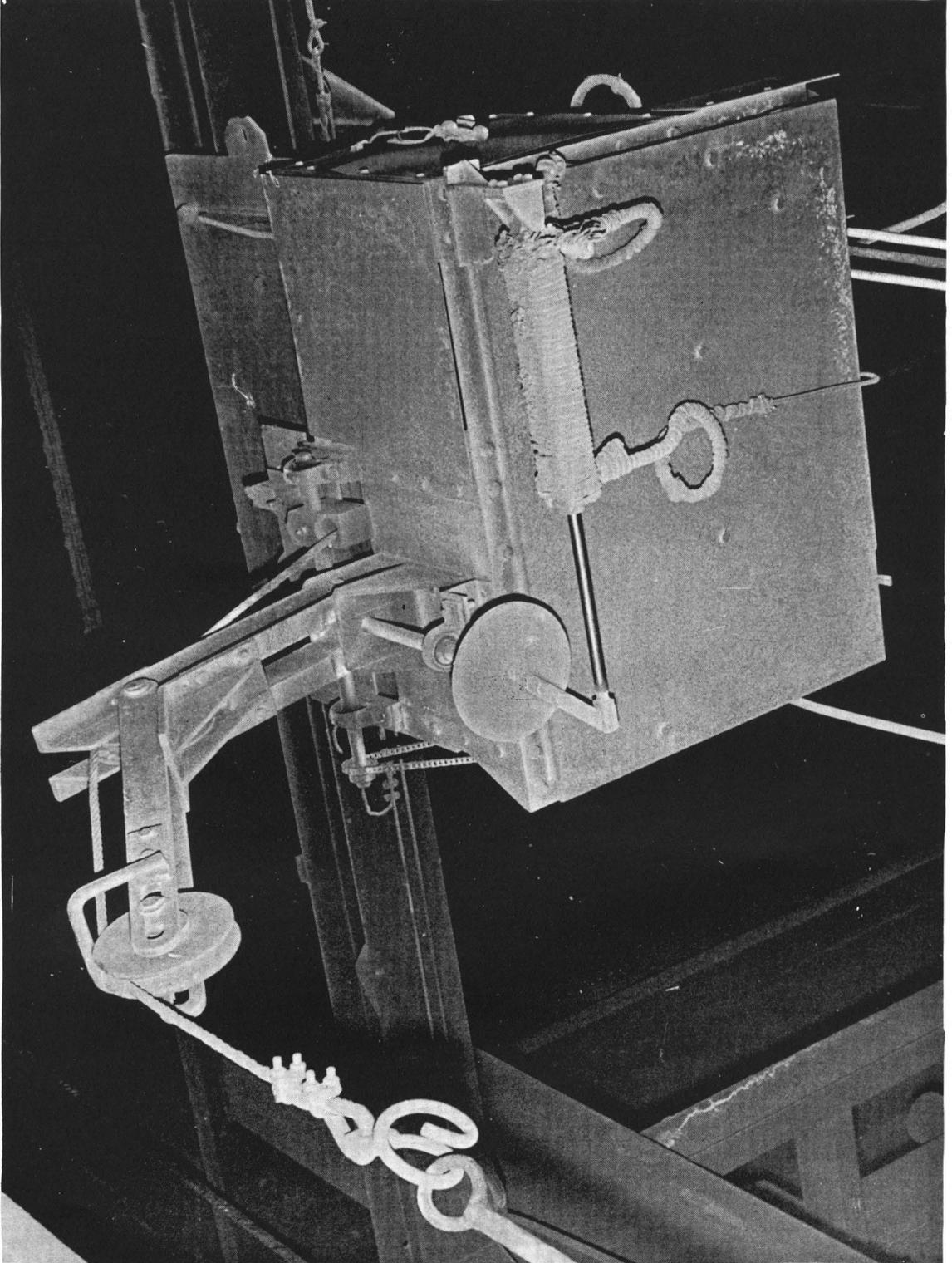


Fig. 4 : Le chariot et le système d'attache.

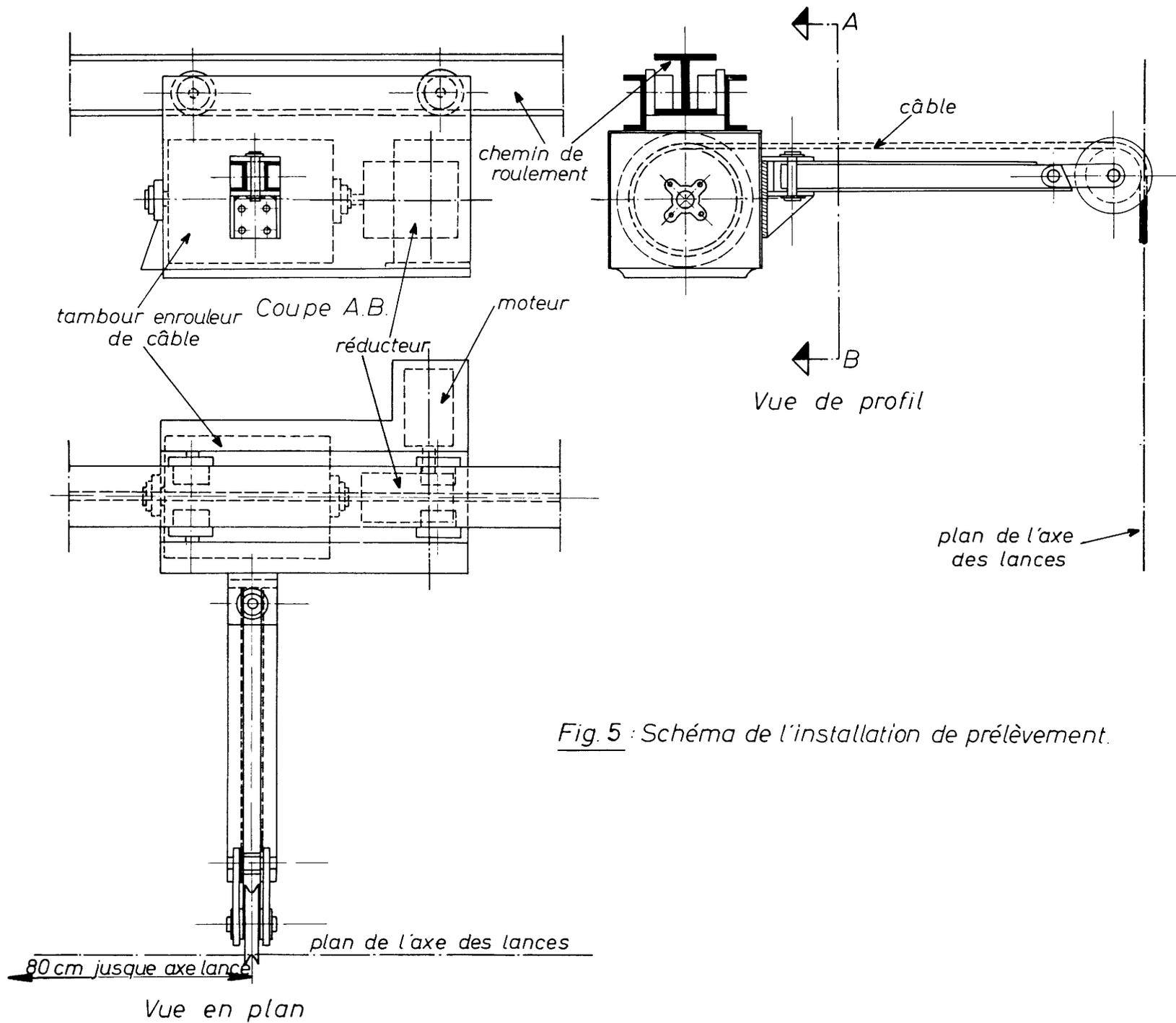


Fig. 5 : Schéma de l'installation de prélèvement.

C.R.M. - S 27/72.



Fig. 6 : *Echantillon d'émulsion prélevé sur une tige.*

% Fe tot. (labo A)

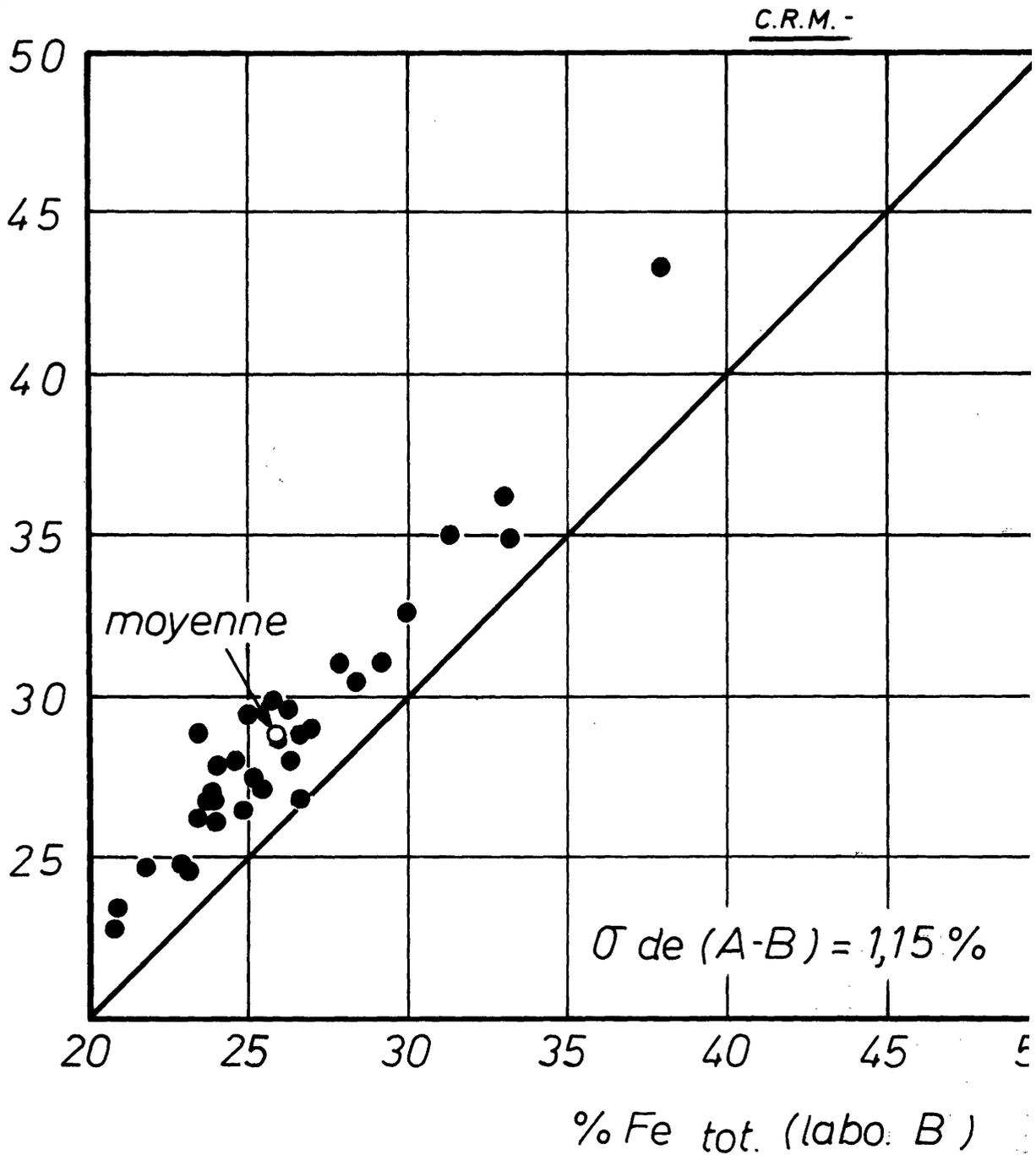


Fig. 8 : Comparaison des teneurs en Fe (scorie phase 3) fournies par deux laboratoires différents.

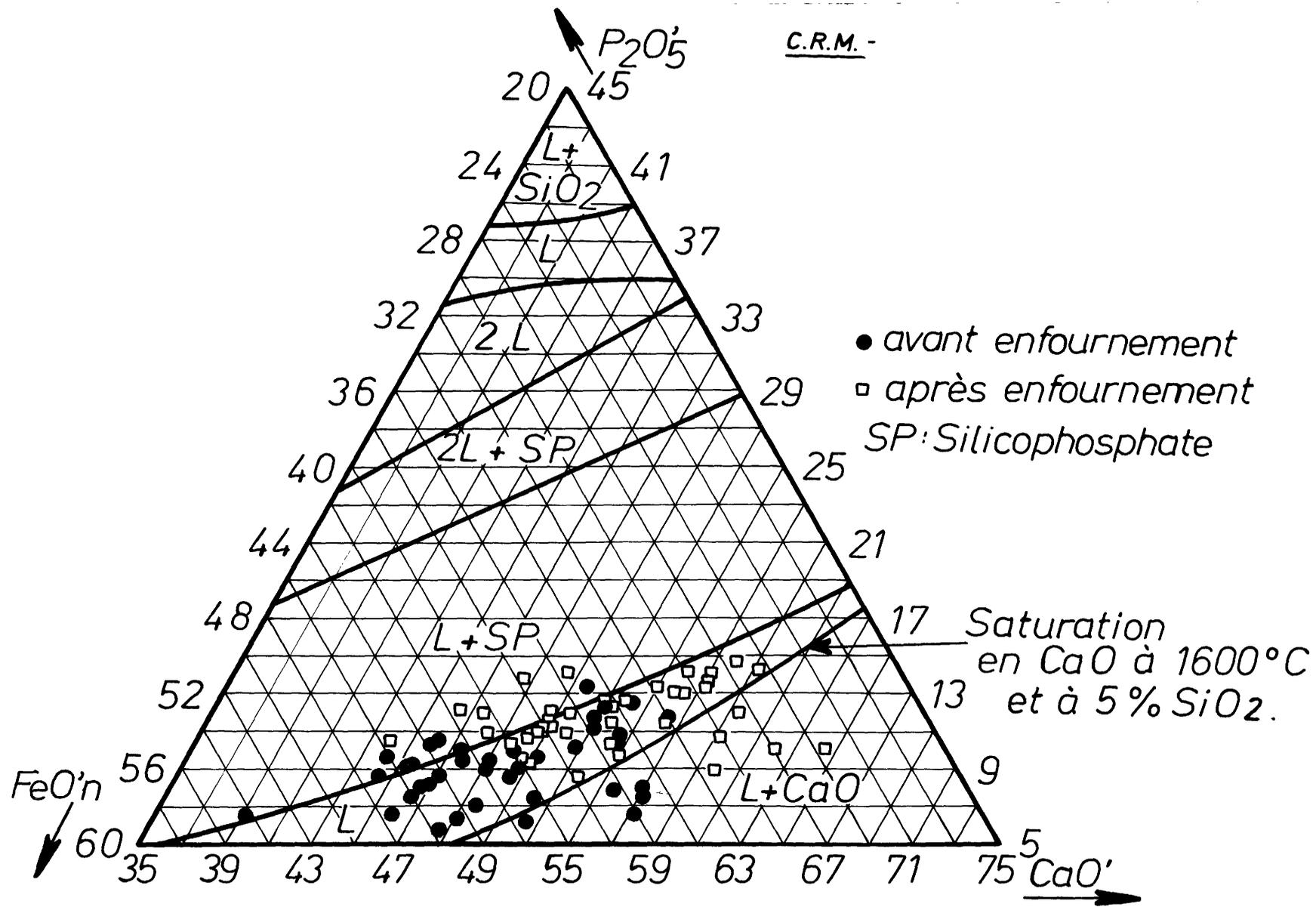


Fig. 9 : Situation de l'ensemble des scories LD-AC avant et après l'enfournement de la fonte.

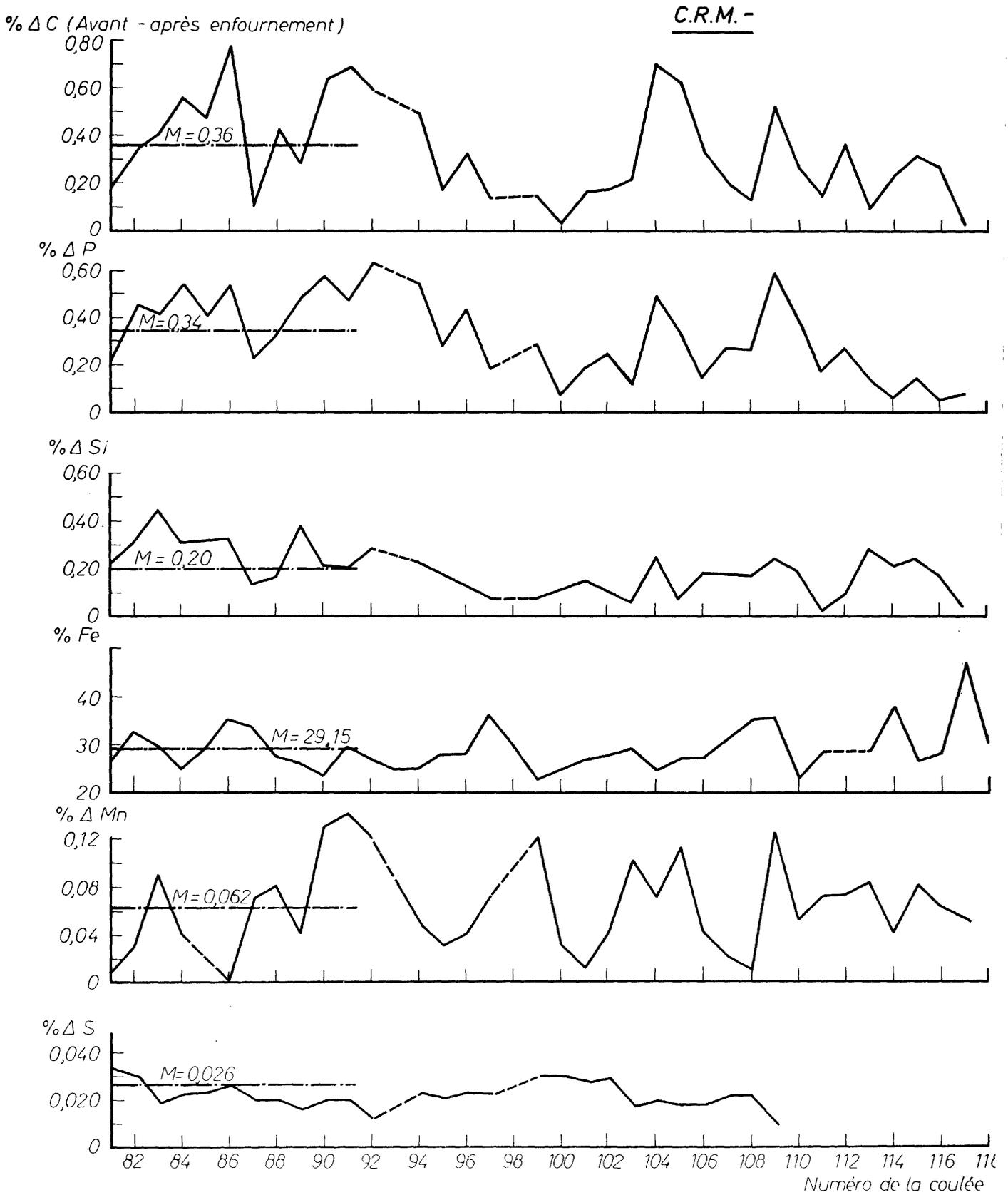
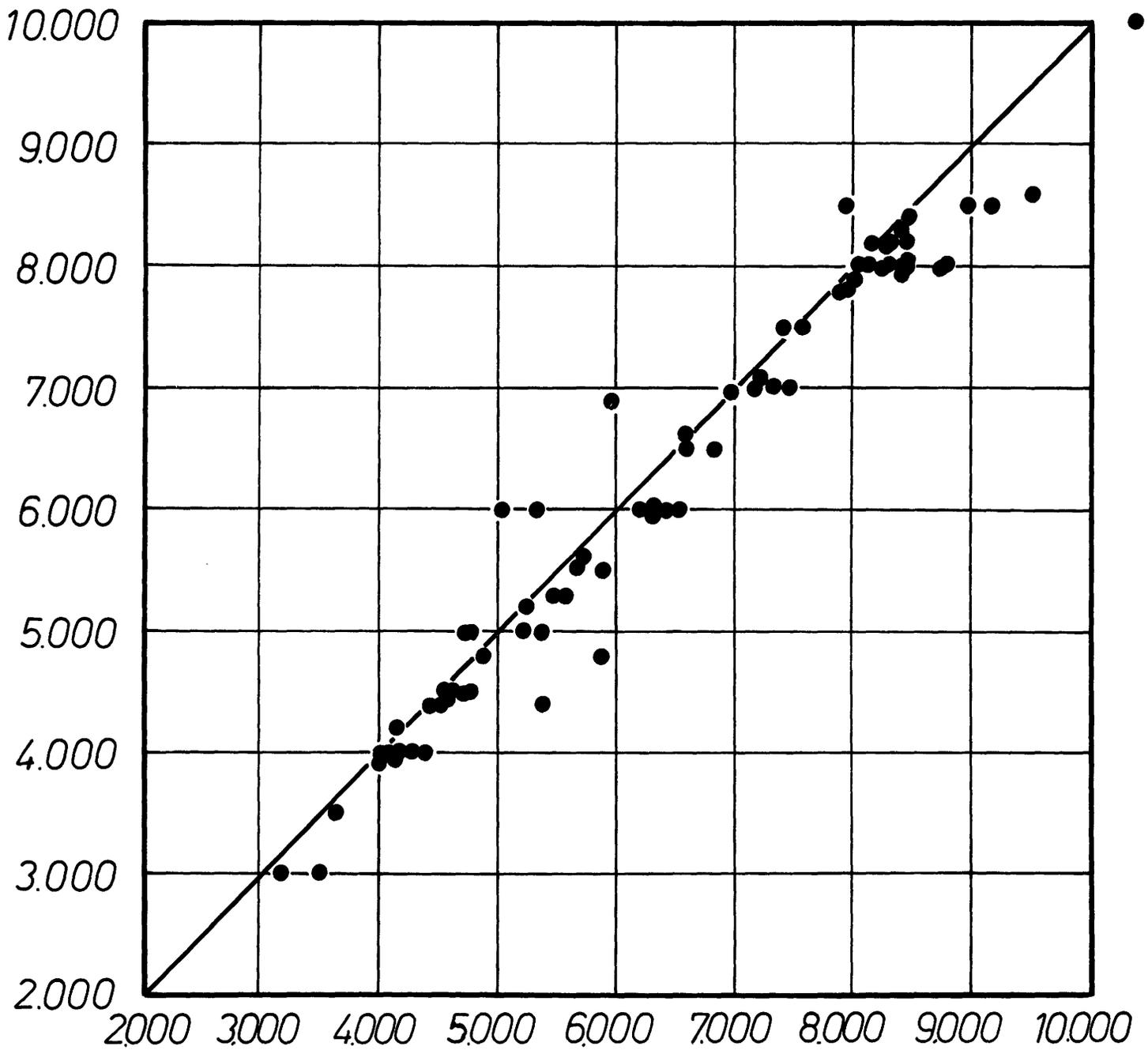


Fig.10: Ampleur des réactions accompagnant l'enfournement de la fonte liquide sur la scorie recyclée pour 38 coulées consécutives.

C.R.M. -

Poids de chaux en poudre interphone (kg)



Poids de chaux en poudre loggé (kg.)

Fig.11: Comparaison des poids de chaux communiqués par interphone à ceux enregistrés automatiquement. (phase 1.)

Poids de pailles interphone (kg)

C.R.M. -

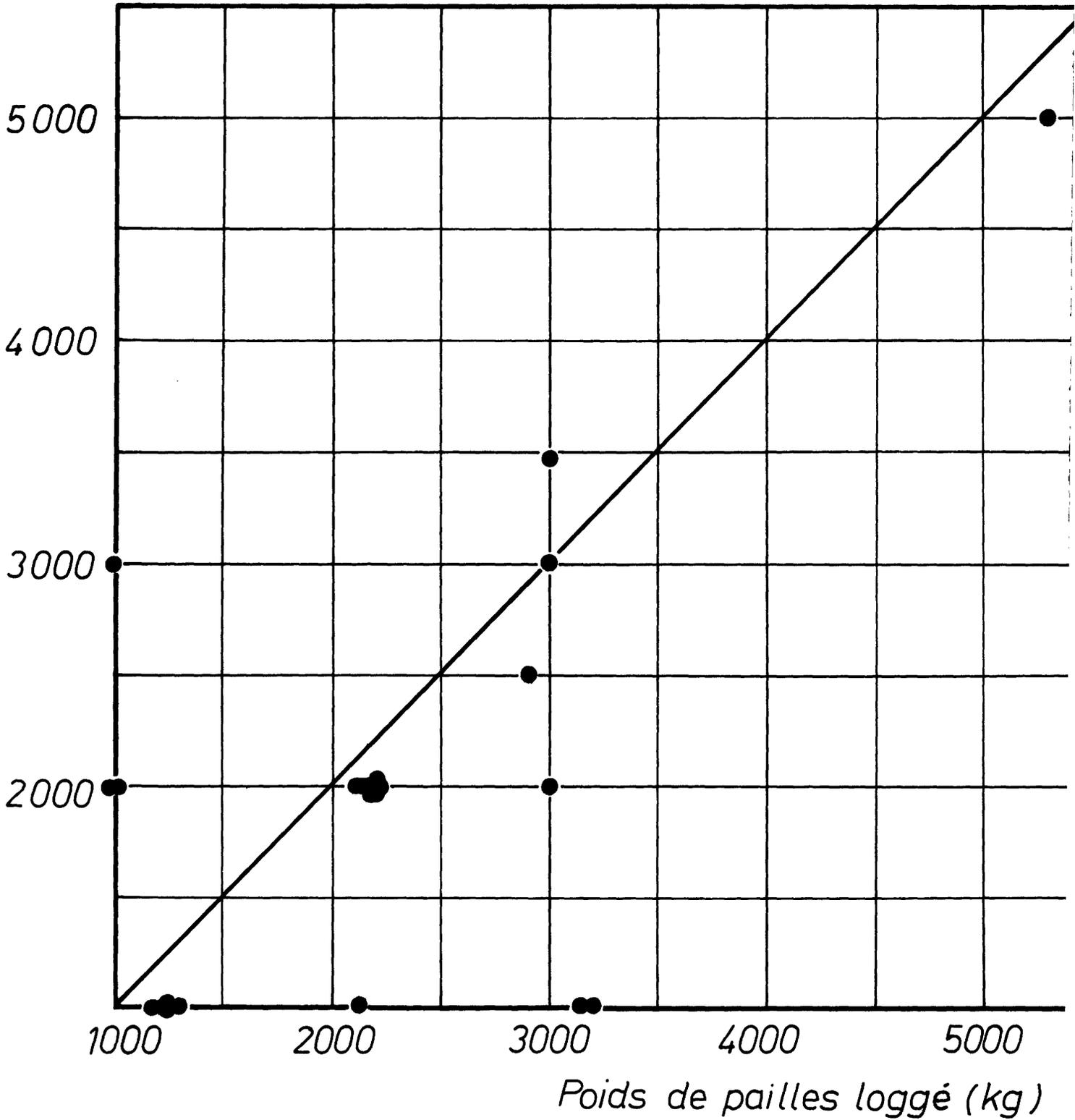


Fig.12: Comparaison des poids de pailles communiqués par interphone à ceux enregistrés automatiquement (phase 1)

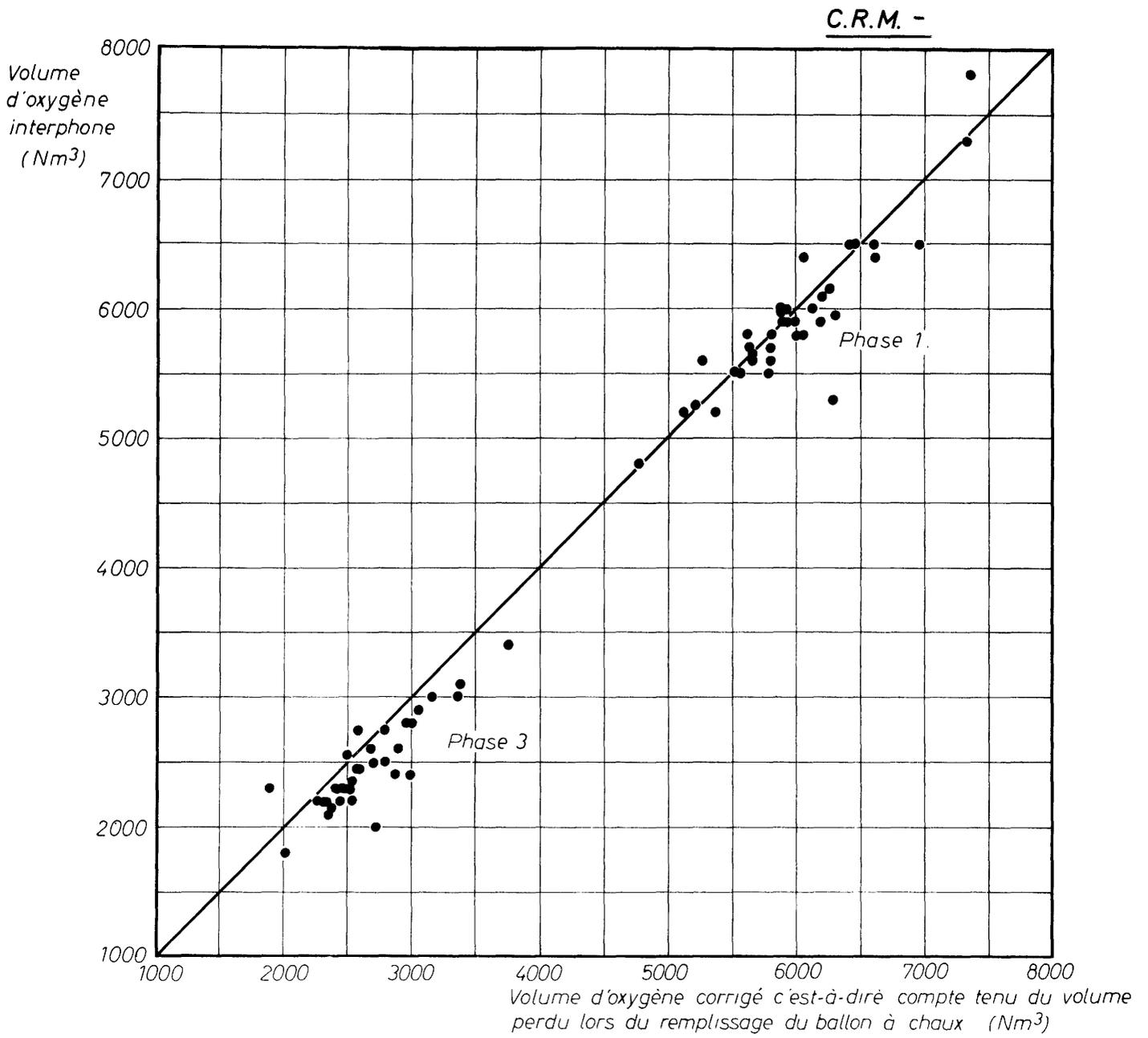


Fig 13 : Comparaison des volumes d'oxygène "interphone", et "corrigé", pour 38 coulées consécutives

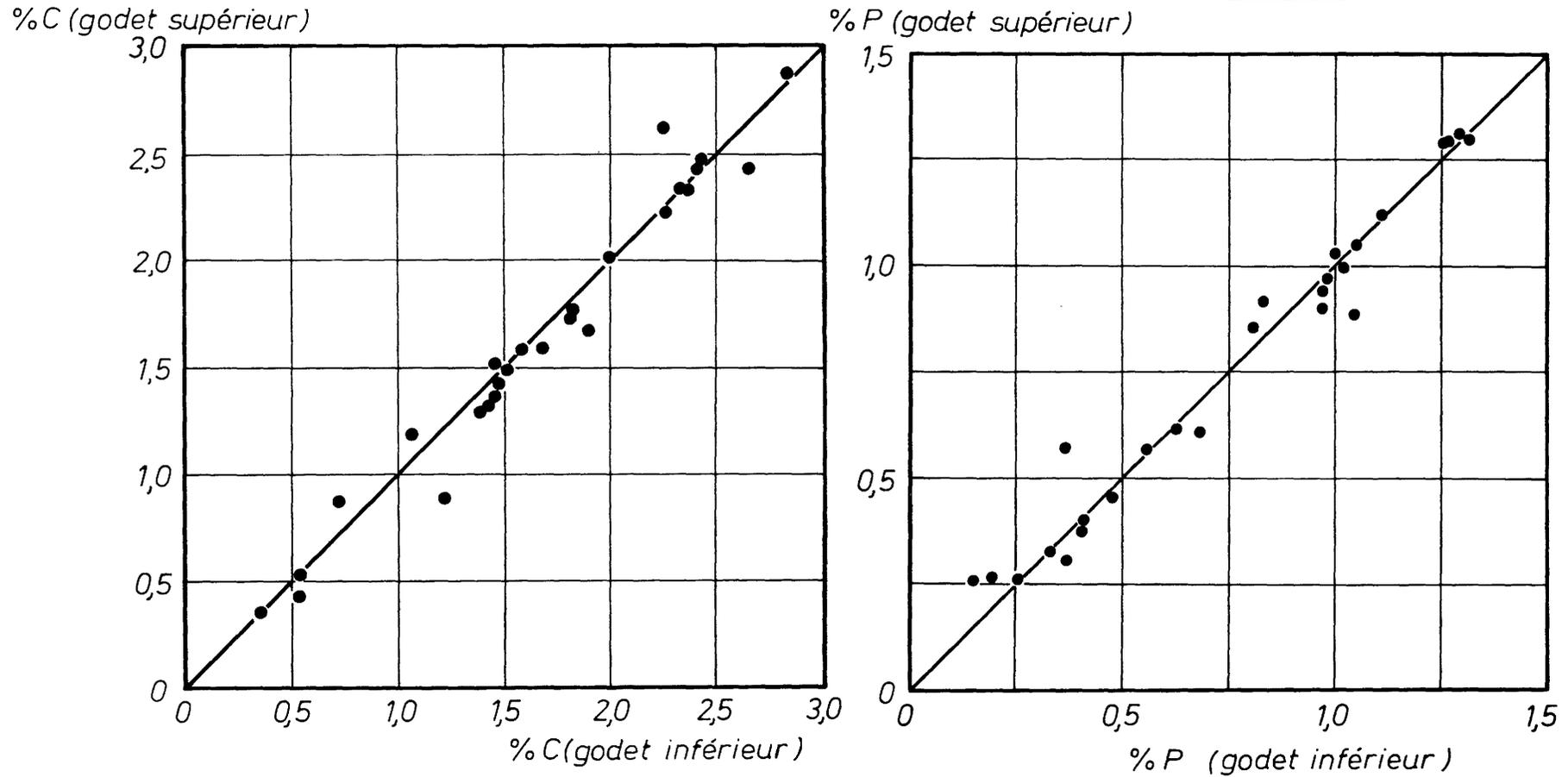
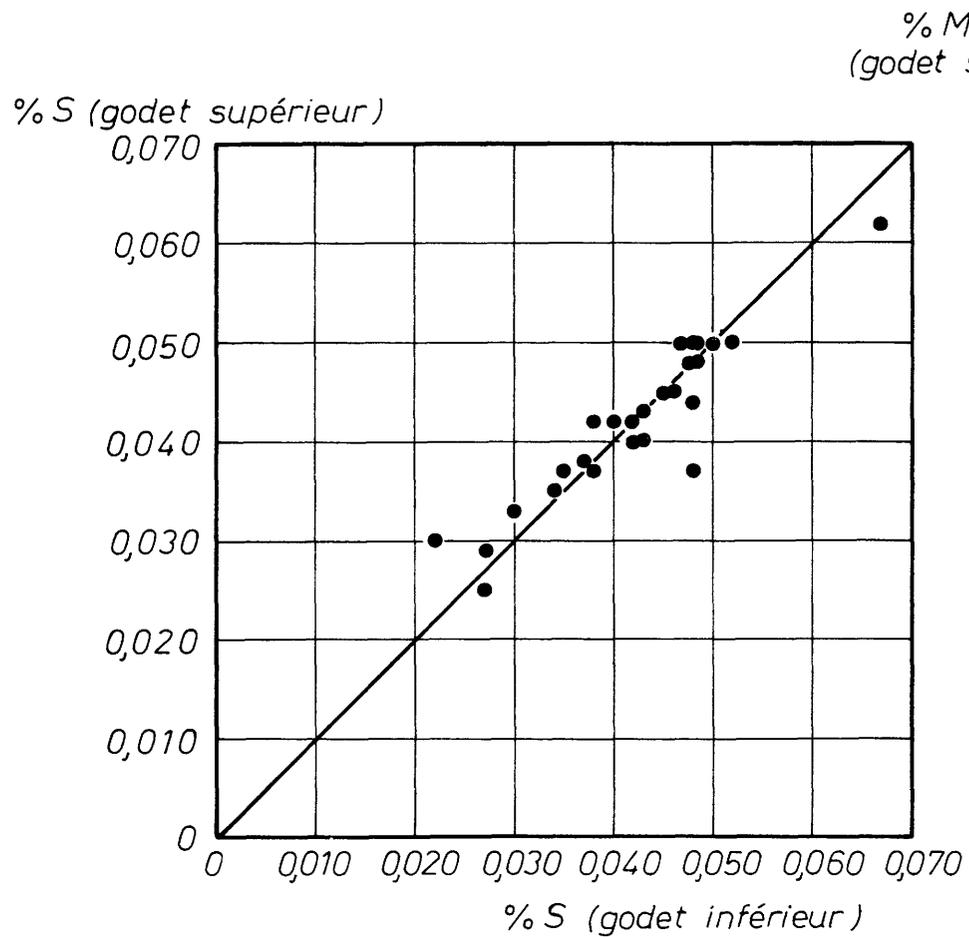


Fig.14: Prélèvements simultanés, en cours de soufflage, de deux échantillons d'acier. Comparaison des analyses.



% Mn
(godet supérieur)

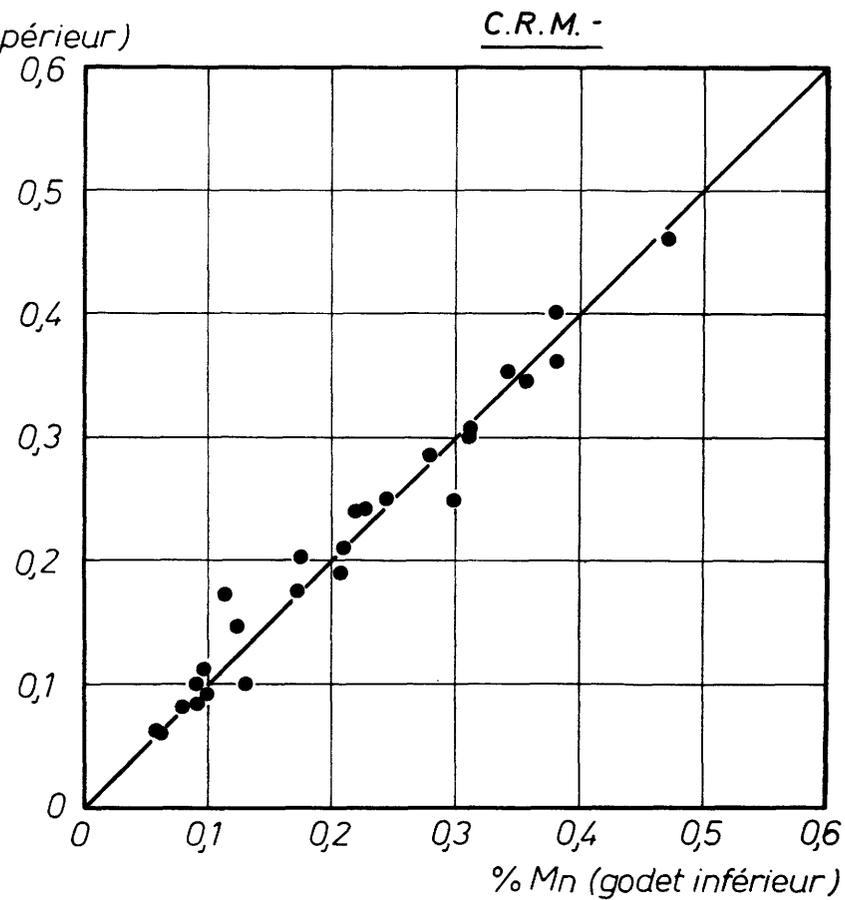


Fig. 15: Prélèvements simultanés, en cours de soufflage, de deux échantillons d'acier.
Comparaison des analyses.

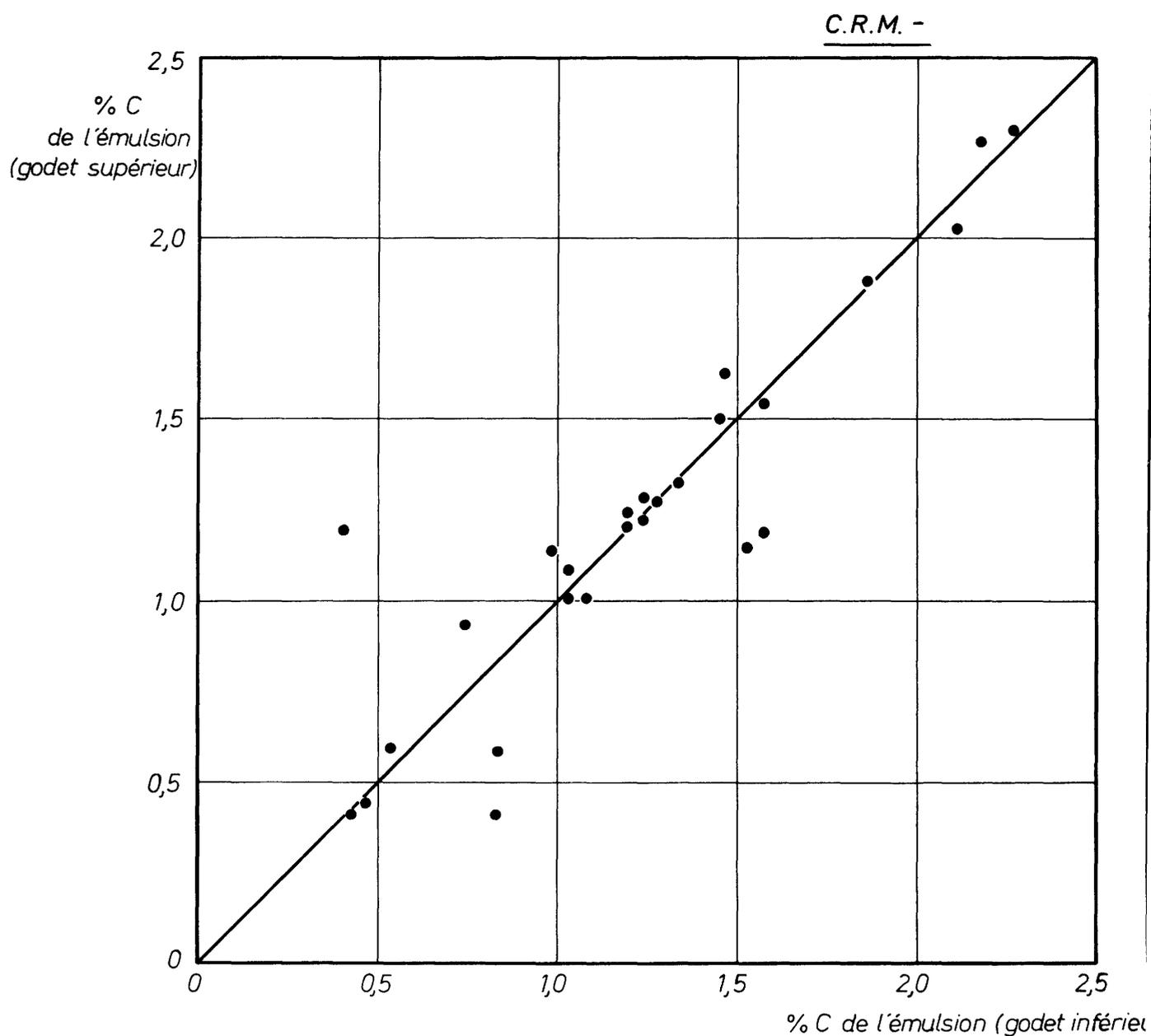


Fig. 16 : Prélèvement en cours de soufflage de deux échantillons d'émulsion métal-scoria
Comparaison des analyses.

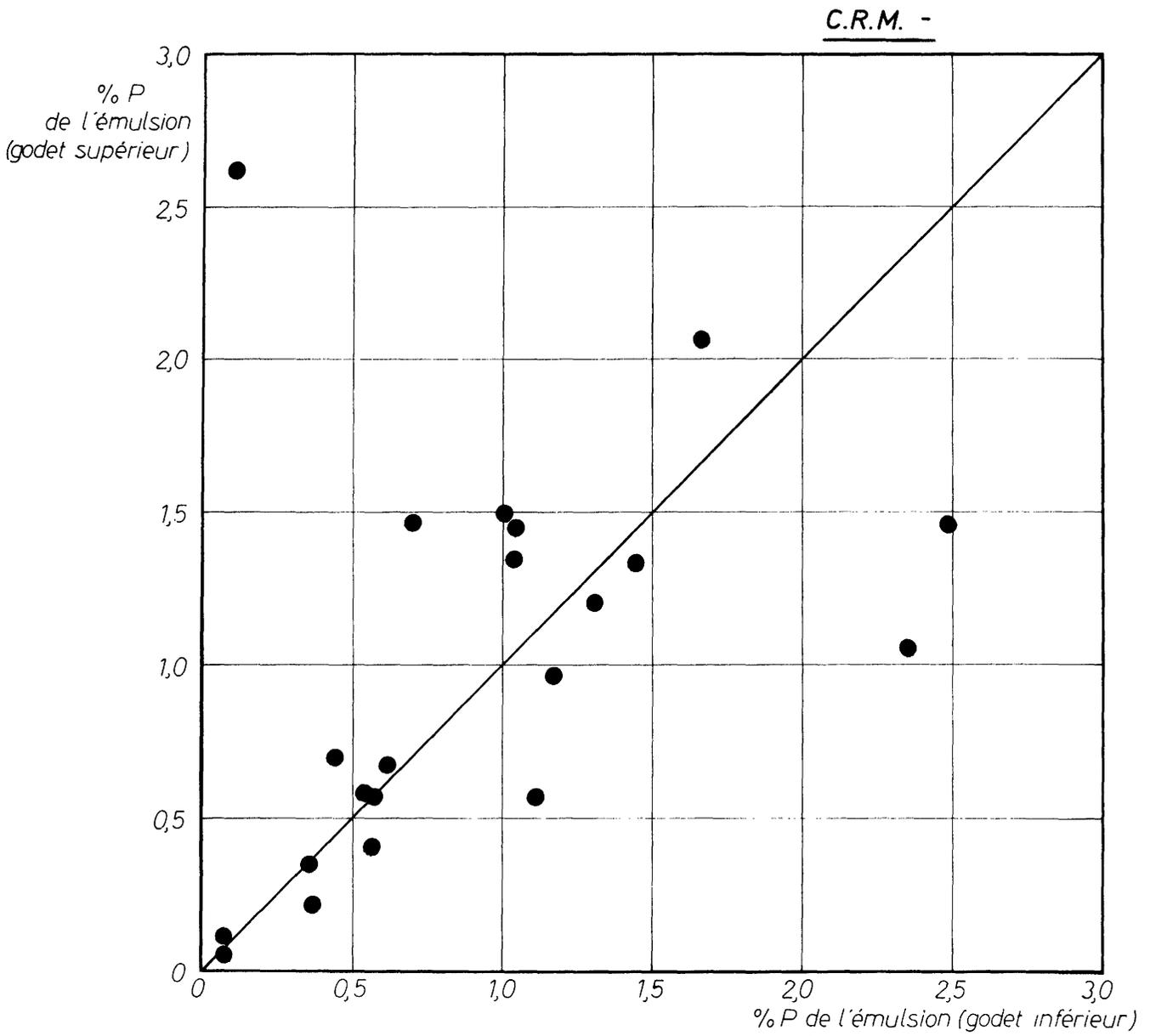


Fig. 17 Prélèvement en cours de soufflage de deux échantillons d'émulsion métal/scorie.
Comparaison des analyses.

%C de l'émulsion

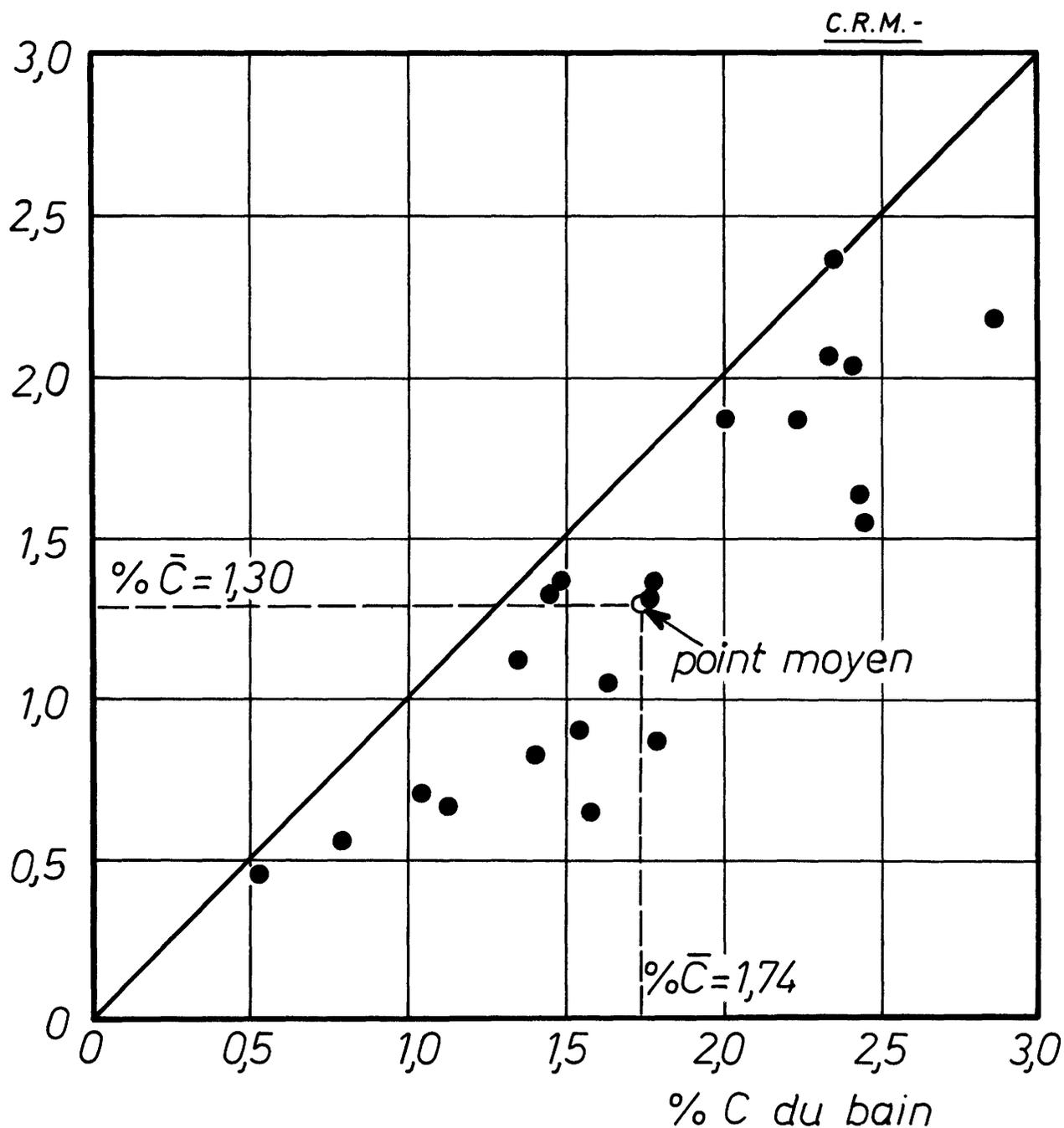
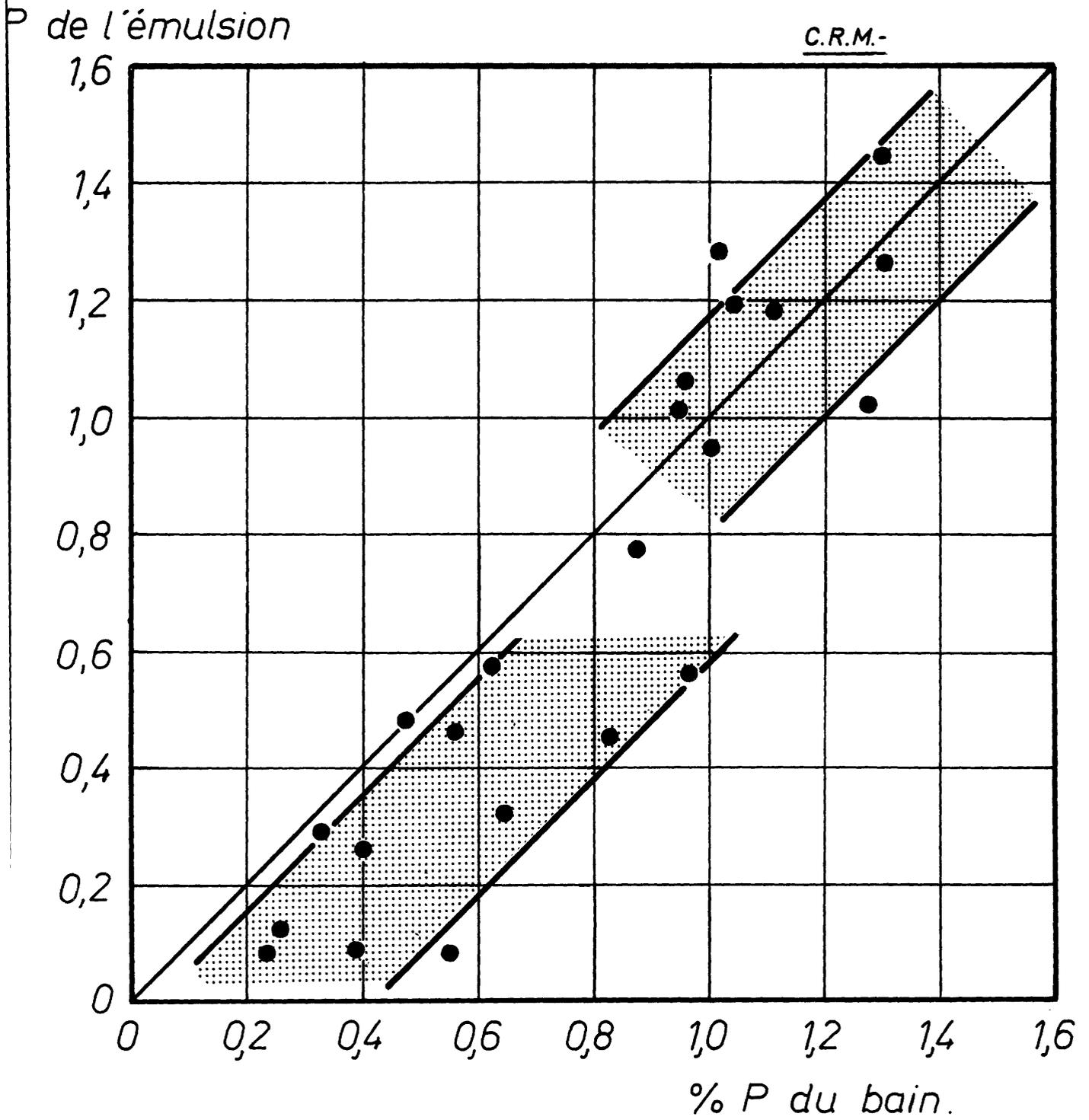


Fig.18 : Comparaison des teneurs en carbone dosées dans bain métallique et dans l'émulsion métal/scorie.



g. 19 : Comparaison des teneurs en phosphore dosées dans le bain métallique et dans l'émulsion métal /scorie.

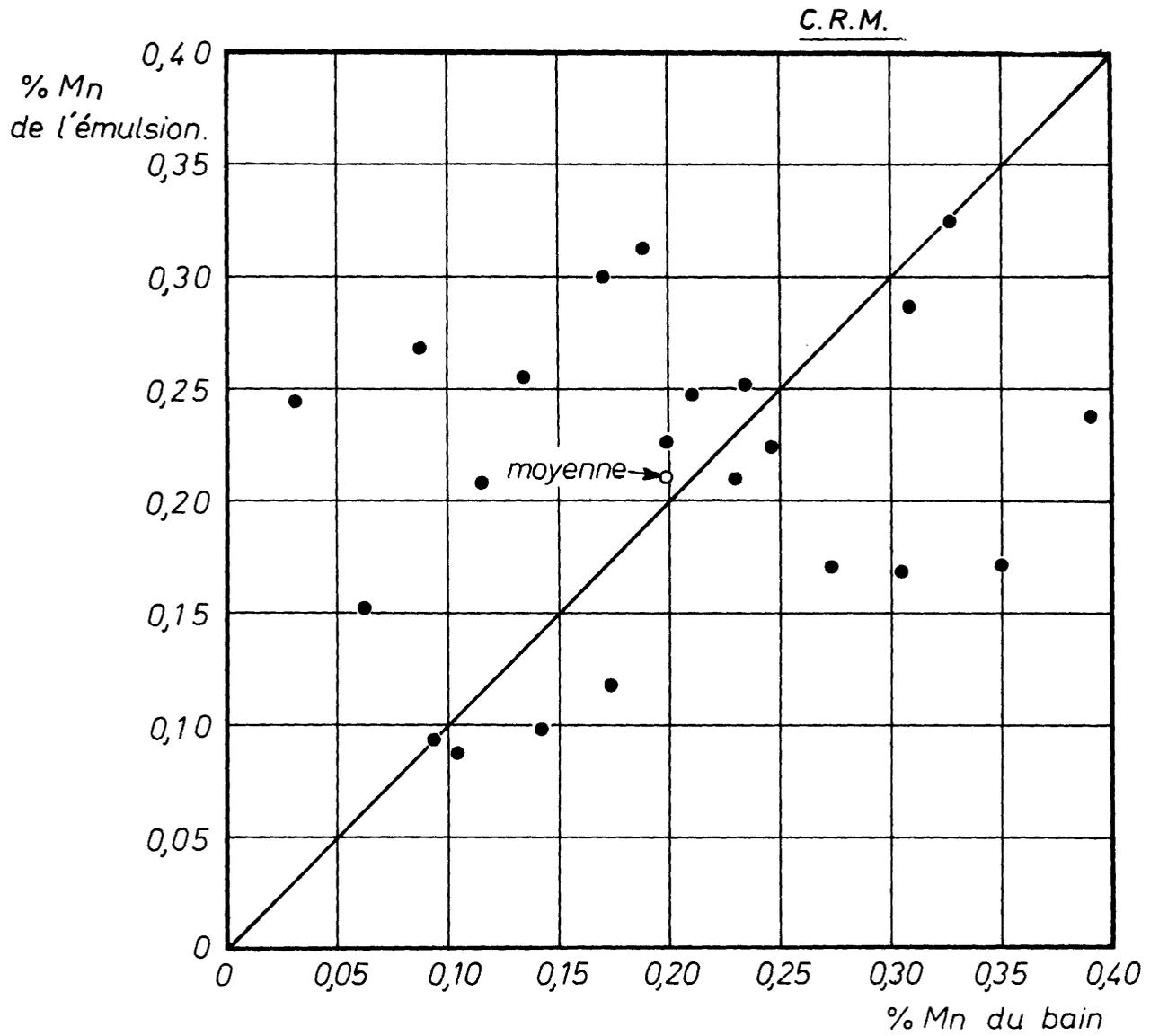


Fig. 20: Comparaison des teneurs en Manganèse dosées dans le bain métallique et dans l'émulsion métal /scorie.

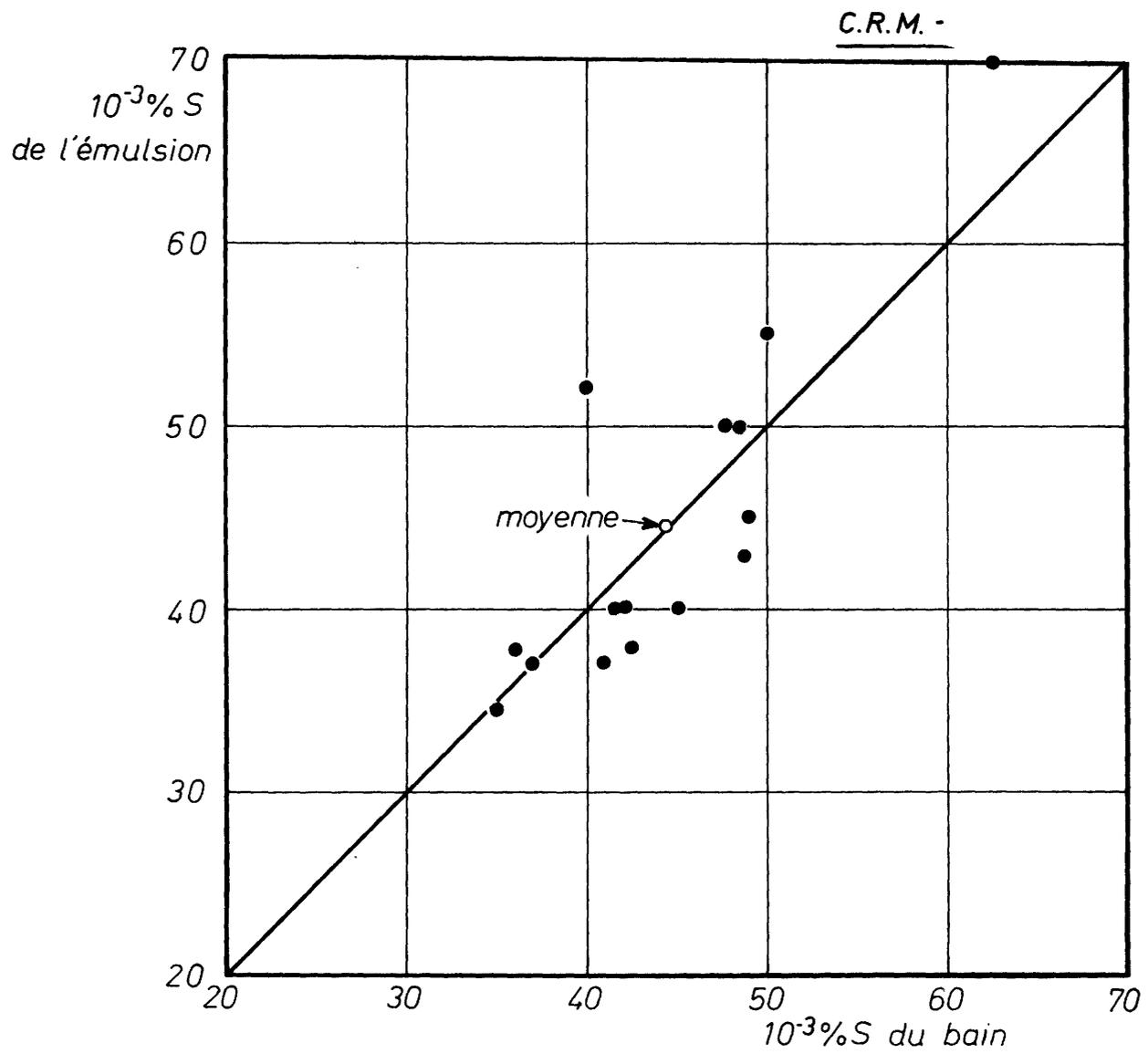


Fig. 21 : Comparaison des teneurs en soufre dans le bain métallique et dans l'émulsion métal/scorie.

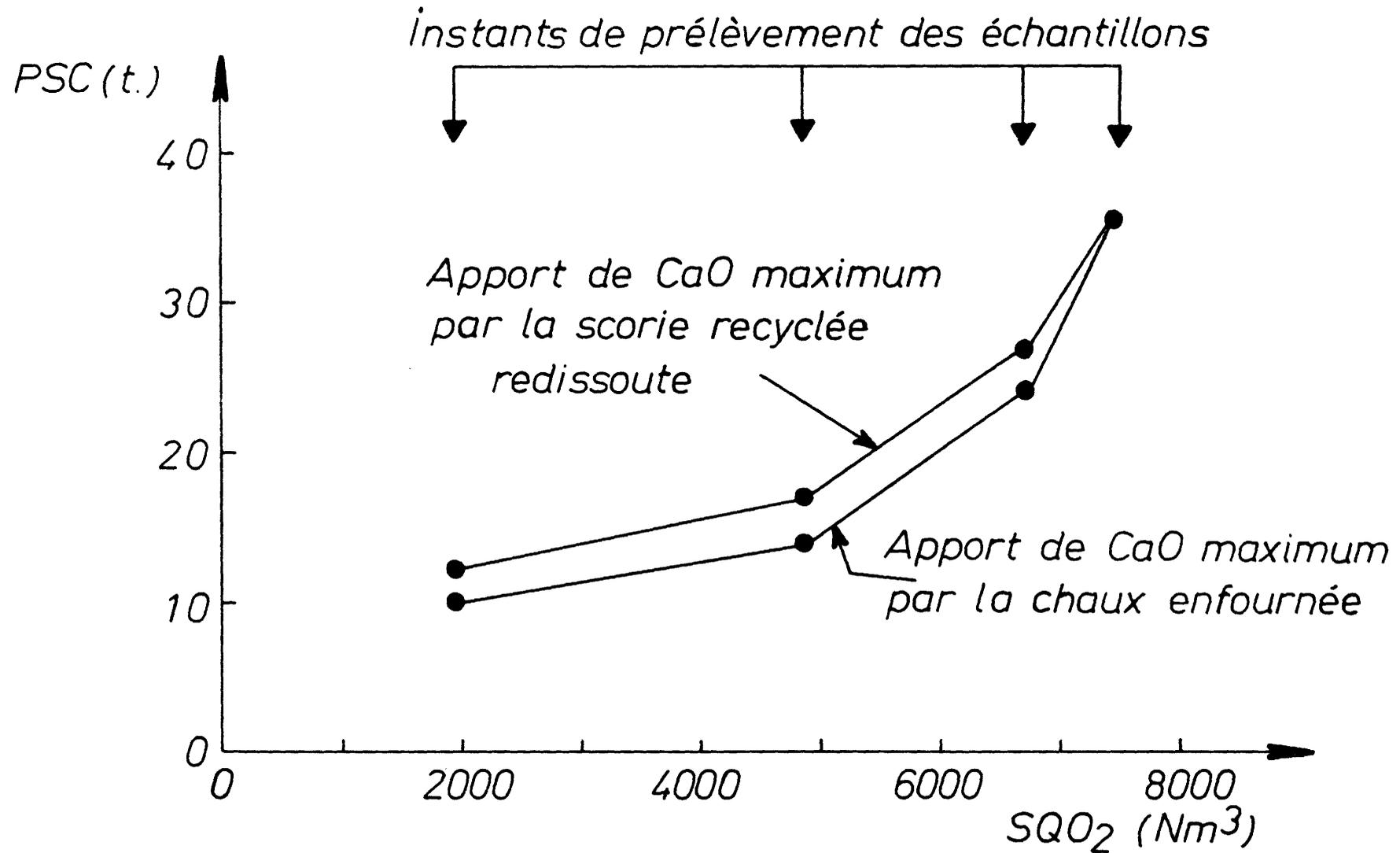


Fig. 22 : Evolution du poids de scorie formée en fonction du volume d'oxygène soufflé (Coulée 44.)

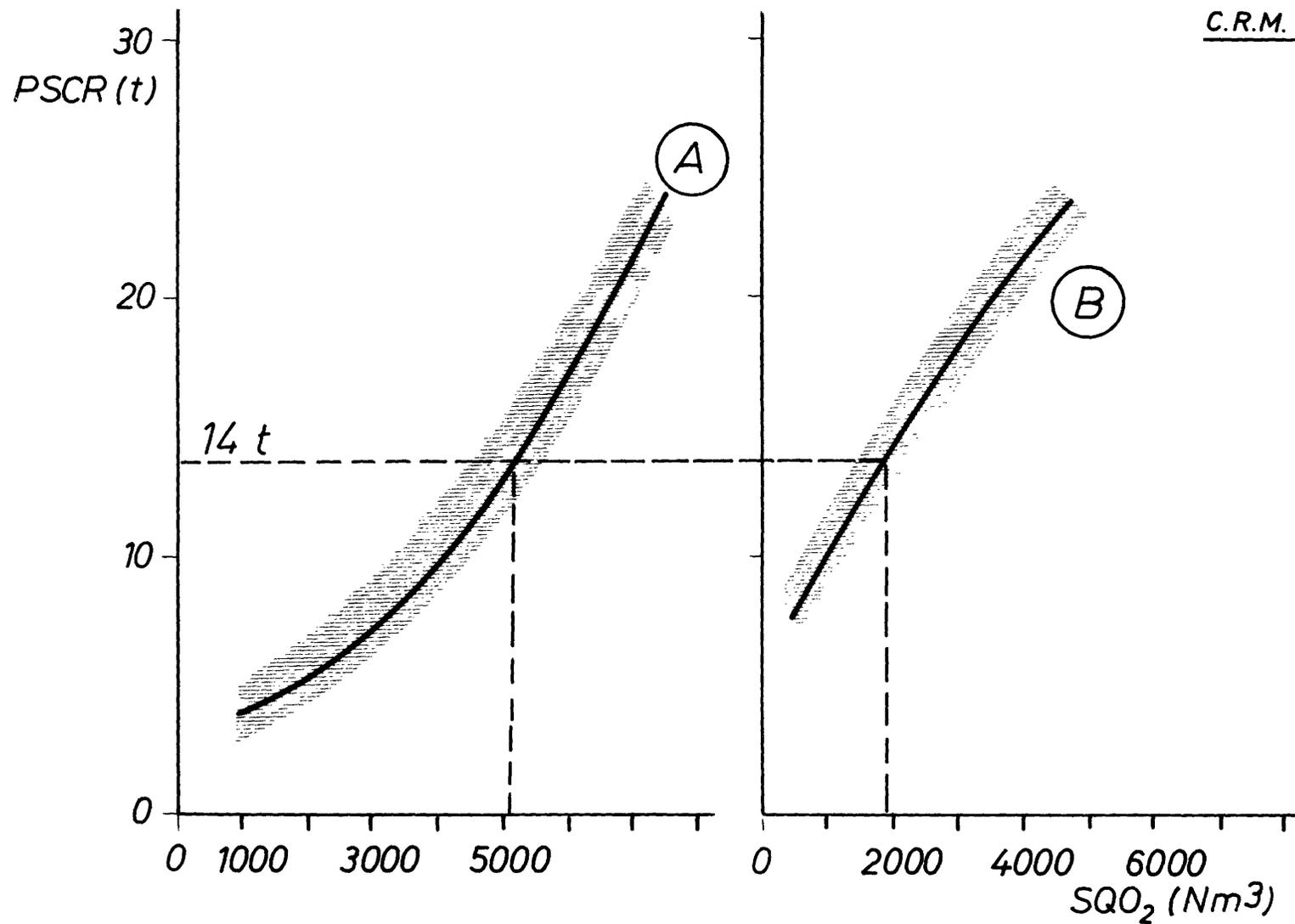


Fig.23: Evolution du poids de la scorie recyclée remise en solution (PSCR) en fonction du volume d'oxygène soufflé (SQO₂).

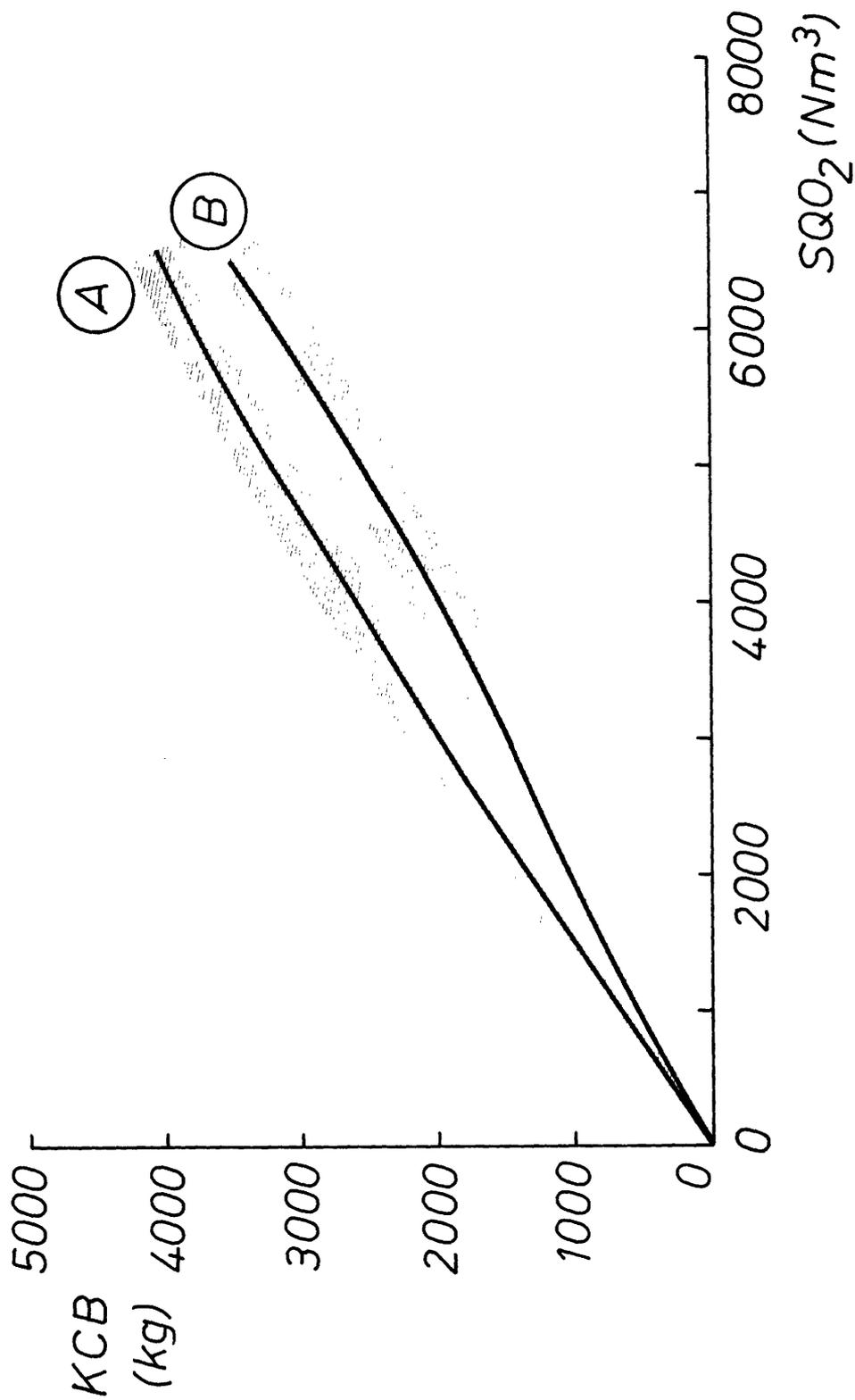


Fig.24 : Evolution du carbone éliminé(KCB) en fonction de la quantité d'oxygène soufflé.

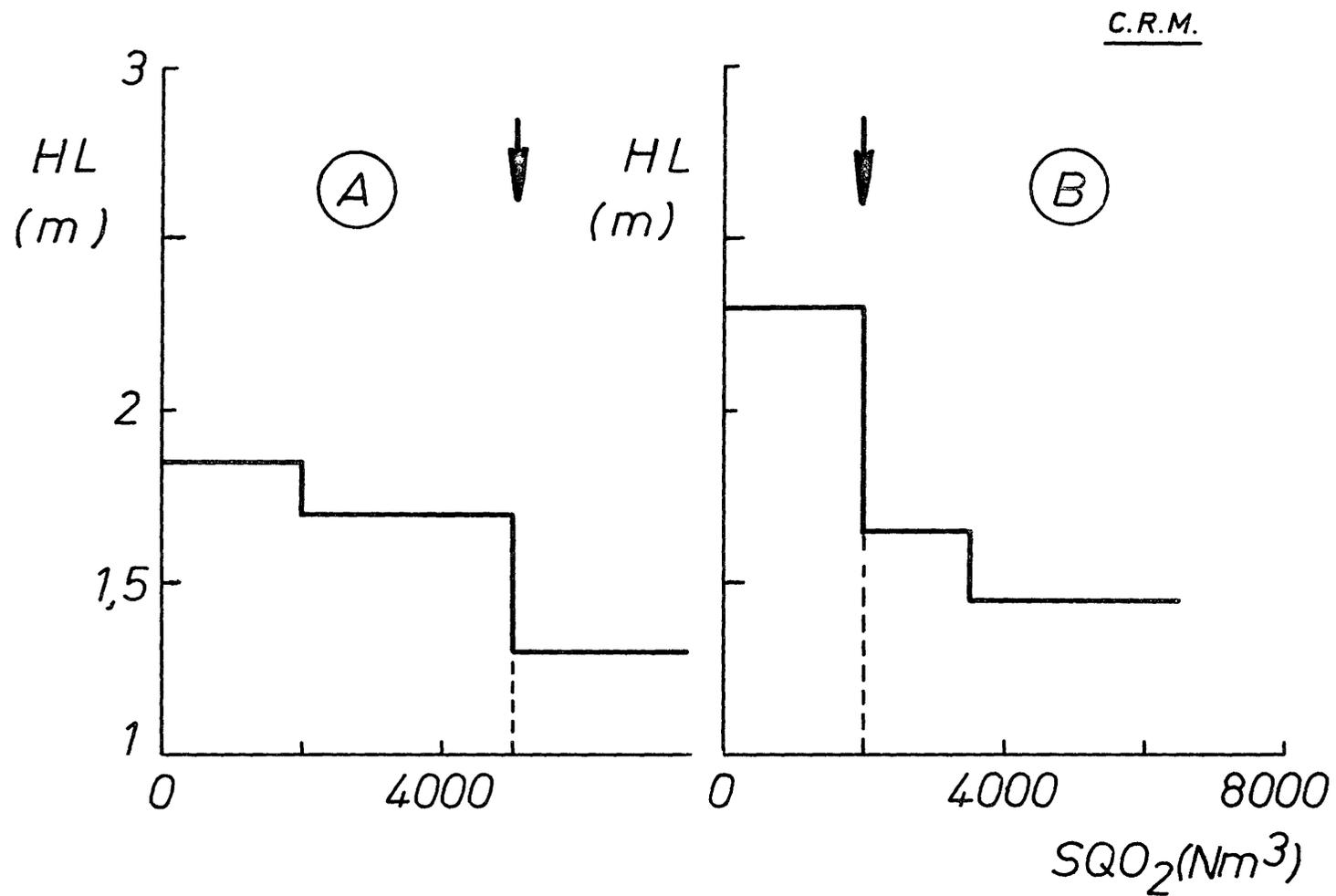


Fig. 25 : Evolution de la hauteur de lance en fonction de la quantité d'oxygène soufflé.

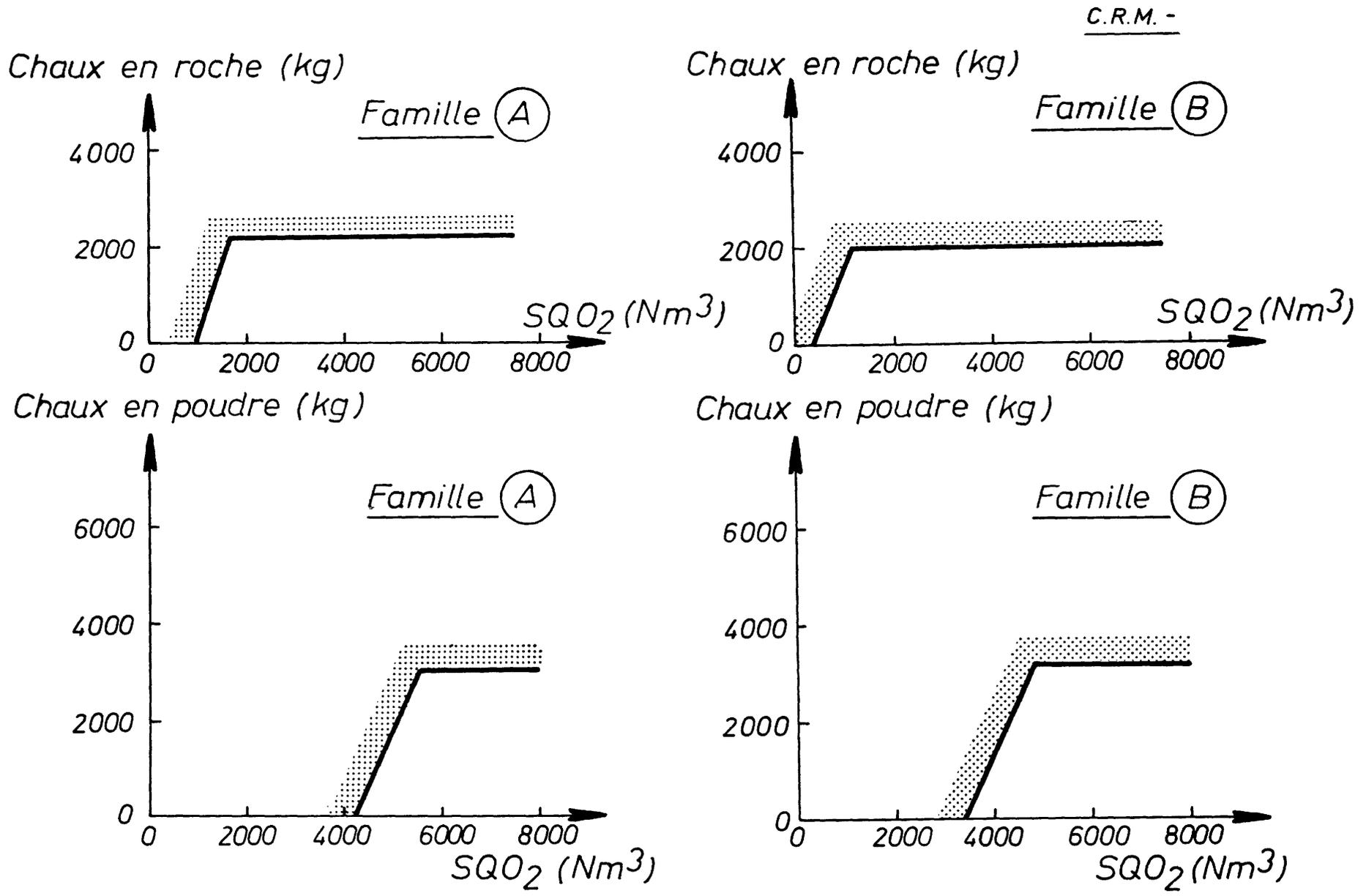


Fig. 26 : Schéma de l'enfournement chaux en fonction du volume d'oxygène passé (SQO_2)

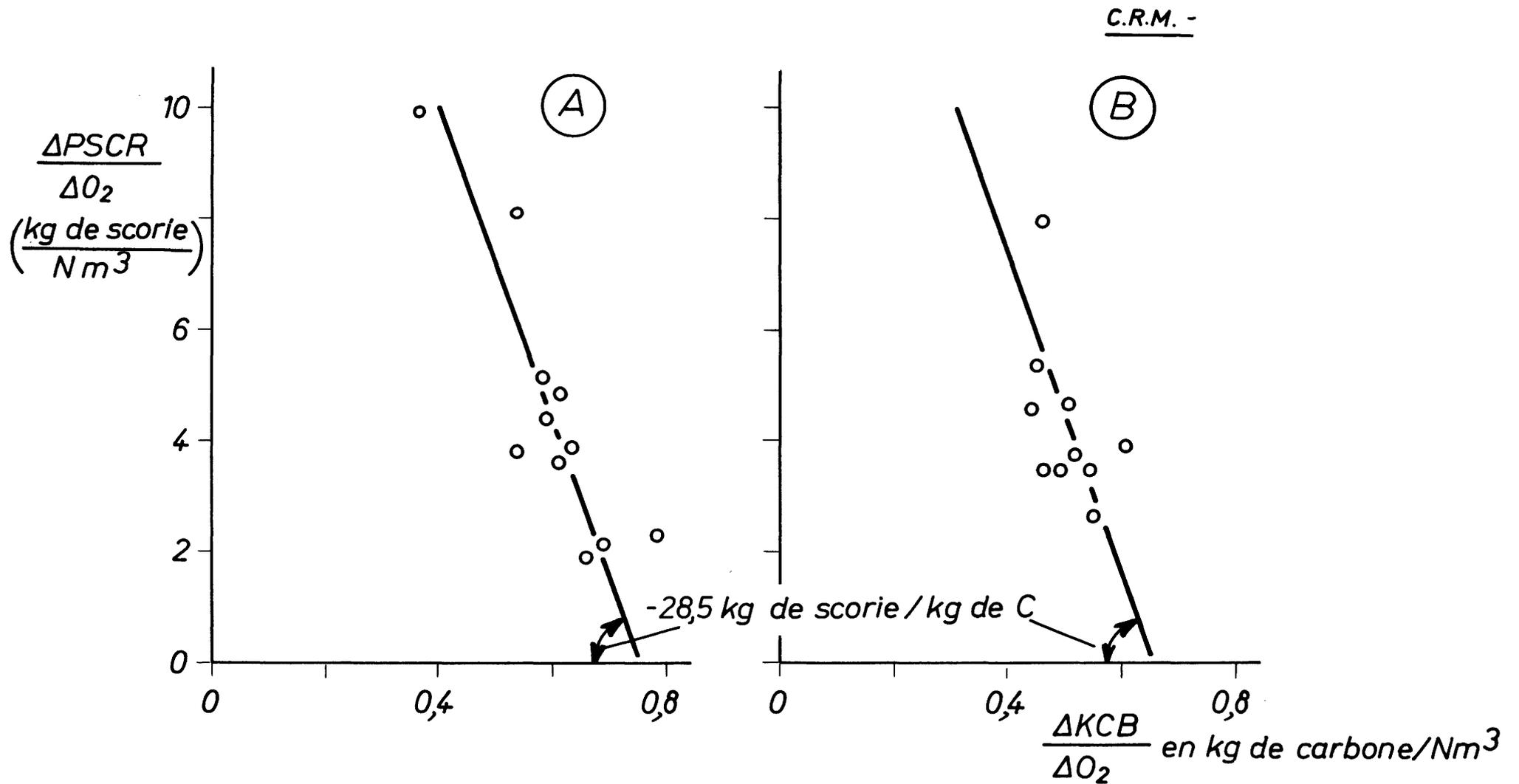


Fig.27: Relation entre le taux de remise en solution de la scorie recyclée et le taux de décarburation du bain.

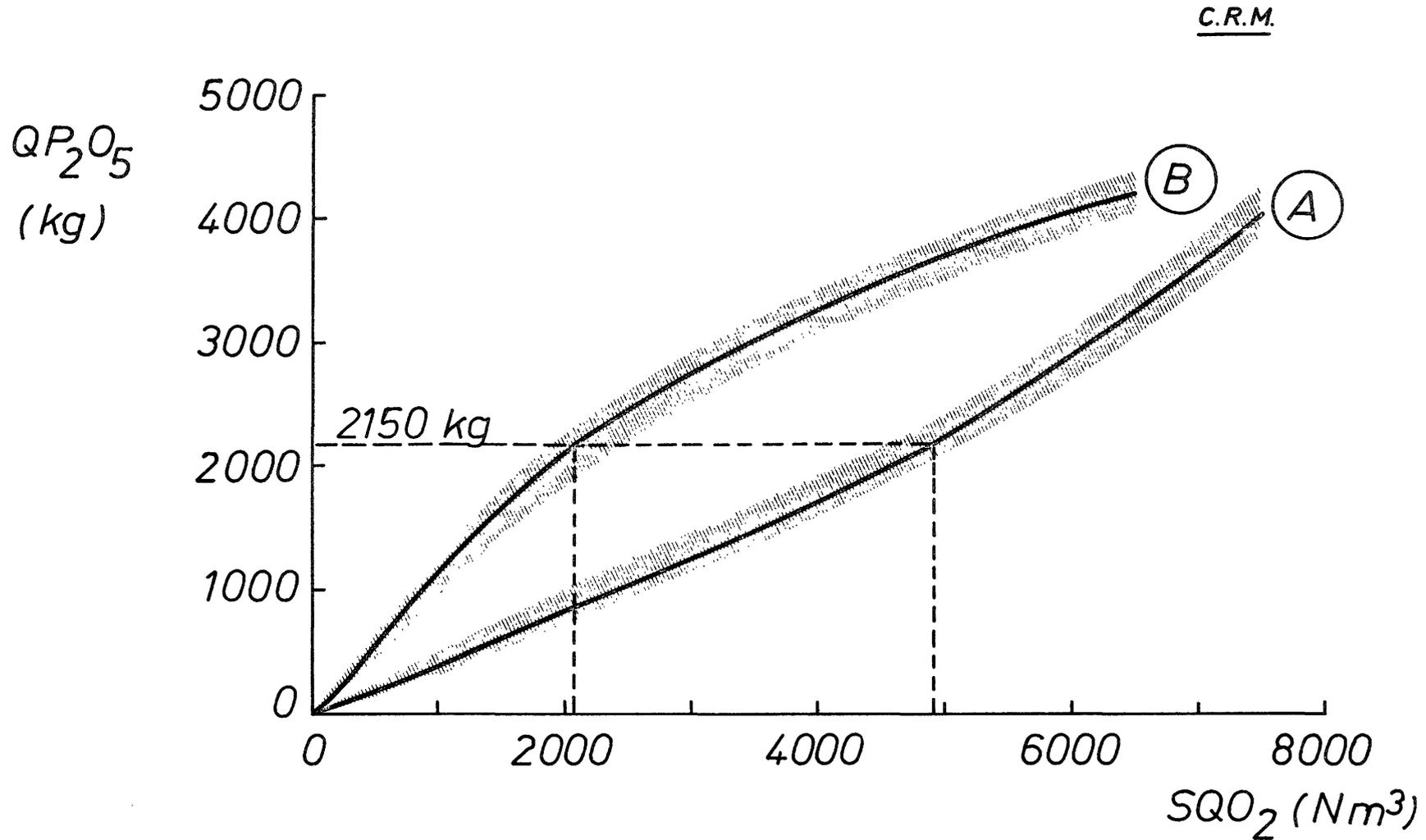


Fig. 28 : Evolution de la quantité de P_2O_5 nouvellement scorifié en fonction de la quantité d'oxygène soufflé.

C.R.M.

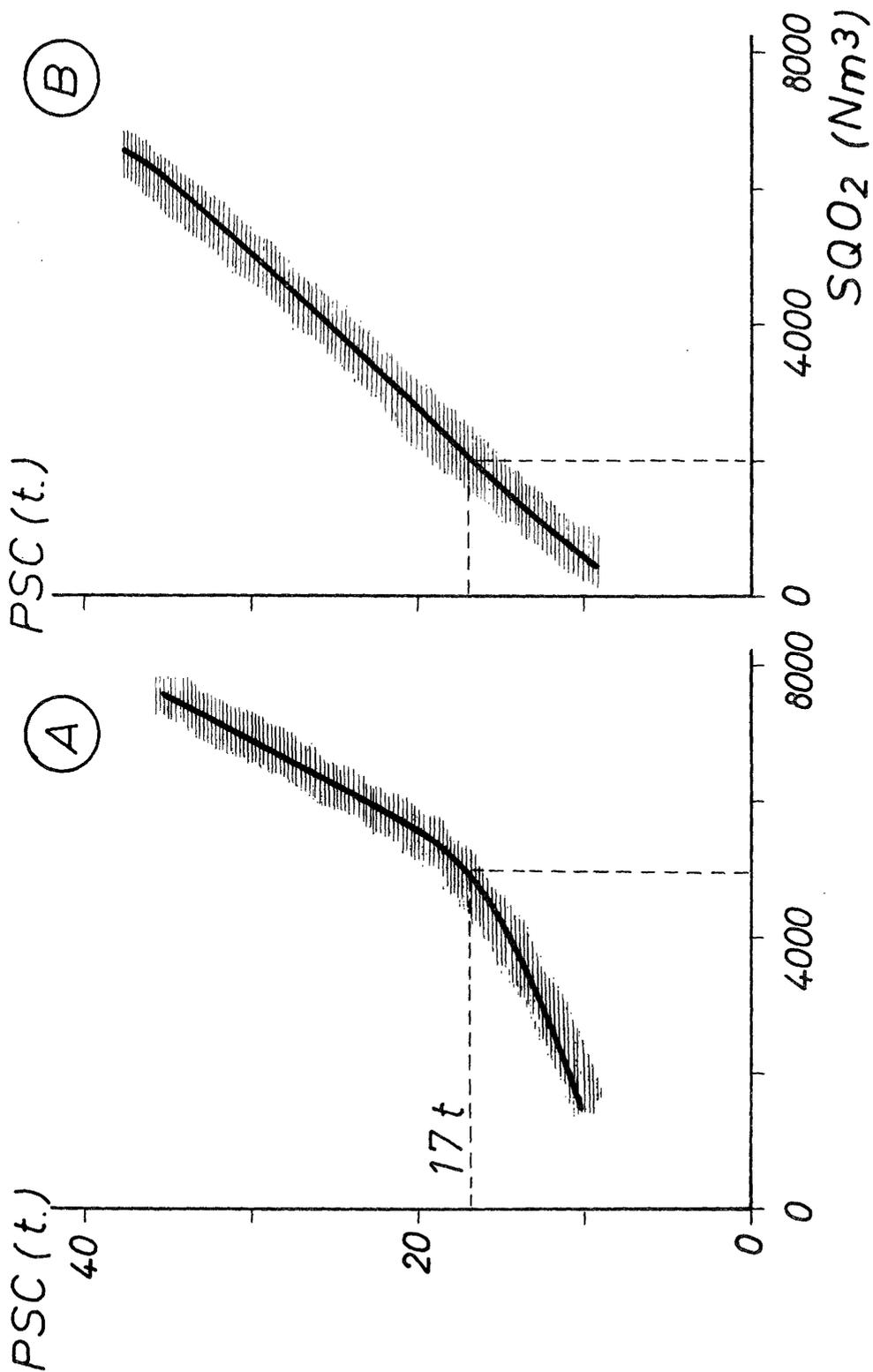


Fig. 29: Evolution du poids de scorie formée, en fonction du volume d'oxygène soufflé.

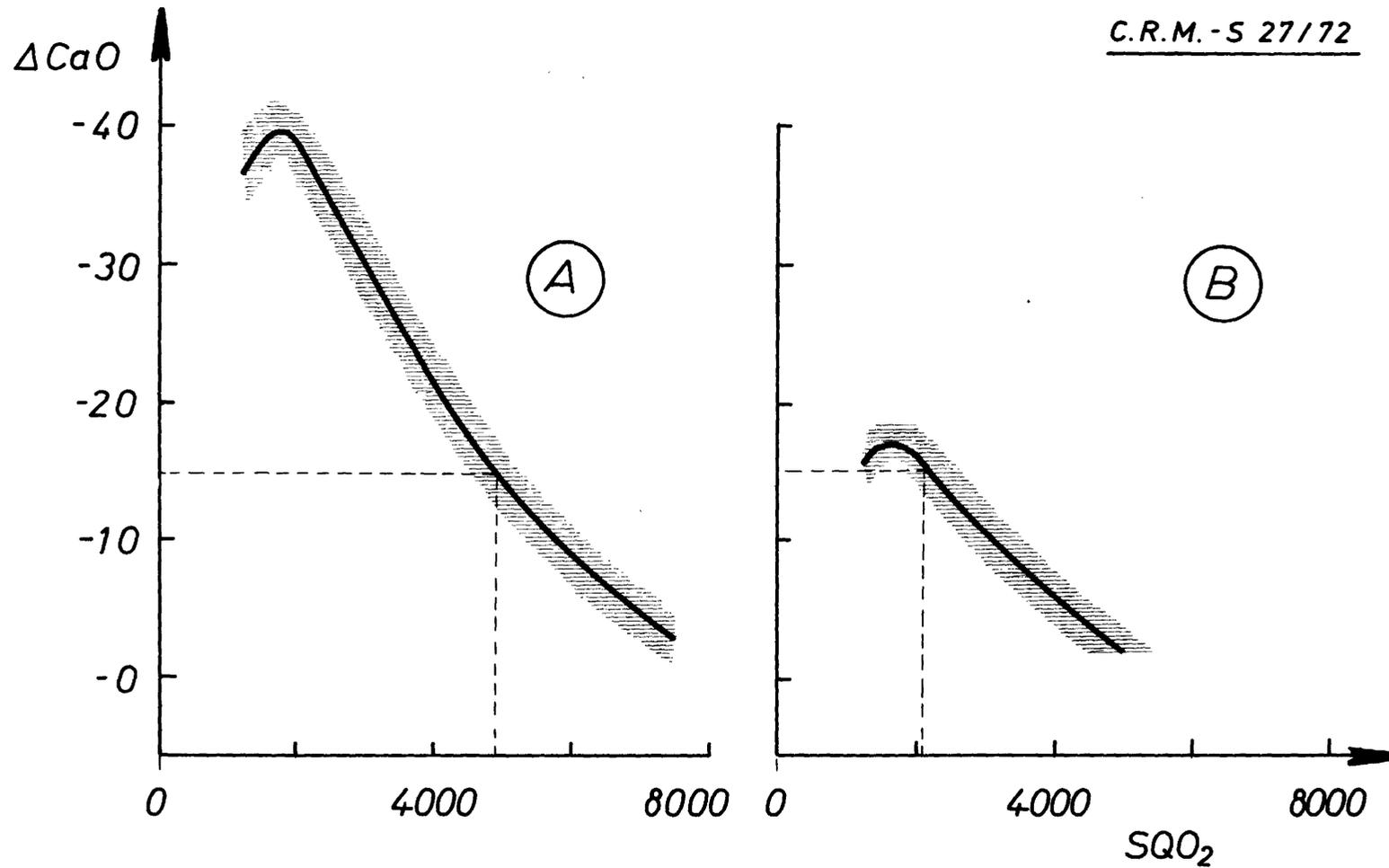


Fig. 30 : Evolution de l'écart à la saturation en chaux de la scorie (ΔCaO) en fonction du volume d'oxygène soufflé.

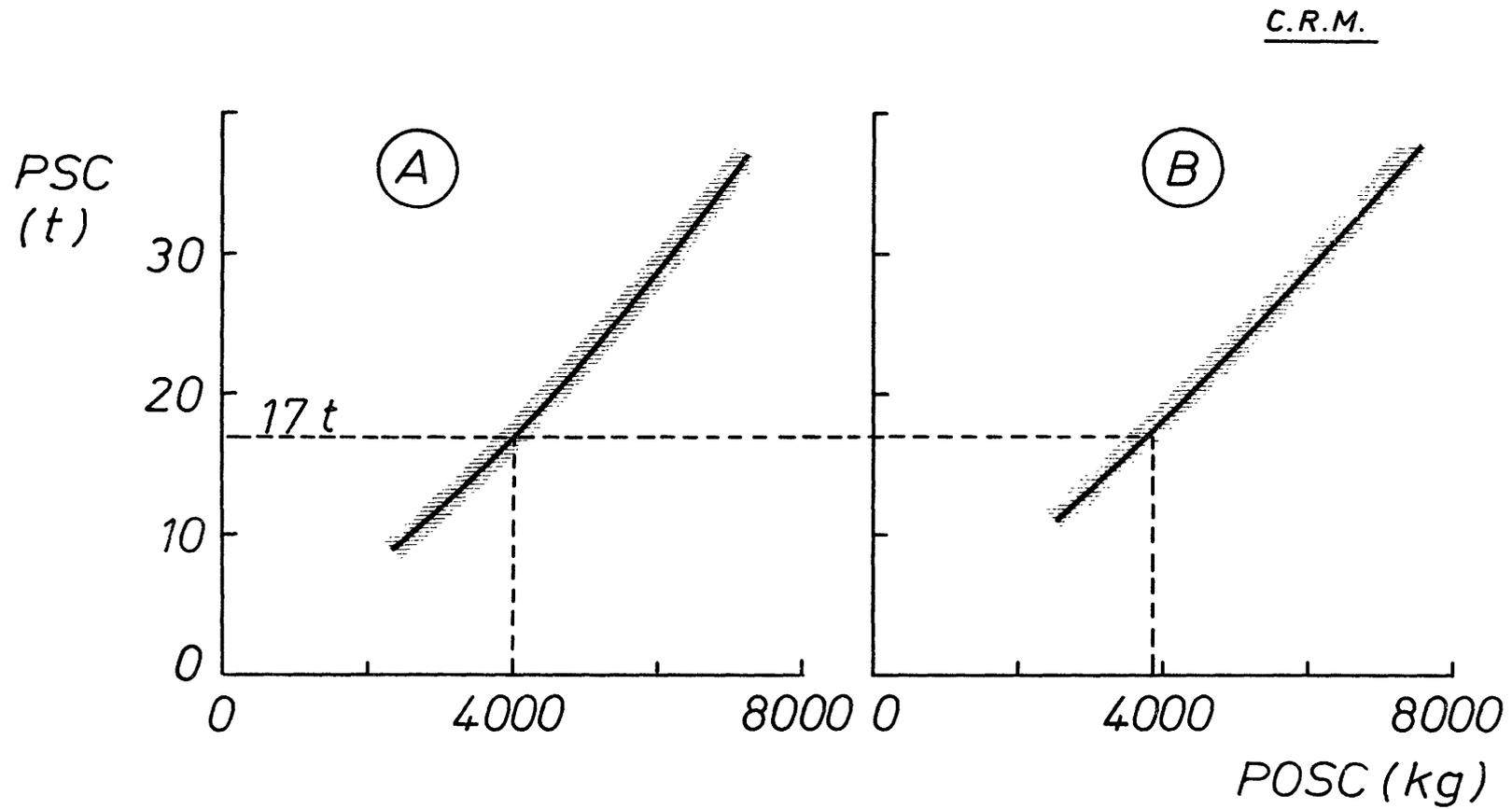


Fig. 31: Evolution du poids de scorie formée (PSC) en fonction du poids d'oxygène accumulé dans la scorie (POSC).

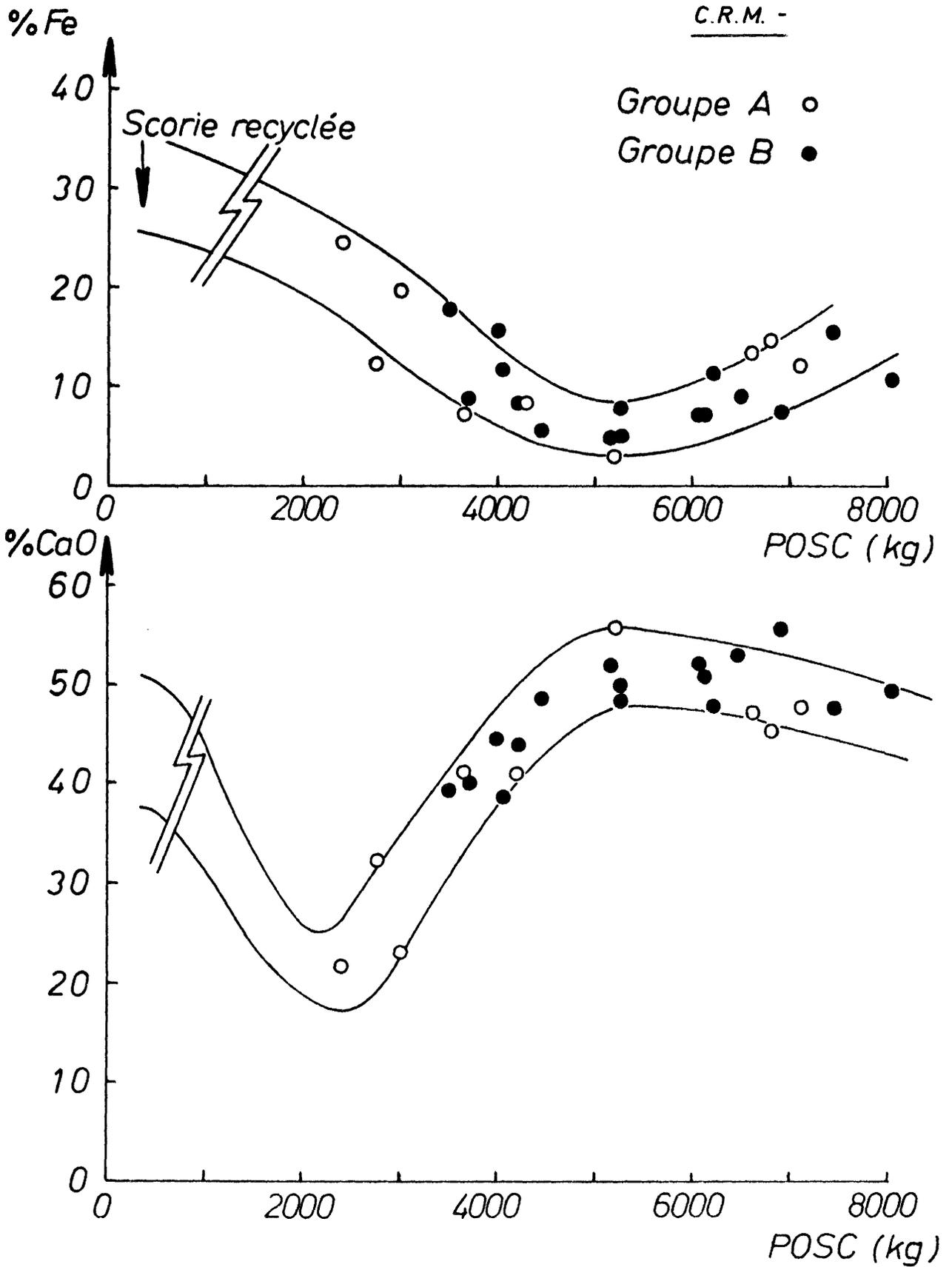


Fig. 32 : Evolution du %Fe et du %CaO en fonction de l'oxygène emmagasiné dans la scorie.

C.R.M.

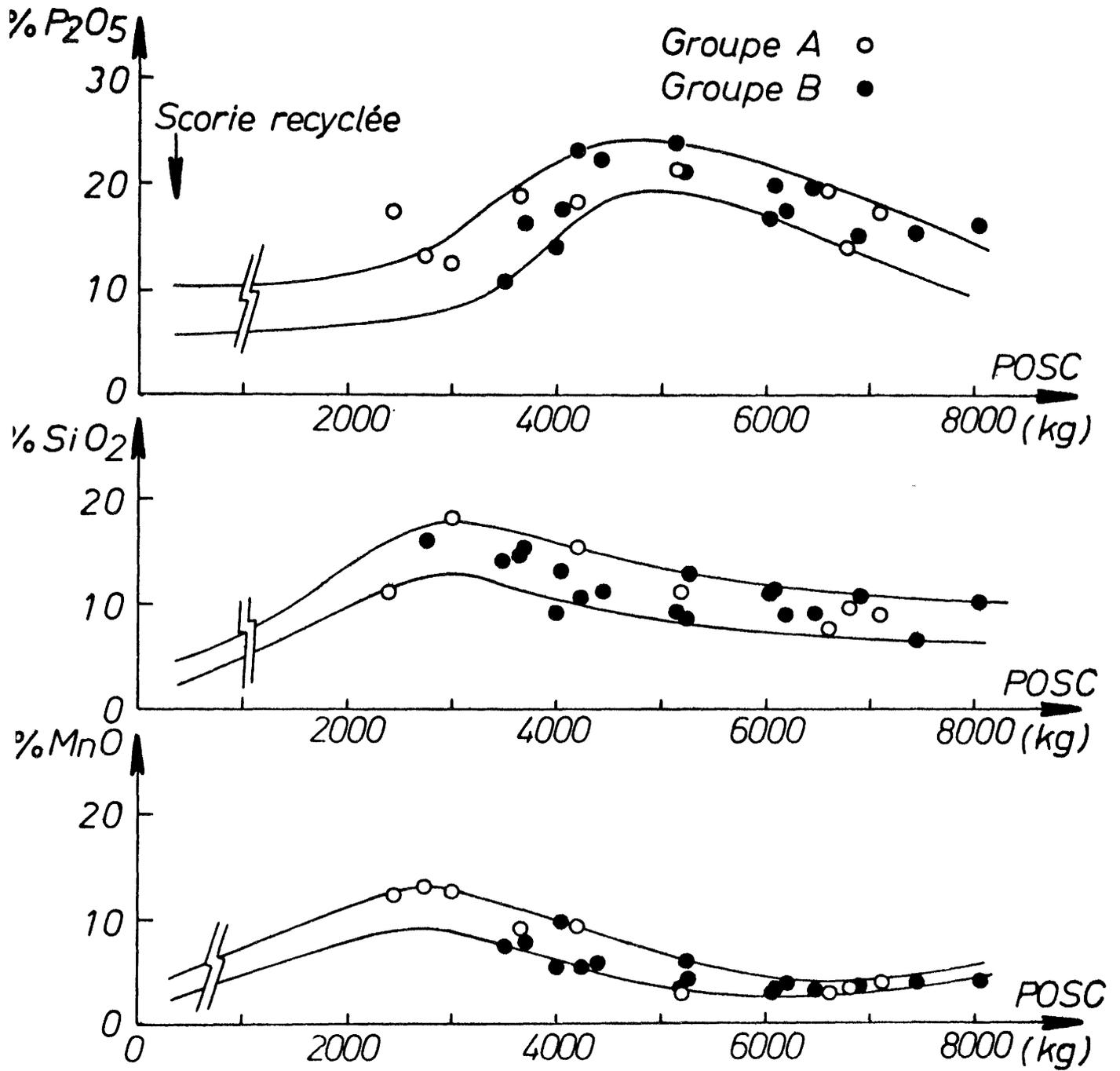


Fig. 33: Evolution des %P₂O₅, %SiO₂, %MnO en fonction de l'oxygène emmagasiné dans la scorie.

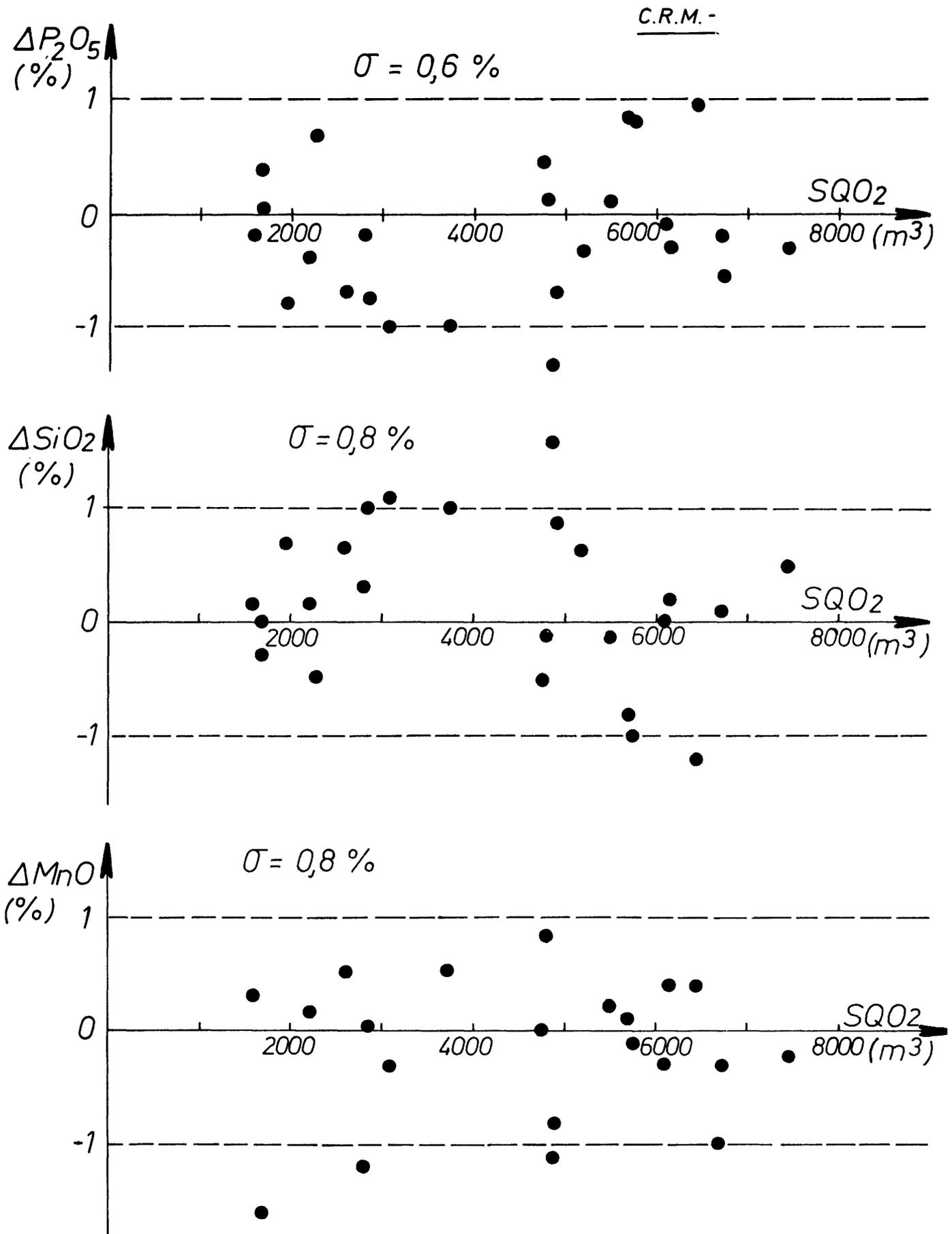


Fig. 34 : Ecart entre les valeurs calculées et mesurées des pourcentages de P_2O_5 , SiO_2 et MnO .

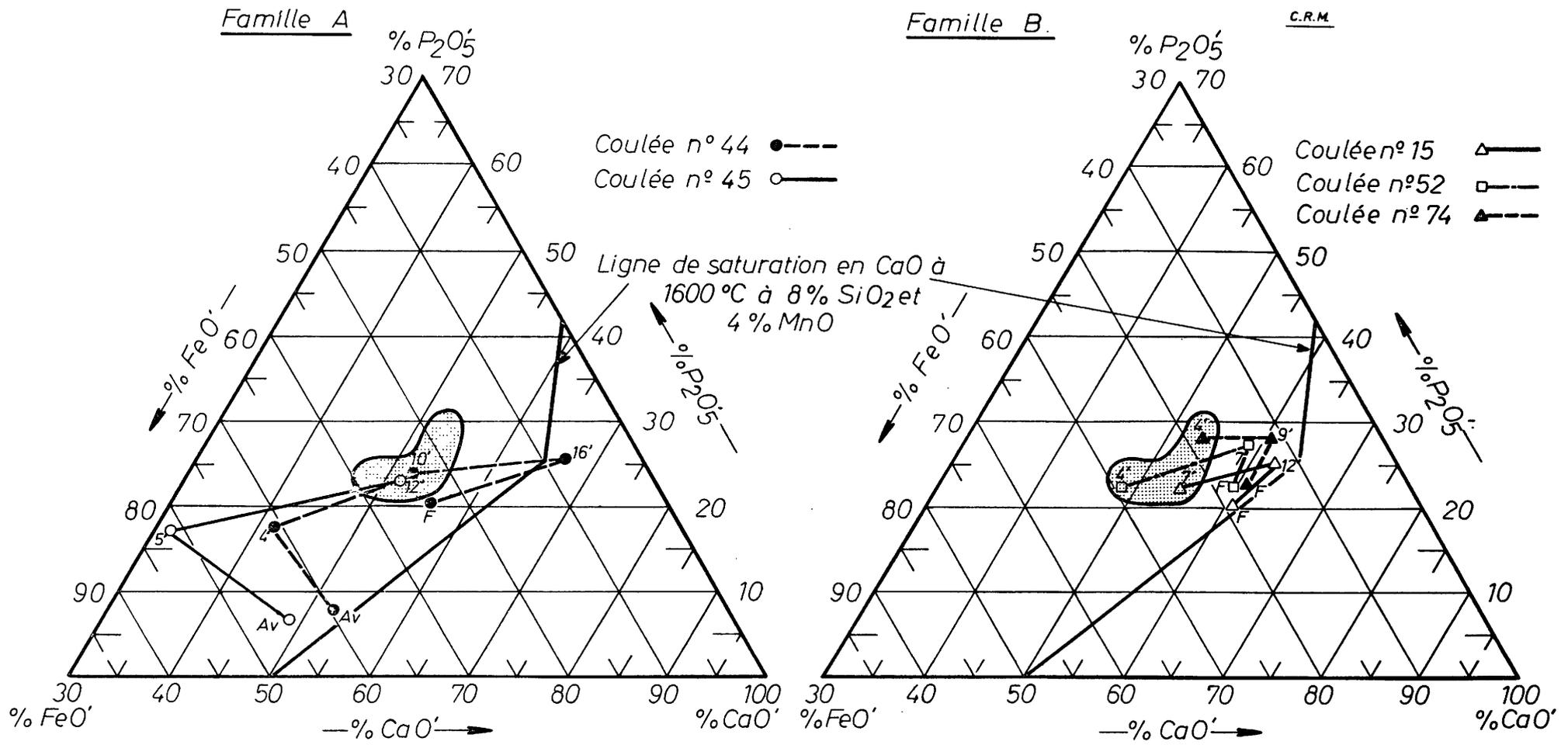


Fig. 35: Trajectoire, en fonction du temps, de la scorie pour deux familles de coulées différentes.
 (AV = avant enfournement ; F = rabatement final.)

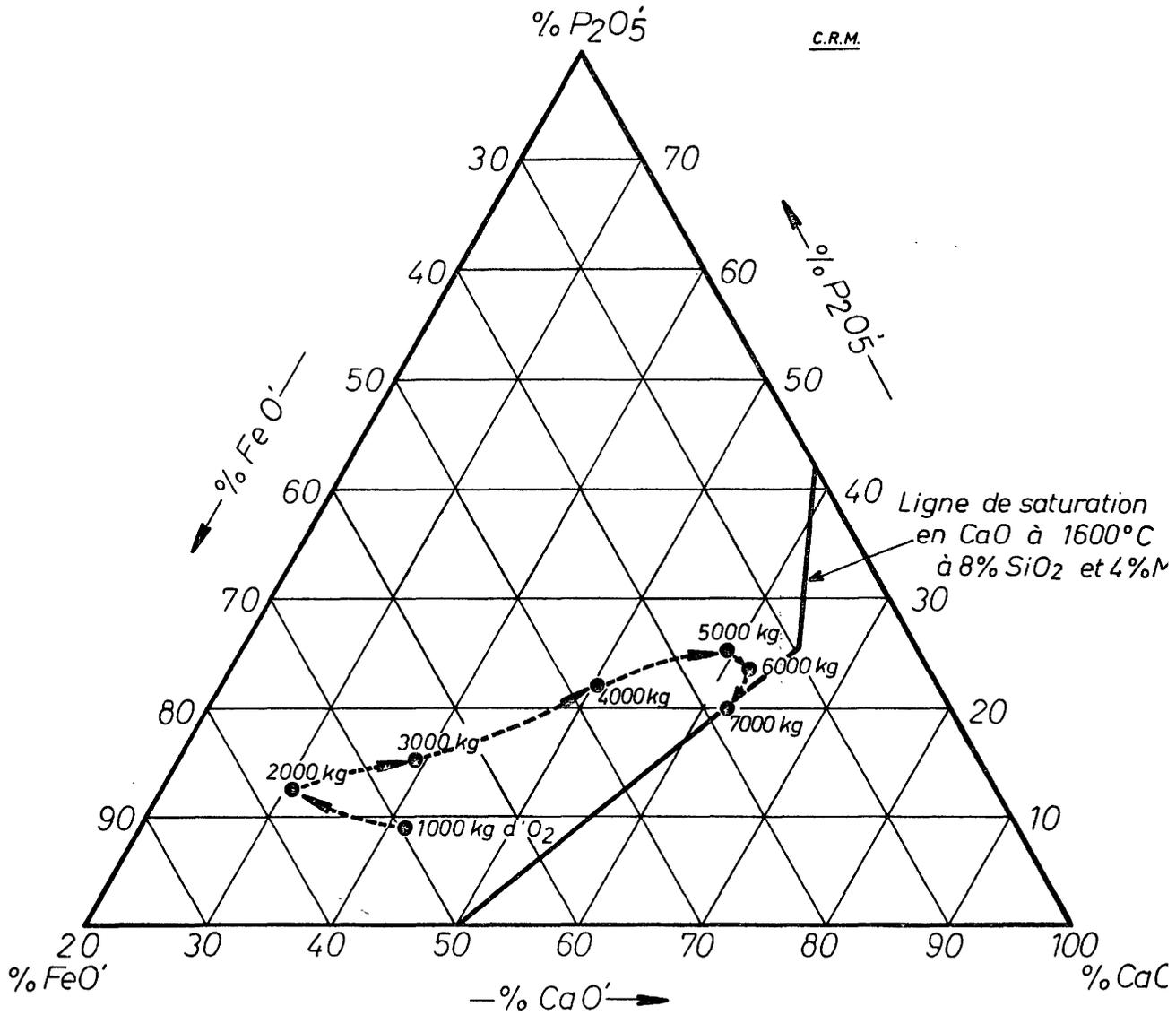


Fig. 36: Evolution de la composition de la scorie en fonction du poids d'oxygène qui y est emmagasiné. (POSC).

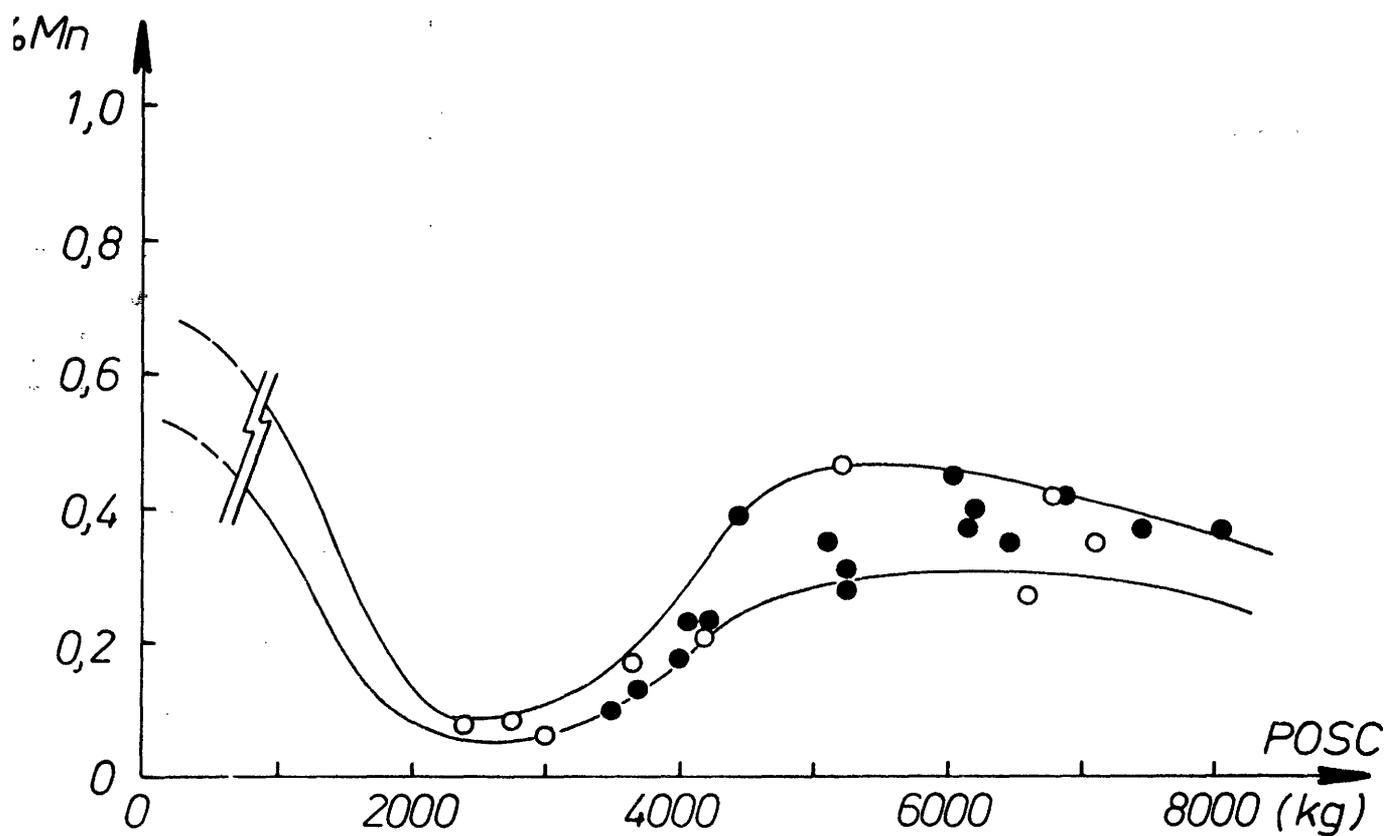
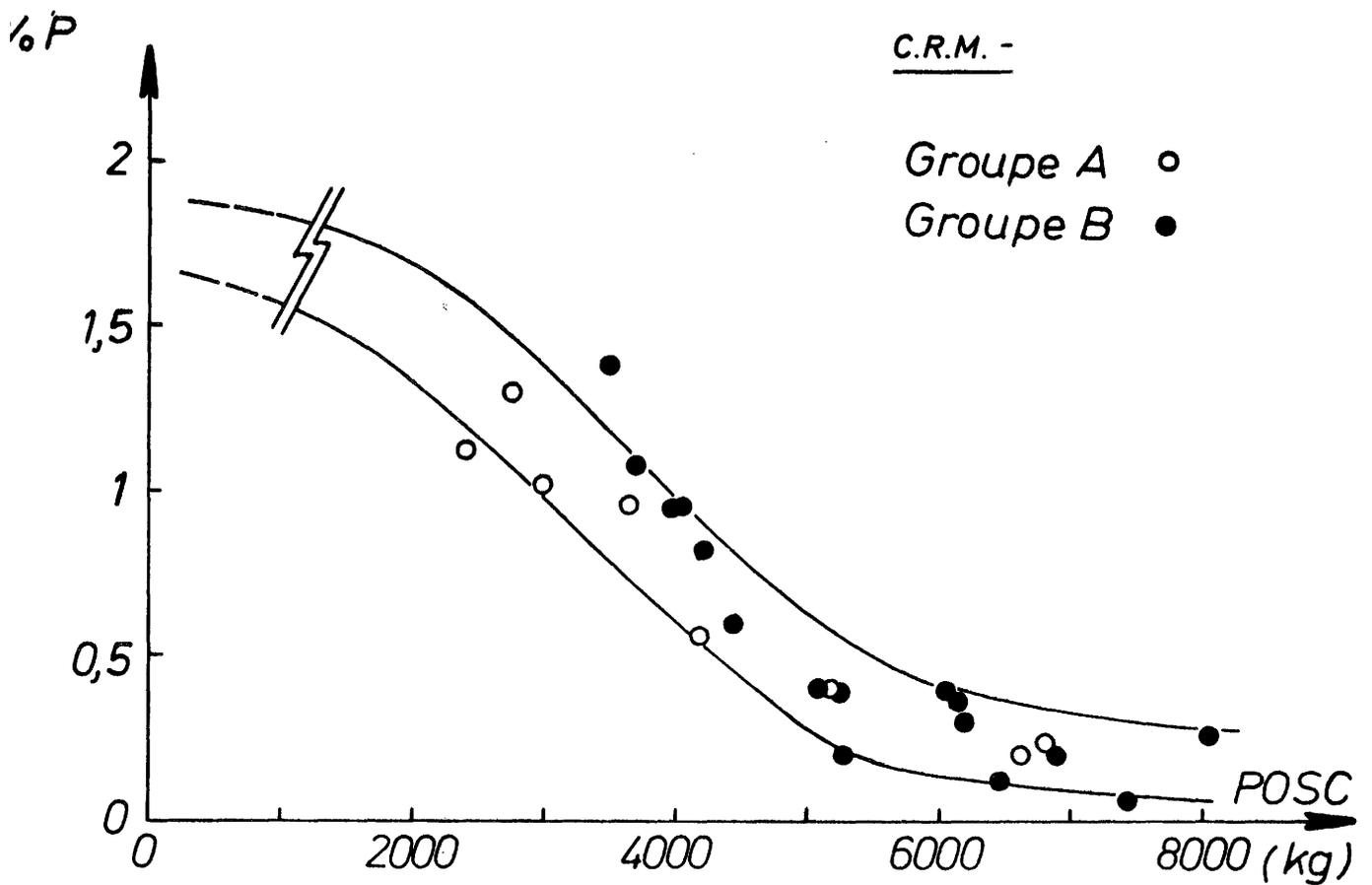


Fig.37: Evolution des %P et %Mn du bain en fonction de l'oxygène emmagasiné dans la scorie.

C.R.M. -

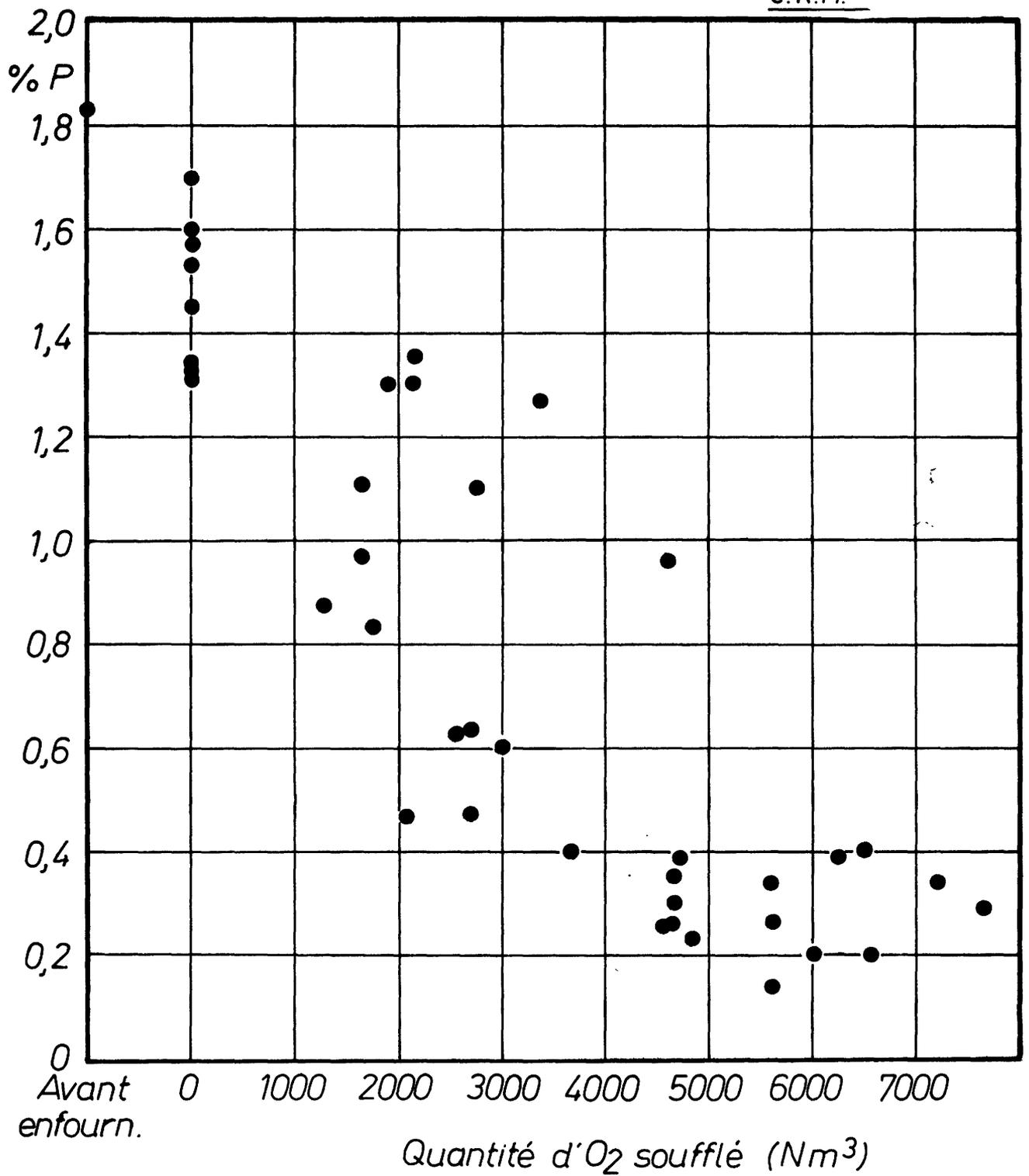


Fig.38: Evolution du P en cours de soufflage. 1^{re} phase.

Signification des symboles utilisés dans les équations.

- CaO, SiO₂, P₂O₅, XMnO, XMgO, Fe représentent les pourcentages de ces éléments dans la scorie.
- Bl représente la somme des teneurs des six éléments principaux de la scorie (± 95 %).
- D est la teneur en SiO₂ de la chaux (+ 1,3 %).
- C est la teneur en CaO de la chaux ($\pm 94,5$ %).
- XMnF, SiF, PF, XMnB, SiB, PB sont les pourcentages de Mn, Si et P respectivement dans la fonte enfournée et le bain métallique en fin de phase 1.
- $HPF1 = \frac{WF}{WB}$ est le rapport du poids de fonte sur le poids de bain métallique.
- QMRTF et QMMTF sont les poids, par tonne de fonte liquide, de Mn apportés respectivement par la fraction de la scorie recyclée déjà remise en solution à l'instant considéré et par les mitrailles (en kg/tf).
- QSRTF et QSGTF sont les poids, par tonne de fonte liquide, de SiO₂ apportés respectivement par la scorie recyclée remise en solution et par le gravier (en kg/tf).
- QPRTF est le poids, par tonne de fonte liquide, de P₂O₅ apporté par la scorie recyclée remise en solution.
- PSCTF = poids de scorie formée par tonne de fonte (en kg/tf).
- QCRTF est le poids, par tonne de fonte liquide, de chaux apporté par la scorie recyclée remise en solution (en kg/tf).
- XFE est une image de l'écart de la scorie par rapport à la saturation en chaux. Il vaut CaO - 1,57 P₂O₅ - 1,76 SiO₂ - 1,125 Fe.
- aFeO représente l'activité du FeO.
- CT est la valeur prise pour la teneur en MgO de la scorie. C'est une constante qui vaut ici 2 %.

- QSETF est la quantité de SiO₂ enfourné avec la fonte.
(Scorification du Silicium).
- WF : poids de fonte liquide (en t).
- WB : poids du bain métallique en fin de phase 1 exprimé
en t .
- PSCRTF : poids de scorie recyclée mise en solution (kg/tf)
- WMITRTF : poids des mitrailles (en kg/tf).
- XMnMITR : % moyen en manganèse dans les mitrailles.
- PSCTF : poids de scorie formée (en kg/tf).
- CaOR, SiO₂R, P₂O₅R, XMNOR, FeR = teneurs en ces éléments dans
la scorie recyclée.
- MCCTF : poids total de chaux contenue dans la scorie formée
(en kg/tf).
- MCETF : poids de chaux enfournée (en kg/tf).
- OSC : % d'oxygène dans la scorie.
- OSCR : % d'oxygène dans la scorie recyclée.
- SQO2 : volume d'oxygène soufflé (Nm³).

Simulation du modèle statique sur calculateur analogique.

La signification des symboles est reprise en annexe I.

1. Equations normalisées.

$$\frac{P205}{100} = \frac{B1}{100} - \frac{CaO}{100} - \frac{SiO2}{100} - \frac{XMnO}{100} - \frac{XMgO}{100} - 1,33 \frac{Fe}{100} \quad (1)$$

$$\frac{XMnO}{100} = \frac{A/100}{B} \quad (2)$$

avec :

$$\frac{A}{100} = \frac{1}{100} \overbrace{\left(XMnF - \frac{XMnB}{HPF1} \right)}^{A1} + 0,1 \frac{QMRTF}{100} + \frac{0,1QMMTF}{100}$$

$$\text{où : } HPF1 = \frac{WF}{WB}$$

$$\frac{0,1 QMRTF}{100} = \frac{PSCRTF}{1000} \cdot \frac{XMnOR}{100} \cdot 0,775$$

$$\frac{0,1 QMMTF}{100} = \frac{WMITRTE}{1000} \cdot \frac{XMnMITR}{100}$$

$$B = 0,775 \cdot \frac{PSCTF}{1000}$$

$$\frac{SiO2}{100} = \frac{P205}{100} \left(\frac{Nu/50}{De/100} \right) \cdot 0,5 + \frac{D}{C} \cdot \frac{CaO}{100}$$

avec :

$$\frac{Nu}{50} = 0,4284 \left(SiF - \frac{SiB}{HPF1} \right) + \frac{QSRTF}{50} - \frac{QCRTF}{50} \cdot \frac{D}{100} + \frac{QSETF}{50} + \frac{QSGTF}{50}$$

où :

$$\frac{QSRTF}{50} = \frac{PSCRTF}{1000} \cdot \frac{SiO2R}{5}$$

$$\frac{QCRTF}{50} \cdot \frac{D}{100} = \frac{PSCRTF}{1000} \cdot \frac{CaOR}{C} \cdot \frac{D}{5}$$

$\left(\frac{QSETF}{50} + \frac{QSGTF}{50} \right)$ est introduit comme une constante

$$\frac{DE}{100} = 0,229 \left(PF - \frac{PB}{HPF1} \right) + \frac{QPRTF}{100}$$

$$\text{où : } \frac{QPRTF}{100} = \frac{PSCRTF}{1000} \cdot \frac{P2O5R}{10}$$

$$\frac{CaO}{100} = 1,57 \frac{P2O5}{100} + 1,86 \frac{SiO2}{100} + 1,125 \frac{Fe}{100} - \frac{XFE}{100} \quad (4)$$

$$\frac{XMgO}{100} = CT \quad (5)$$

$$\frac{Fe}{100} = 0,9174 \times aFeO \times N'' - 0,01283 \quad (6)$$

avec :

$$N'' = 1,786 \frac{CaO}{100} + 1,41 \frac{XMnO}{100} - 1,667 \frac{SiO2}{100} - 2,11 \frac{P2O5}{100} + 2,48 \frac{XMgO}{100} + 0,741 \frac{Fe}{100} + 0,021$$

$$\frac{PSCTF}{1000} = \frac{De/100}{P2O5/100} \cdot \frac{1}{10} \quad (7)$$

$$\frac{MCCTF}{1000} = \frac{PSCTF}{1000} \cdot \frac{CaO/100}{C/100} \quad (8)$$

$$\frac{MCETF}{200} = 5 \cdot \frac{MCCTF}{1000} - 5 \cdot \frac{QCRTF}{1000} \quad (9)$$

Le poids de scorie est calculé par un bilan P2O5.
On vérifiera ce poids de scorie par un bilan global matière.
On doit en effet avoir :

$$PSC.B1 = PSCR.B1 + (\Delta QSiO2 + \Delta QP2O5 + \Delta QFe + \Delta QMnO + \Delta QMgO + MCE)$$

Le terme entre parenthèses représente la quantité d'éléments scorifiés non issus de la scorie recyclée. MCE correspond à la chaux enfournée.

Par tonne de fonte, on trouve alors :

$$\begin{aligned} PSCTF \cdot B1 &= PSCRTF \cdot B1 + (21,42 \cdot C1 + QSETF + QSGTF) + \\ & (22,9 \cdot D1) + (PSCTF \cdot Fe \cdot \frac{1,33}{100} - PSCRTF \cdot FeR \cdot \frac{1,33}{100}) \\ & + (12,9 Al + 1,29 QMMTF) + MCETF \end{aligned}$$

On admet que $\Delta QMgO$ est négligeable.

On aura donc :

$$\begin{aligned}
 B1 \cdot \frac{PSCTF}{1000} &= \frac{PSCRTF}{1000} \left(B1 - FeR \cdot \frac{1,33}{100} \right) + \frac{PSCTF}{1000} \cdot \frac{Fe \cdot 1,33}{100} \\
 &+ 0,2 \frac{MCETF}{200} + \left(21,42 \frac{Cl}{1000} + 22,9 \frac{D1}{1000} + 12,9 \frac{Al}{1000} + \right. \\
 &\left. \frac{QSETF}{1000} + \frac{QSGTF}{1000} + 1,29 \frac{QMMTF}{1000} \right). \quad (10)
 \end{aligned}$$

La quantité totale d'oxygène qui se trouve dans la scorie est donnée par :

$$\begin{aligned}
 POSC &= \frac{PSC}{100} \left[0,2255 \cdot XMnO + 0,397 \cdot XMgO + 0,564 \cdot P2O5 + 0,533 \cdot SiO2 \right. \\
 &\left. + 0,33 \text{ Fe} \right]
 \end{aligned}$$

$$\frac{POSC}{1000} = \frac{PSC}{1000} \cdot \frac{OSC}{100} \quad (\text{kg})$$

où OSC est le pourcentage d'oxygène dans la scorie. OSC peut être calculé à partir des données fournies par le modèle. Il peut également être directement calculé à partir des valeurs d'analyse des échantillons de scorie.

La quantité d'oxygène passé à la scorie et provenant de la lance vaut alors :

$$POSCL = PSC \cdot \frac{OSC}{100} - PSCR \cdot \frac{OSCR}{100}$$

Par tonne de fonte liquide, on a :

$$\frac{POSCLTF}{100} = \frac{PSCTF}{1000} \cdot 10 \cdot \frac{OSC}{100} - \frac{PSCRTF}{1000} \cdot 10 \cdot \frac{OSCR}{100} \quad (11)$$

La figure 40 montre le schéma analogique traduisant les équations ci-dessus.

2. Adaptation du modèle.

Pour chaque coulée, on connaît le poids et la composition des matières enfournées. On connaît par ailleurs la composition de l'échantillon de scorie prélevé en cours de soufflage.

En pratique, il s'agira par calcul d'adapter un certain nombre de coefficients du modèle pour faire correspondre à cette analyse mesurée, celle fournie par le modèle.

Pour ce faire, on dispose de trois paramètres :

- a) a_{FeO} : ajusté de manière à avoir un Fe identique à celui dosé.
- b) XFE : utilisé pour ajuster CaO.
- c) PSCRTF : ajusté de façon à avoir une mise de chaux (MCETF) correspondant au poids réel de chaux dissoute (voir remarque ci-après).

Ayant ajusté les 3 paramètres ci-dessus, le modèle fournit alors des valeurs pour P205, SiO₂ et XMnO devant correspondre aux teneurs dosées. Il est évident que la correspondance ne sera pas parfaite étant donné les imprécisions commises, notamment sur les analyses et les poids des matières enfournées.

A la figure 34, nous avons porté les écarts entre les valeurs mesurées et calculées de P205, SiO₂ et XMnO pour 26 instants d'échantillonnage en cours de soufflage. Chaque prélèvement est repéré en fonction de la quantité d'oxygène déjà soufflé au moment où il a été effectué (SQO₂ en Nm³).

On voit qu'à quelques exceptions près, l'ensemble des points se trouve dans la fourchette ± 1 %. L'écart-type est au maximum de 0,8 %, ce qui est un résultat très satisfaisant.

Remarque.

PSCRTF est le poids de la fraction de scorie recyclée qui est remise en solution au moment considéré. Pour trouver ce poids, qui n'est pas connu à priori, il faut utiliser une information complémentaire, à savoir un bilan matière.

La teneur en un élément quelconque dans la scorie est fonction de la quantité de cet élément apportée par la scorie recyclée fondue d'une part et, par les matières enfournées d'autre part.

Si l'on désigne par :

- % X : la teneur de l'élément X dans la scorie.
- % XR : la teneur en X dans la scorie recyclée.
- QXTF : la quantité de X nouvellement scorifiée qui est issue des matières enfournées (exprimée par tonne de fonte liquide),

on aura :

$$\frac{\%X}{100} = \frac{1}{PSCRTF} \left(\frac{\%XR}{100} \cdot PSCRTF + QXTF \right)$$

d'où :

$$QXTF = \frac{\%X}{100} \cdot PQCTF - \frac{\%XR}{100} \cdot PSCRTF$$

On voit que pour avoir un QXTF donné, PSCRTF doit être fixé à une valeur bien déterminée (les autres grandeurs de la relation sont, soit connues par analyse, soit calculées par le modèle).

En pratique, comme élément X on choisira les autres éléments intervenant déjà dans d'autres buts, dans les calculs.

Pour déterminer les quantités de SiO_2 et de MnO , il faut faire intervenir des analyses et des poids (analyse fonte, analyse bain, poids de fonte, poids de bain, etc...) ce qui risque d'être moins précis qu'en se servant de la quantité de chaux enfournée. C'est pour cette raison que nous avons utilisé cette dernière donnée pour définir PSCRTF.

Détermination de la vitesse de fusion des mitrailles.

Le calcul en continu de bilans matières permet dans une certaine mesure d'estimer la manière dont les mitrailles fondent au cours du soufflage.

Une première approche a été faite au cours de l'étude décrite dans le présent rapport et ce, en se basant sur le raisonnement suivant :

Par analyse des échantillons de métal prélevés en cours de soufflage, on connaît la teneur en carbone du bain donc le poids $WB.\% C$ de carbone restant dans le métal (WB représente le poids du bain métallique).

Par les analyses gaz, on connaît la quantité totale KCB de carbone éliminé durant le soufflage.

Le poids initial de carbone ($CENF$ présent dans la charge est par ailleurs connu. On peut donc écrire, pour chaque instant du soufflage, un bilan carbone de la forme

$$WB.\%C = CENF - KCB \quad (1)$$

Or, le poids WB du bain liquide peut se calculer également par une formule du type

$$\begin{aligned} WB = & \text{(Poids des matières enfournées liquides ou remises en} \\ & \text{solution)} \\ & - \text{(Poids des matières scorifiées)} \\ & + \text{(Poids de la fraction des mitrailles fondues)}. \end{aligned}$$

(2)

En combinant les équations (1) et (2), il est dès lors possible de déduire le poids de la fraction des mitrailles fondues à tout moment du soufflage.

A la figure 41, nous avons reporté le résultat obtenu par une telle méthode. Tout comme pour les calculs précédemment exposés, on retrouve 2 limites, l'une supérieure l'autre inférieure. Celles-ci encadrent la courbe moyenne établie à l'aide de radio-isotopes par des auteurs japonais.
(13)

L'allure des courbes est conservée. La méthode proposée devrait assurément faire l'objet d'examens plus détaillés (caractérisation de différents types de mitrailles, etc...)

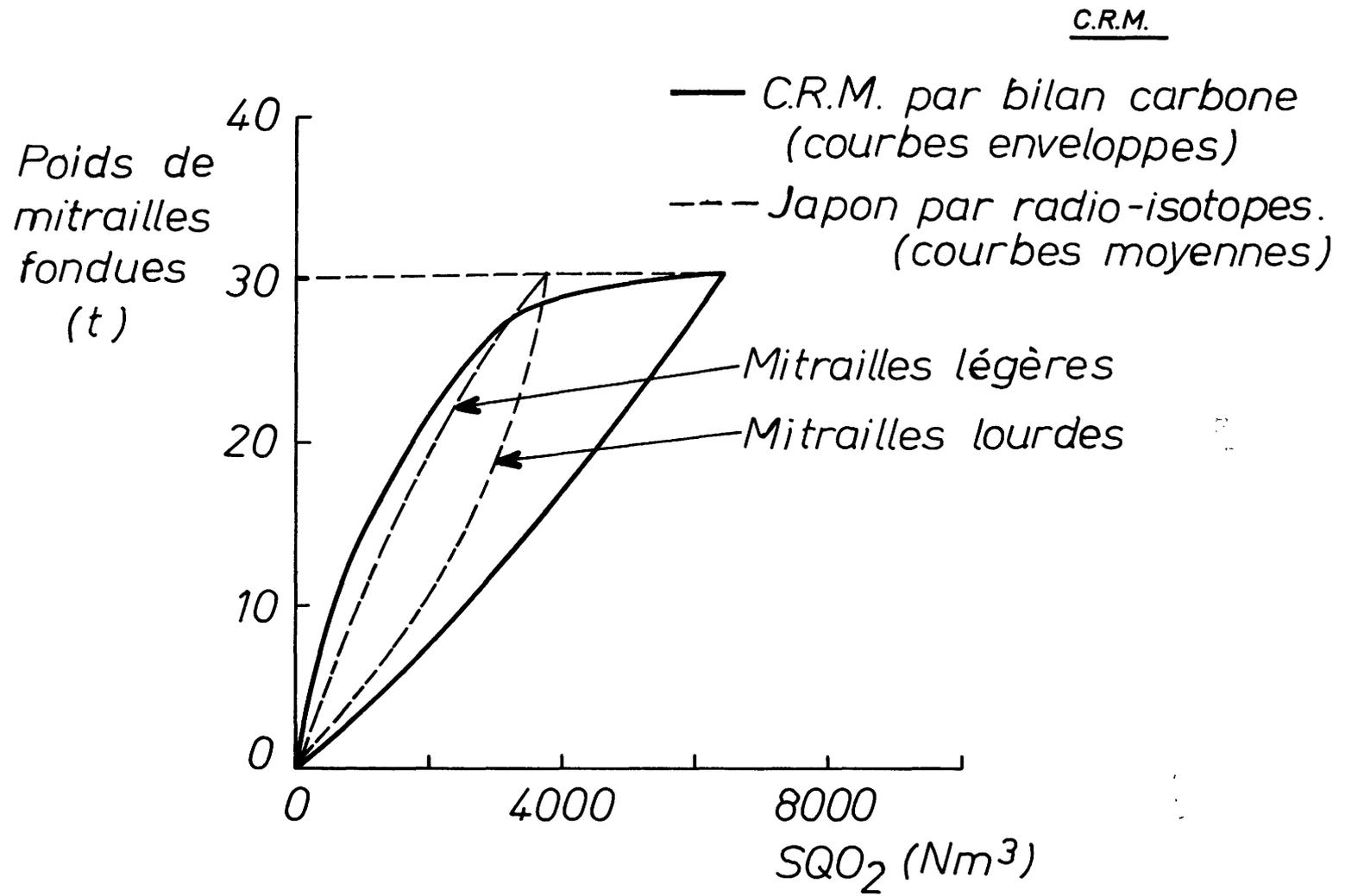


Fig.41: Evolution de la fusion des mitrailles

Dans la présente annexe, nous émettrons quelques considérations quant aux déséquilibres scorie-métal.

Equilibre du phosphore.

Pour tous les prélèvements pour lesquels nous disposions à la fois de la composition du métal et de la scorie, nous avons calculé l'écart à l'équilibre du phosphore, c'est-à-dire le rapport entre le phosphore dosé dans le métal et le phosphore théorique calculé à partir de la scorie (24). La température associée à chacun des échantillonnages a été estimée suivant les considérations émises à l'annexe 3.

A la figure 42, nous avons reporté le logarithme de l'inverse de cet écart à l'équilibre en fonction de la teneur en carbone du bain. Avec P. COHEUR et A. DECKER (15), on constate que la relation est linéaire. Dans le cas présent toutefois, la dispersion des points est faible : le sigma résiduel est de l'ordre de 0,18 (*)

On peut calculer qu'une erreur d'appréciation de la température de 20°C conduit à elle seule à une erreur sur le logarithme de l'écart égale à 0,08.

Cette figure exprime mathématiquement le fait que pour réaliser dans le bain, à une température donnée, une certaine teneur en phosphore, il faut élaborer des scories dont le potentiel d'oxydation augmente avec le pourcentage de carbone restant dans le métal.

(*) Rappelons qu'il s'agit ici d'échantillonnages effectués en cours de soufflage et ce, sans l'arrêter, et non pas d'échantillons prélevés lors de rabattements prématurés.

Si on désire, avec une même composition de scorie, élaborer un acier à même teneur en phosphore mais à des niveaux différents de carbone, il faut nécessairement que les températures de bain soient différentes.

Ces constatations sont bien en accord avec nos résultats précédents (§ 4.2. et § 4.3.)

En effet, lorsque 4.000 kg d'oxygène sont accumulés dans la scorie, on a calculé que l'on avait élaboré à ce moment-là :

- une scorie à composition donnée (fig. 32 et 33),
- et un bain à teneur en phosphore déterminée (fig.37)

Toutefois, cet état est atteint à des instants différents du soufflage en fonction du chemin parcouru par la lance (après 11 minutes ou 5.000 Nm³ pour les coulées du groupe A ; après 5 minutes ou 2.000 Nm³ pour les coulées du groupe B).

Il y correspond donc des températures différentes dont on peut estimer l'écart à 175°C (§ 3.2.3.4. page 28) et par suite des écarts à l'équilibre différents ($\log \frac{1}{EC} = -1$ et -2).

Conformément à la figure 42, il doit y correspondre des teneurs en carbone du bain différentes elles aussi : soit respectivement 1 % et 2,6 % pour les groupes A et B. On peut calculer que le poids de carbone éliminé à cet instant est de 3.000 kg dans le cas A et de 1.000 kg dans le cas B. Ce résultat est confirmé par la figure 24.

Position des scories par rapport au liquidus.

La figure 43 reprend, d'une étude de H. MARGOT - MARETTE et R.V. RIBOUD (16), une coupe à 15 % FeO dans le diagramme ternaire CaO. SiO₂. P₂O₅. Oxyde de Fer. On y voit en particulier les isothermes délimitant la surface du liquidus. A la figure 44, on trouvera par ailleurs la position de nos échantillons de scorie prélevés en cours de soufflage. A côté de chaque point, on a noté la température que nous avons calculée pour l'instant du soufflage considéré.

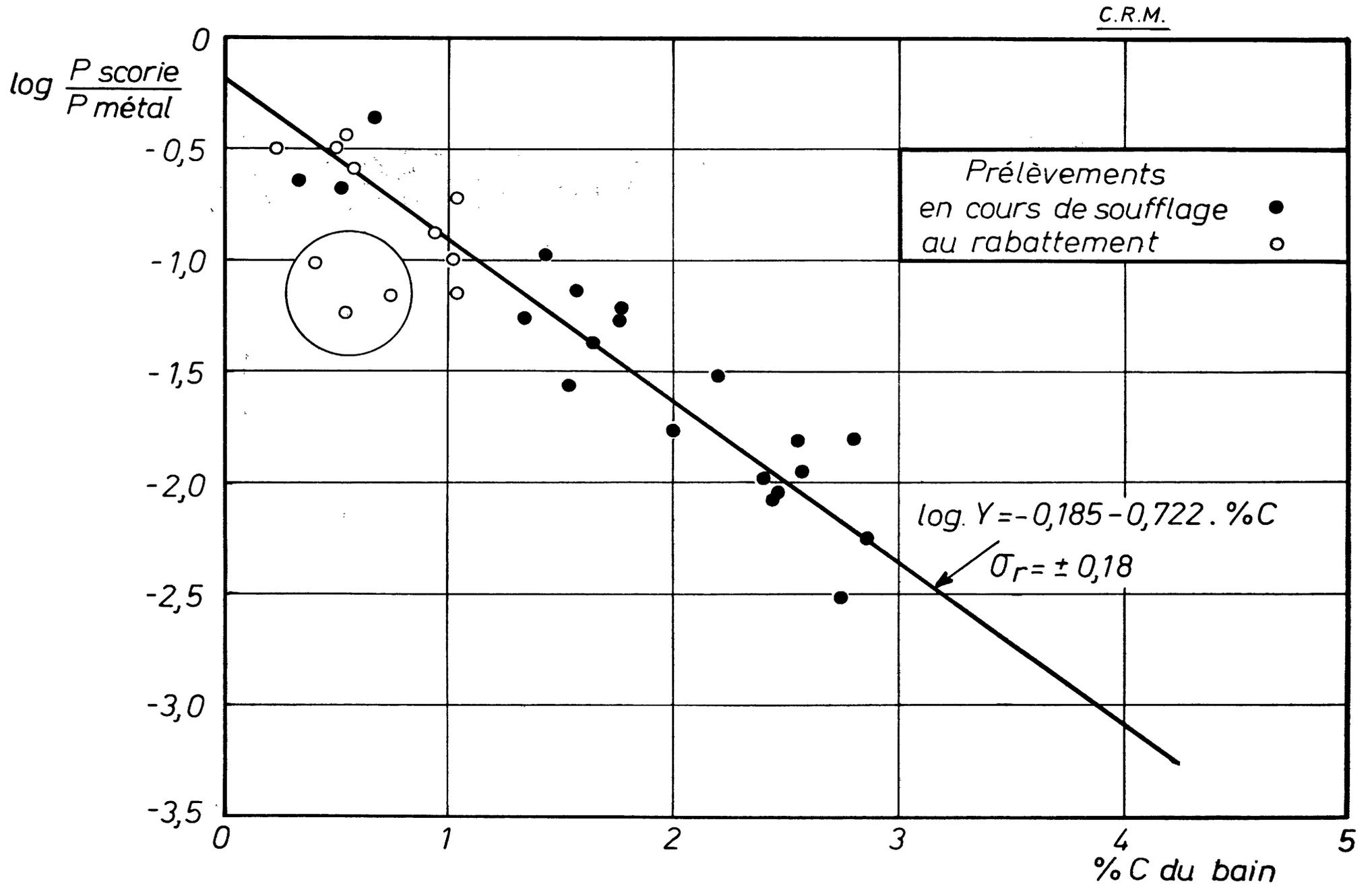
La question qui se pose est de savoir comment il faut agir sur les conditions du soufflage pour être sûr de rester au-dessus de la surface du liquidus.

On sait à ce sujet (16), qu'une augmentation de la teneur en fer de la scorie a pour conséquence d'abaisser très nettement les températures de liquidus et d'atténuer le relief. Cependant, si l'on désire conserver une position analogue dans le diagramme, il est nécessaire (6) qu'une addition de CaO soit effectuée en même temps que l'augmentation de FeO.

Cette explication propose en quelque sorte une loi d'addition de chaux applicable à notre exploitation. Si l'on se rappelle le diagramme 30 où nous avons représenté pour chacune des deux familles de coulées l'évolution du degré de saturation de la scorie, on devrait en conclure que dans le cas A, la mise de chaux devrait être plus importante au début du soufflage afin de couper le pic de la teneur en fer.

+ +

+



... .. durant la phase 1

C.R.M.

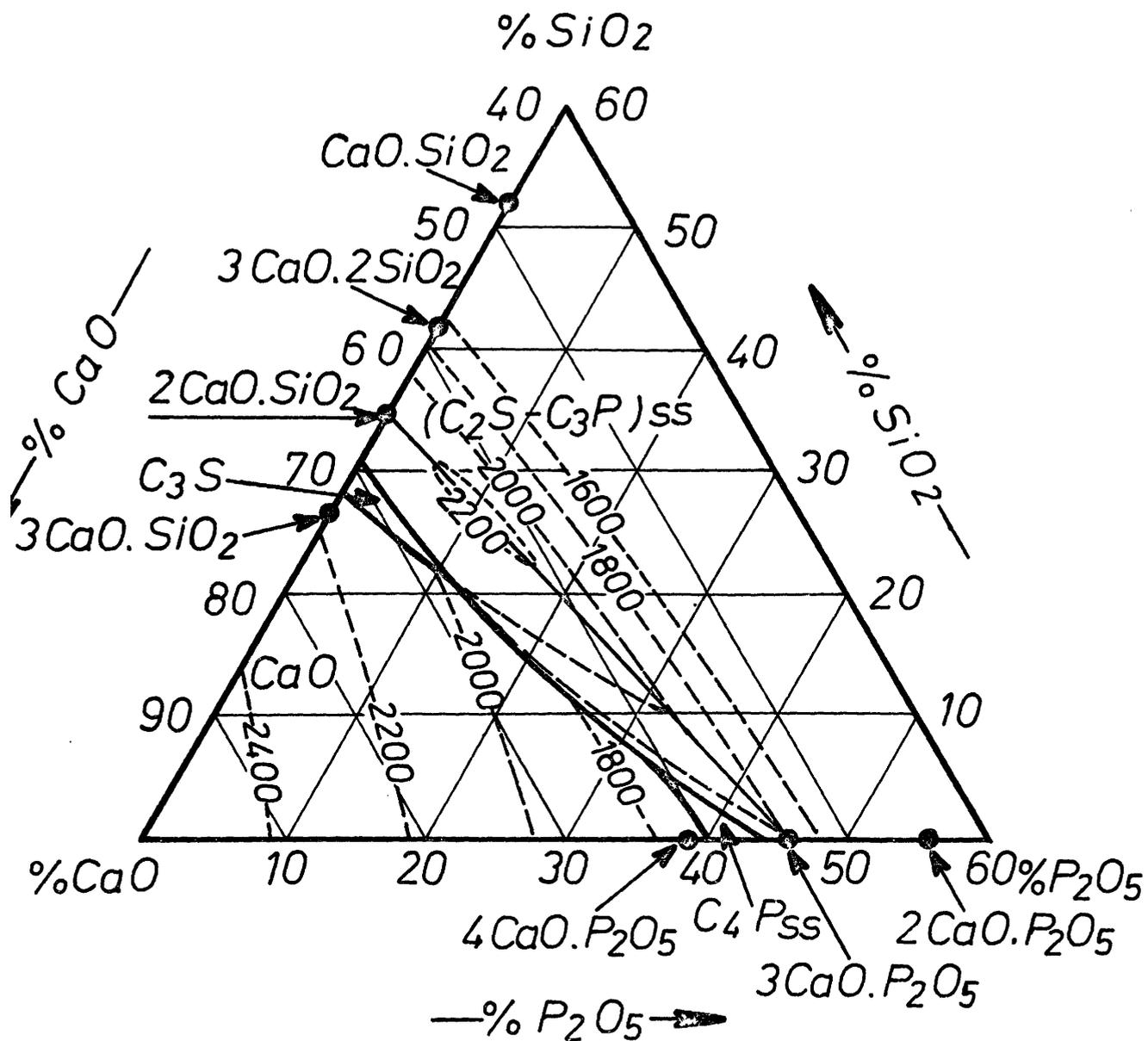


Fig. 43 : Diagramme de projection du liquidus du système $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ contenant 0% de FeO dans une atmosphère de $\text{CO}_2/\text{H}_2=9$.

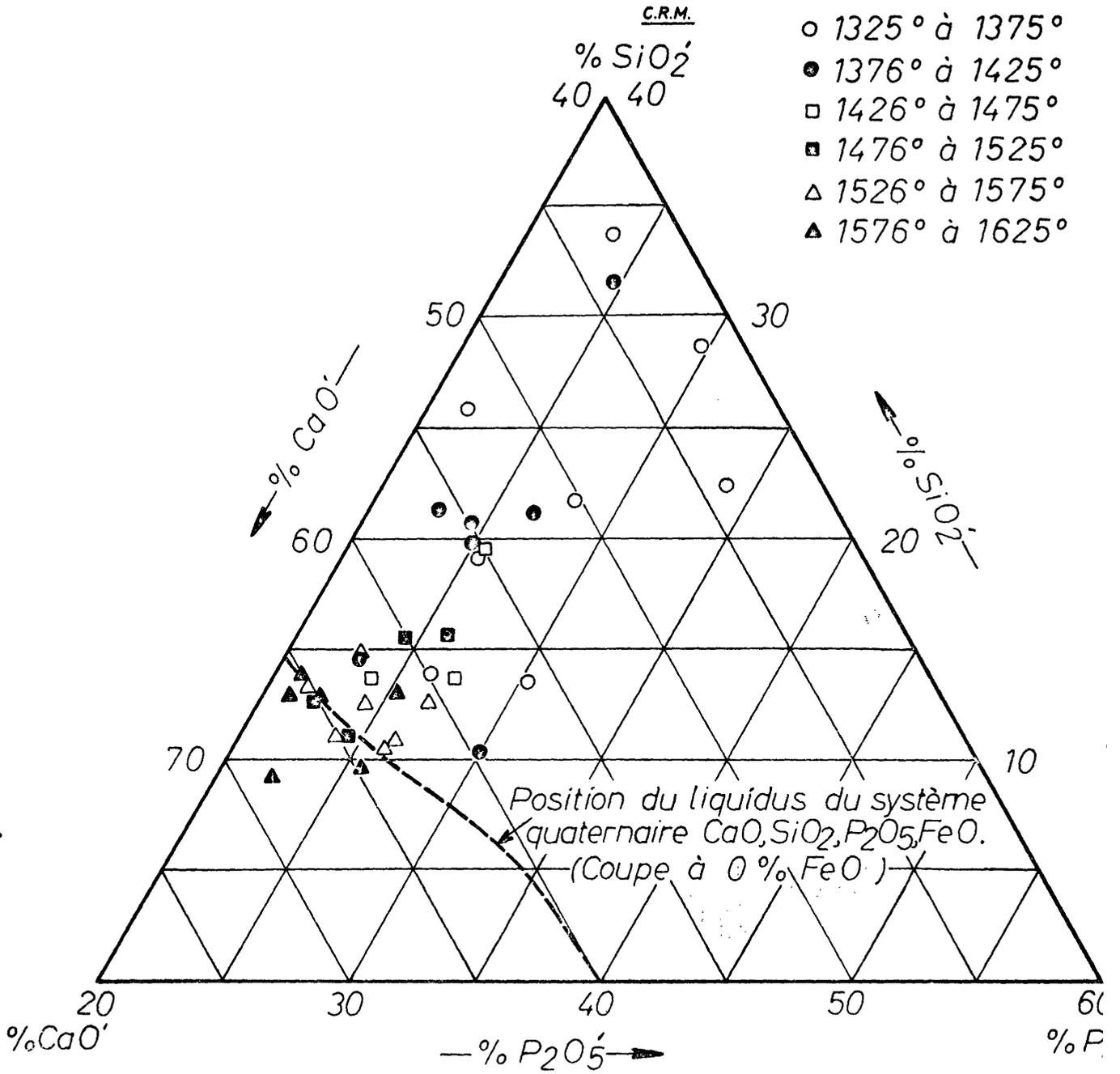


Fig. 4 - Situation des points de fusion dans le système $\text{CaO} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$.