

COMMUNAUTE EUROPEENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER
HAUTE AUTORITE

RECUEILS DE RECHERCHE CHARBON

TECHNIQUE MINIERE
VALORISATION DU CHARBON
COMBUSTION DU CHARBON

**Inflammation et combustion
de charbon gras sur grille**

RECUEIL N°
3

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

AVANT-PROPOS

La combustion de charbons qui s'agglutinent sur des grilles petites et moyennes est difficile; sans dispositifs spéciaux, elle n'est possible que dans certaines conditions. Les appareils de chauffage domestique et la petite industrie sont équipés dans la plupart des cas de tels foyers à grilles. A la longue seule l'automatisation de ces foyers pourra garantir au charbon sa part du marché. Cependant les conditions de combustion difficiles des charbons qui s'agglutinent s'opposent à l'automatisation. La connaissance des lois physiques fondamentales de la combustion de charbons qui s'agglutinent, essentiellement sur des grilles mobiles, et l'étude fondamentale de l'influence et des interactions des paramètres techniques de la combustion sur le processus de combustion constituent les bases pour des améliorations fondamentales des foyers à charbon gras et pour l'automatisation de ces foyers.

Le Centre d'études et de recherches des Charbonnages de France (CERCHAR), à Paris, a effectué des recherches afin de dégager ces principes. La présente brochure rend compte des résultats de ces recherches.

H. DEHNEN

G R I L L E E X P E R I M E N T A L E

ETUDE DE L'INFLAMMATION ET DE LA COMBUSTION
DES CHARBONS GRAS SUR GRILLE

P. DUMOUTET

J. DESSEINE

1. Objet du compte rendu

Nous présentons dans le présent compte rendu l'ensemble des résultats obtenus sur la grille expérimentale concernant l'inflammation et la combustion des charbons gras.

2. Paramètres étudiés

a) Nous avons étudié six charbons gras différents, tous pris sous des granulométries commerciales de grains :

- 3 charbons français en provenance respectivement de l'Aquitaine, du Nord-Pas-de-Calais et de la Loire,
- 1 charbon belge de Beeringen,
- 2 charbons de la Ruhr dont l'étude nous a été demandée par la Ruhrkohlen-Beratung dans le cadre de la "recherche sur la combustion du charbon" subventionnée par la Haute Autorité de la Communauté européenne du charbon et de l'acier.

Tous ces combustibles ont un indice de gonflement Afnor de 8,0 à 9,0 avec des indices de matières volatiles variant de 20,1 (Ruhr lot 1) à 30,5 (la Ricamarie et Beeringen).

Les granulométries sont les suivantes :

- 6 - 10 mm pour les charbons de l'Aquitaine et du Nord
- 10 - 20 mm pour le charbon de la Loire
- 5 - 10 mm pour le charbon belge
- 15 - 25 mm pour les charbons allemands

Les autres caractéristiques principales sont données dans le tableau 1 en annexe.

b) A l'exception du Beeringen, étudié seulement avec la plus forte hauteur de couche, tous ces combustibles ont fait l'objet de deux séries d'essais :

- avec une épaisseur de lit de 10 cm;
- avec une épaisseur de lit de 15 cm.

c) Comme pour les combustibles précédemment étudiés, le paramètre principal pour chaque série d'essais a été le débit d'air primaire soufflé sous la grille.

Nous l'avons fait varier :

- de 1000 à 2500 kg/m².h lors des séries avec une hauteur de couche de 10 cm,
- de 1000 ou 1500 à 2700 kg/m².h lors des séries avec une hauteur de couche de 15 cm.

d) Comme lors des précédentes campagnes, la vitesse de voûte restait, en principe, proportionnelle au rapport du débit d'air à la hauteur de couche. La vitesse "normale" est de 1 m/h pour un débit de 1000 kg/m².h et une hauteur de 10 cm; à une combustion neutre correspond, avec cette règle, une longueur de feu de 77 cm pour une densité de chargement de 0,7 et un pouvoir comburivore de 11 kg d'air par kg de charbon; toute variation dans la qualité de la combustion se traduit immédiatement par une variation de la longueur du feu.

Cependant, nous avons observé que la vitesse de voûte avait elle-même une influence non négligeable sur la qualité de la combustion dans le cas de ces combustibles agglutinants; ceci est particulièrement net quand l'adoption simultanée d'un faible débit d'air et d'une forte hauteur de couche conduit à opérer dans une gamme de vitesse de voûte très faibles.

Dans un appareil de dimension longitudinale donnée, on est évidemment conduit, comme nous l'avons fait, à réduire la vitesse de translation horizontale quand on diminue la puissance ou quand on augmente l'épaisseur du lit. Mais, d'après la remarque faite ci-dessus, l'influence de la vitesse sur la qualité sera d'autant plus importante que la grille sera plus courte. On se heurte donc ici à une difficulté pour l'extrapolation de nos résultats au cas (le plus général) où la grille a plusieurs mètres de longueur : par rapport à ce qui se passerait dans un tel foyer, les fortes épaisseurs de couche et les faibles débits d'air se trouvent "pénalisés" dans le cas du foyer expérimental.

C'est pourquoi nous avons, pour 4 combustibles en couche de 15 cm d'épaisseur, effectué des séries d'essais à débit d'air constant et vitesse de voûte variable. Dans deux cas en particulier (Carmaux et Lens), nous avons augmenté la vitesse de voûte jusqu'à lui donner, à la limite, la valeur "normale" pour une couche de 10 cm seulement. Bien entendu, la longueur du feu augmente avec la vitesse et de ce fait le lit ne se place plus géométriquement de la même façon par rapport aux parois radiantes de la chambre, la zone arrière étant en particulier complètement coupée du rayonnement émis par la zone la plus active.

e) Enfin, un dernier paramètre dont l'importance n'est apparue qu'au cours des essais est l'humidité superficielle du charbon.

L'influence de ce paramètre semble en relation étroite avec la teneur en fines du combustible : dans le cas des combustibles de la Ruhr, le pourcentage en déclassés fins apparaissait important à la suite d'une série de manipulations lors du stockage; dans ces conditions, ces combustibles conservés à l'abri de l'eau en trémie se comportaient très mal sur la grille, donnant en particulier une zone de fin de combustion extrêmement cahotique, au point qu'il était pratiquement impossible de définir une durée de combustion et donc de calculer le pouvoir gazéificateur moyen de l'air primaire qui est le principal critère de la qualité de la combustion dans notre étude. En reportant l'humidité des charbons à une valeur plus normale (4,6 % en moyenne), on a pu améliorer considérablement la structure de la zone arrière du feu et mener l'étude de façon satisfaisante.

Pour les autres combustibles, qui comportaient beaucoup moins de déclassés, il est certain que l'influence de l'humidité est beaucoup moins marquée. Il n'est pas exclu cependant que les combustibles qui ont été essayés avec un taux d'humidité superficielle relativement élevé (Ruhr lots 1 et 2 Beeringen) s'en soient trouvés légèrement favorisés, en particulier du point de vue des pertes en imbrûlés solides, par rapport aux autres charbons.

- f) Le retard maximum de soufflage était fixé à un sous-caisson (soit un retard moyen de 3,5 cm correspondant à un temps variable de 50 secondes à 3 minutes environ suivant la vitesse de voûte).

En fait, quatre essais ont été effectués avec une définition différente du retard. Ils portaient sur deux charbons brûlés en couche de 15 cm avec un débit d'air de 2000 kg/m².h. Le retard maximum était de trois sous-caissons. Les essais de ce type n'ont pas été multipliés car il apparaît très difficile d'analyser correctement l'influence de ce paramètre sur la grille expérimentale.

3. Aspect du lit en combustion et des résidus solides

a) Ligne d'inflammation superficielle

L'inflammation superficielle suit dans tous les cas sans difficulté la progression de la chambre de combustion.

Bien que l'observation visuelle de cette zone soit difficile depuis les modifications apportées à l'appareillage en vue de permettre l'étude avec différentes hauteurs de couche, nous avons pu constater que la ligne d'inflammation superficielle ne "décrochait" jamais de l'angle inférieur de la dalle avant de la chambre et qu'en général des flammèches éclairantes pénétraient même périodiquement de quelques millimètres sous la dalle avant; ce phénomène ne s'accroît pas quand on augmente le débit d'air, ce qui permet de penser que les risques d'une remontée de feu en amont de la chambre en période de soufflage ne sont pas aggravés par une augmentation de l'activité du feu dans sa zone avant.

Dans ce qui suit, nous confondrons la ligne d'inflammation superficielle avec l'arête inférieure de la dalle avant de la voûte, ce qui constitue dans tous les cas une approximation satisfaisante. Rappelons qu'à une abscisse donnée, le soufflage de l'air primaire n'est déclenché en moyenne que 50 secondes à 3 minutes plus tard suivant la vitesse de voûte utilisée. En fait, le front de soufflage perd évidemment de sa netteté dans l'épaisseur de la couche à cause de l'épanouissement des files gazeux au sein de celle-ci. La période d'inflammation du charbon se décompose donc en une période théoriquement "sans soufflage d'air" et une période "avec soufflage". Nous appellerons "durée totale d'inflammation" l'ensemble de ces deux périodes. La durée de combustion sera au contraire comptée à partir du déclenchement du soufflage car l'alimentation en air de la zone de retard théorique n'est obtenue qu'au prix d'une réduction du débit moyen dans la zone soufflée.

b) Structure physique de la couche

L'aspect du lit est l'aspect classique obtenu avec les charbons très agglutinants. Il varie avec le débit d'air de façon beaucoup moins spectaculaire que dans le cas des flambants gras.

Derrière la ligne d'inflammation superficielle on observe presque immédiatement le gonflement de la couche de charbon. Ce gonflement se poursuit sur une fraction importante de la longueur du lit, la zone de gonflement se prolongeant, surtout aux faibles débits d'air, par une zone où la surface de la couche gonflée reste sensiblement horizontale.

Avec les gammes "normales" de vitesse de voûte, le rapport de la hauteur maximale à la hauteur initiale de couche est en moyenne de l'ordre de 1,5 à 1,6 pour l'ensemble de nos essais, certains combustibles présentant une valeur légèrement inférieure (Ruhr lot 1 et Beeringen), d'autres une valeur un peu plus forte (la Ricamarie).

Quand on augmente le débit d'air de 1000 à 2000 kg/m².h, on observe généralement une augmentation de l'épaisseur maximale, mais de façon beaucoup plus nette avec une épaisseur initiale de 10 cm que dans le cas d'une épaisseur plus forte : au débit de 2000 kg/m².h, l'épaisseur gonflée représente en moyenne 1,7 fois l'épaisseur initiale dans le premier cas, 1'5 fois l'épaisseur initiale dans le second. Il semble que cette différence soit liée à l'utilisation de vitesses de voûte plus élevées avec les couches minces, de fortes vitesses de translation favorisant un "foisonnement" de la couche d'ailleurs favorable à l'obtention d'une combustion régulière grâce à une meilleure division des cokes. On peut remarquer dès à présent qu'un accroissement du débit d'air augmente la vitesse de combustion devant la vitesse d'inflammation (ce résultat est suffisamment classique), et on pourrait donc s'attendre à une réduction de l'épaisseur maximale aux fortes allures. De même, si on compare les gras aux flambants gras précédemment étudiés, on peut noter que les premiers ne gonflent pas plus que les seconds de façon spectaculaire, malgré des indices de gonflement très supérieurs, ce qui indique que le foisonnement du lit est obtenu beaucoup plus difficilement.

Au delà de 2000 kg/m².h, l'effet d'augmentation de la vitesse de combustion l'emporte, et on observe une stabilisation, et même dans le cas général une réduction de l'épaisseur maximale du lit.

A épaisseur de couche et débit d'air donnés, un accroissement de la vitesse de voûte favorise le gonflement de la couche.

Le gonflement apparent est un peu moins important dans le cas des charbons secs que dans le cas des charbons réhumidifiés d'après les comparaisons que nous avons pu faire sur les charbons gras allemands.

La zone à épaisseur de couche maximale se termine par un effondrement généralement brutal de la croûte de coke ou des mottes de coke formées.

La ligne d'effondrement progresse le plus souvent par bonds, ce qui rend difficile sa localisation précise par rapport à l'ensemble de la longueur du feu. Les pans de cokes qui se détachent peuvent atteindre 2 à 3 décimètres de longueur dans les plus mauvais cas, avec le gars de Ricamarie et les combustibles de la Ruhr à forte teneur en fines s'ils sont brûlés très secs par exemple.

On peut la situer en moyenne cependant dans le deuxième tiers du lit, généralement un peu plus tôt dans le cas d'une épaisseur initiale faible que dans le cas d'une épaisseur forte.

Dans l'ensemble l'effondrement se produit aussi plus tôt avec le Beeringen et le lot 1 de la Ruhr (humidifié) qu'avec le Lens et le Ricamarie. Avec le Carmaux, l'aspect est assez particulier, avec un affaissement assez tardif et relativement progressif, la surface du lit prenant un aspect de toit (dont les mottes de cokes figurent les tuiles) ou de pente ravinée.

L'influence du débit d'air sur la position de la ligne d'effondrement n'apparaît pas clairement pour tous les combustibles, ce qui est remarquable car son influence sur la position de la ligne de fin d'inflammation est au contraire, comme nous le verrons, extrêmement importante.

Aux débits d'air faibles ou modérés, on recule la ligne d'effondrement vers l'arrière du lit en augmentant la vitesse de voûte.

Derrière la ligne d'effondrement se situe la zone de combustion des cokes. Cette combustion est d'autant plus vive que les cokes sont petits car ils sont alors mieux répartis sur la grille. Dans les plus mauvais cas, les cokes peuvent atteindre des dimensions horizontales de l'ordre de 15 cm : ils sont alors dispersés et la ligne de fin de combustion perd toute netteté. C'est ce que nous avons observé avec les charbons de la Ruhr brûlés trop secs, dans de nombreux cas avec le gras de la Ricamarie, avec le gras de Lens, à faible allure de combustion, et souvent de façon plus marquée avec une épaisseur initiale de couche forte. Si le talus d'effondrement se déplace par bonds de grande amplitude, la ligne de fin de combustion tend à se comporter de la même façon et la longueur du feu devient irrégulière.

Une augmentation du débit d'air permet généralement de réduire les dimensions des cokes, surtout avec le gras de Lens. Des débit plus modérés suffisent avec le Ruhr 1 réhumidifié, avec le Beeringen et avec le Carmaux. Au contraire avec le gras de la Ricamarie, les cokes restent relativement importants aux plus fortes allures de combustion.

c) Nature des résidus solides

Au débit de 1000 kg/m².h, le lit de résidus est généralement constitué par un mélange de cendres frittées et de cendres pulvérulentes avec des cokes assez volumineux. L'épaisseur du lit de cendres est irrégulière et sa valeur moyenne varie avec le taux de cendres du charbon et l'épaisseur de couche entre 15 et 60 mm environ. Avec les combustibles de la Ruhr, on observe cependant déjà la formation de petits mâchefers; le lot n° 1 de la Ruhr est le seul combustible pour lequel l'importance des cokes résiduels apparaît acceptable à cette allure de combustion.

Au débit de 1500 kg/m².h, le mâchefer apparaît avec tous les combustibles y compris avec le Carmaux dont les cendres sont les plus réfractaires. L'épaisseur du lit de résidus diminue du fait de cette vitrification et de façon plus sensible pour une forte épaisseur initiale de couche. Parallèlement, l'importance des cokes diminue également avec tous les combustibles, spécialement avec les charbons de Lens et de Carmaux.

Aux plus fortes valeurs du débit, toutes les matières minérales sont vitrifiées avec les charbons à cendres les plus fusibles : gras de la Ruhr et de Lens. Le mâchefer reste cependant friable dans tous les cas. L'épaisseur du lit de résidus est assez uniforme, elle varie de 7 à 40 mm suivant le taux de cendres et la fusibilité, mais tend à devenir indépendante de l'épaisseur initiale de couche par suite d'une vitrification plus poussée dans le cas des couches de forte épaisseur. Les cokes résiduels sont petits et peu nombreux dans la quasi-totalité des cas.

4. Etude du phénomène d'inflammation

a) Vitesse verticale de propagation au sein du lit du phénomène d'inflammation

Cette vitesse est mesurée à trois reprises dans deux tranches superposées de la couche de charbon.

Avec les combustibles gras nous avons observé, de façon assez systématique, une accélération du phénomène d'inflammation avec la profondeur atteinte au sein du lit.

C'est pourquoi nous donnons sur les figures 1 à 3, outre les valeurs moyennes de la vitesse de propagation déterminées pour l'ensemble des deux tranches, la valeur moyenne calculée pour la seule tranche profonde dans le cas des essais en couche de 15 cm d'épaisseur initiale.

On voit que la seconde valeur est supérieure à la première de 6 % en moyenne. Cet écart paraît significatif et indique que la surface d'inflammation n'est pas plane et présente sa concavité vers la grille.

On peut évidemment supposer que, pour un débit d'air donné soufflé à contre courant, le mécanisme de propagation du feu ne se met en régime que progressivement. Il s'agirait alors d'une caractéristique propre aux combustibles très agglutinants car la même accélération n'a guère été mise en évidence aux cours des campagnes antérieures. Par ailleurs, la valeur moyenne de la vitesse pour une couche de 15 cm d'épaisseur serait systématiquement plus élevée que dans le cas d'une couche plus mince : or une telle différence ne peut pas être mise en évidence pour tous les combustibles.

On peut aussi penser que l'amélioration de la perméabilité apparente du lit au cours de la phase d'inflammation, liée à l'agglutination des grains, conduit à sous-alimenter en air le début de la zone d'inflammation au profit de la plage où le lit est enflammé sur la quasi-totalité de son épaisseur : la vitesse de propagation augmenterait donc parce que le débit d'air augmente ; à l'encontre de cette hypothèse, on peut cependant observer qu'une augmentation de la vitesse de voûte à débit d'air donné, qui doit logiquement améliorer la répartition d'air dans la couche en allongeant le phénomène dans le sens longitudinal de la grille, ne permet pas de réduire l'écart moyen entre les vitesses calculées dans les deux tranches superposées du lit et reste pratiquement sans effet sur la valeur moyenne de la vitesse.

Les courbes traduisant la variation de cette valeur moyenne en fonction du débit d'air pour les différents combustibles ont été reportées dans le graphique récapitulatif de la figure 3.

En fonction de la nature du charbon, on note des différences importantes, le gras de Lens s'enflammant plus vite et le gras de la Ricamarie moins vite que les autres combustibles.

En fonction du débit d'air, la vitesse est une fonction monotone croissante comme avec les charbons précédemment étudiés. Elle croît beaucoup moins vite que le débit d'air et paraît devoir plafonner pour les valeurs de débit comprises entre 2500 et 3000 kg/m².h sans que le maximum ait été atteint de façon certaine avec aucun des combustibles.

Si on compare ces résultats à ceux obtenus avec les flambants gras, on constate que la vitesse d'inflammation est en moyenne la même au débit de 100 kg/m².h, mais croît ensuite moins vite avec le débit d'air.

L'influence de l'humidité n'apparaît pas très importante d'après les comparaisons que nous avons pu faire dans le cas des combustibles de la Ruhr.

b) Etude du phénomène dans la tranche superficielle

Nous avons comme à l'accoutumée étudié la vitesse d'inflammation dans la tranche haute du lit à partir de l'écart moyen en temps à une abscisse donnée entre le passage de la ligne d'inflammation superficielle (confondue comme il a été dit plus haut avec le passage de l'avant-voûte) et les signaux d'inflammation donnés par les couples placés à 1,5 cm en dessous de la surface libre. Cet écart moyen est comparé au laps de temps théoriquement nécessaire pour enflammer une couche de 1,5 cm d'épaisseur à la vitesse de propagation moyenne calculée dans l'ensemble des deux tranches sous-jacentes.

Comme l'inflammation de la tranche superficielle se produit en l'absence théorique d'air soufflé - en fait grâce aux fuites d'air à travers la couche depuis la zone soufflée vers la zone de retard de soufflage - on peut s'attendre à ce que le phénomène d'inflammation prenne un certain retard Δt jusqu'à l'heure du déclenchement du soufflage d'air. Mais on peut penser aussi que le rayonnement des voûtes réfractaires intéresse une tranche d'épaisseur non négligeable - disons un calibre - dont il provoque l'inflammation brutale, faisant prendre ainsi une certaine avance au phénomène d'inflammation.

Expérimentalement, le "retard" Δt a une valeur absolue très faible et il est négatif dans la quasi-totalité des cas, ce qui signifie que la vitesse d'inflammation dans la tranche superficielle est, avec les combustibles gras, très légèrement supérieure à la vitesse moyenne de propagation dans les couches profondes. Ceci met en évidence la très forte "inflammabilité" des charbons gras. Les seules valeurs positives de Δt , inférieures d'ailleurs à 30 secondes, sont obtenues avec les combustibles de la Ruhr réhumidifiés. Dans tous les autres cas on observe des valeurs comprises entre 0 et - 1 minute.

La valeur du retard Δt augmente légèrement en règle générale quand le débit d'air augmente : ce fait semble à nouveau indiquer que les remontées de feu ne sont pas spécialement à craindre à forte allure de combustion.

En fait, cette influence apparente du débit d'air est certainement liée à l'utilisation de vitesses de voûte croissantes avec le débit : à débit d'air donné, le retard tend aussi à augmenter avec la vitesse de voûte.

Ces influences sont masquées quand on ne maintient pas constante l'humidité du charbon : dans le cas des gras allemands, la réhumidification du charbon fait passer systématiquement le retard de valeurs faiblement négatives à des valeurs faiblement positives.

Enfin, la hauteur de couche ne paraît pas avoir d'influence décelable sur la valeur du retard.

De ce qui précède, on déduit que la durée totale d'inflammation peut être calculée à moins d'une minute près comme le quotient de l'épaisseur du lit à la vitesse verticale moyenne de propagation (en admettant que cette vitesse ne se modifie pas considérablement au voisinage immédiat de la grille, ce qui est très probable). Il faut rappeler que cette durée est alors comptée à partir de l'entrée du combustible dans la chambre, et non à partir du déclenchement du soufflage d'air.

Pour un combustible dont la vitesse d'inflammation varie de 40 à 54 cm/h dans la gamme de débits d'air étudiés, la durée totale d'inflammation varie donc de 15 à 11 minutes pour une couche de 10 cm et de 22,5 à 16,5 minutes pour une couche de 15 cm. La durée d'inflammation "soufflée", comptée à partir du début du soufflage d'air, varie donc avec les gammes normales de vitesses de voûte de 13 à 10 minutes pour une couche de 10 cm et de 19,5 à 15,5 minutes pour une couche de 15 cm : ces variations sont faibles.

5. Etude de la combustion

a) Rappel des critères retenus

Rappelons que les deux critères essentiels retenus pour caractériser la qualité de la combustion sont dans notre étude : le pouvoir gazéificateur de l'air et le taux de pertes par imbrûlés solides.

- Le pouvoir gazéificateur moyen de l'air primaire est la quantité de combustible pur transformé en gaz par l'unité de masse de comburant, en moyenne pour l'ensemble de la zone de feu. Le pouvoir gazéificateur est calculé à partir du débit d'air primaire moyen A par unité de surface et de temps, de la masse de charbon sec chargée par unité de surface de grille M_s , du taux de cendres du combustible K , du taux de pertes par imbrûlés solides I défini ci-dessous et de la durée totale de combustion t_c (comptée à partir du déclenchement du soufflage d'air) par la formule :

$$g = \frac{M_s}{A t_c} \quad \frac{100 - K - I}{100}$$

On choisit les unités pour exprimer g en grammes de charbon pur par kilogramme d'air primaire.

M_g est déterminé par pesée. Nos expériences tendent à montrer que la densité de chargement en combustible brut est, pour un combustible et une granulométrie donnés, assez indépendante de l'humidité superficielle du charbon. M_g décroît donc avec le taux d'humidité. Les valeurs moyennes mesurées de la densité de chargement sont données dans le tableau 1 pour les différents combustibles.

t_c est déterminée par observation de la longueur du feu. La longueur moyenne L_c est liée à t_c par la relation linéaire $L_c = V t_c$, V étant la vitesse de voûte. L_c est la longueur totale diminuée de la largeur moyenne de la zone de retard de soufflage. La précision sur t_c dépend de la netteté et de la régularité de la progression de la ligne de fin de combustion.

- Le taux de pertes par imbrûlés solides est calculé à partir de la teneur moyenne en cendres K' des résidus prélevés sur une plage de la grille sous laquelle on a fait cesser le soufflage d'air immédiatement derrière la ligne de fin de combustion. Il est donné par la formule :

$$I = \frac{100 - K'}{K'} K$$

et représente la masse de carbone imbrûlé en pour-cent de la masse de combustible sec chargé.

Dans les cas où la fin de combustion est très lente et où les résidus sont très hétérogènes, il pourrait être préférable de prélever les résidus sur une très large plage de la grille, même si le débit d'air a été coupé tardivement en certains points de cette plage. Par souci d'homogénéité avec la méthode de détermination lors des campagnes antérieures, nous avons continué à prélever les résidus sur une zone de 21 cm seulement; il en résulte une certaine dispersion des valeurs expérimentales dans certains cas, particulièrement aux faibles débits d'air.

b) Etude du pouvoir gazéificateur

- En fonction de la nature du combustible, on note des différences très sensibles sur la valeur moyenne du pouvoir gazéificateur.

Le lot 1 de gras de la Ruhr réhumidifié, le Beeringen et le Carmaux donnent dans l'ensemble les pouvoirs gazéificateurs les plus élevés, tandis que le gras de la Ricamarie se singularise par des valeurs nettement inférieures à celles atteintes avec les autres charbons.

On peut noter qu'une vitesse d'inflammation élevée est a priori une caractéristique défavorable à l'obtention d'une bonne structure de couche, puisqu'en enflammant rapidement le charbon on est conduit à ne brûler qu'une faible partie du carbone fixe pendant la phase d'inflammation et qu'à un instant donné de cette phase la tranche de combustible susceptible de s'agglutiner est de forte épaisseur. Ceci explique peut-être le mauvais comportement du Lens aux faibles débits d'air, la vitesse de combustion prenant dans ce cas sa valeur la plus faible devant la vitesse d'inflammation. Par contre le gras de la Ricamarie devrait plutôt être, avantaagé par sa vitesse d'inflammation relativement faible.

Les propriétés du charbon pendant sa phase plastique doivent également jouer un rôle important.

Nous n'avons malheureusement pas fait subir aux charbons envoyés les tests au plastomètre et au dilatomètre utilisés par les carbonisateurs. Par recoupement avec les résultats obtenus au laboratoire de carbonisation sur des lots de charbon d'origine et de composition voisines, on peut penser que le

lot 1 de la Ruhr présente la plus faible fluidité de tous les charbons essayés (fluidité maximale Gieseler de l'ordre de 15 degrés d'arc/minute) et le gras de la Ricamarie la plus forte (4000 degrés d'arc/minute pour un lot de cette origine à 26,5 % de matières volatiles). Il est vrai que le Carmaux devrait lui aussi être désavantagé par une fluidité élevée (3500 degrés/minute), mais il présente un indice de gonflement à l'essai Audibert-Arnu de 300 % (contre 165 % pour le gras de la Ricamarie et 60 % pour le lot 1 de la Ruhr) et ce facteur peut jouer en sens inverse en diminuant la cohésion du coke.

- En fonction du débit d'air, le pouvoir gazéificateur suit des lois différentes avec les différents charbons (cf. figures 4 à 6).

Avec le gras de Carmaux, on observe un maximum assez marqué pour un débit de l'ordre de 1500 kg/m².h.

Avec les charbons allemands et belges, le maximum est beaucoup moins accentué et il apparaît dans une gamme de débits plus élevés.

Enfin avec les gras de Lens et de la Ricamarie, le pouvoir gazéificateur est une fonction monotone croissante du débit d'air dans toute la gamme de débits étudiés.

Il est difficile de donner une explication sûre de ces différences de comportement, mais on peut remarquer que le pouvoir gazéificateur moyen est la résultante d'un ensemble complexe de phénomènes. En particulier, il est très vraisemblable que l'augmentation du débit d'air améliore le pouvoir gazéificateur dans tous les cas dans la zone médiane du lit, mais le passage d'une grande quantité d'air dans la plage de combustion des cokes ne peut y augmenter notablement l'activité du feu si les mottes n'ont pas été suffisamment divisées. Suivant l'importance relative de l'un et l'autre de ces phénomènes, on conçoit que le pouvoir gazéificateur puisse ou non passer par un maximum en fonction de la valeur d'un débit uniforme d'air soufflé sous la grille.

En dépit de ces disparités, on peut énoncer une règle simple si on remarque que dans le cas qui apparaît le plus défavorable aux forts débits d'air (gras de Carmaux), le pouvoir gazéificateur n'a diminué que de 5 % environ au plus fort débit étudié par rapport à sa valeur maximale; comme la masse de combustible brûlée par unité de surface de grille et de temps est proportionnelle au pouvoir gazéificateur et au débit d'air (aux variations du taux en imbrûlés solides près), on voit qu'on brûlera au débit de 2700 kg/m².h 1,7 fois plus de charbon qu'au débit de 1500 kg/m².h au prix d'un accroissement relativement faible de l'excès d'air (nous verrons que cet accroissement est lui aussi de l'ordre de 5 %). On peut donc dire, d'après les courbes des figures 4 à 6, que tous les combustibles gras doivent être brûlés de préférence avec des débits d'air supérieurs à 2000 kg/m².h.

- En fonction de l'épaisseur de couche, si on analyse les résultats obtenus avec les gammes "normales" de vitesses de voûte (vitesses proportionnelles au débit d'air et inversement proportionnelles à l'épaisseur), on constate que le pouvoir gazéificateur est dans le cas général plus élevé avec la forte hauteur de couche, mais que son accroissement est relativement faible, d'autant plus faible avec tous les charbons que le débit d'air est modéré, au point que dans deux cas au moins (gras de Carmaux et de Lens), on obtient de meilleurs résultats avec une couche de 10 cm qu'avec une couche de 15 cm au débit de 1000 kg/m².h (cf. figure 4). Quand il existe une valeur maximale du pouvoir gazéificateur, cette valeur correspond à un débit d'air plus élevé avec la forte épaisseur de couche.

Toujours en fonction de l'épaisseur, mais si on considère maintenant les séries d'essais effectuées avec la même gamme de vitesses pour les deux hauteurs de lit étudiées, on observe que l'intérêt de l'utilisation d'une forte hauteur de lit est très appréciable à tous les débits d'air. Pour des valeurs moyennes de l'ordre de 80 g/kg, le pouvoir gazéificateur s'accroît de 12 g/kg avec le Lens et de 10 g/kg avec le Carmaux à tous les débits d'air.

La différence entre les conclusions des deux paragraphes précédents s'explique évidemment par l'influence propre de la vitesse de voûte. Cette influence avait été trouvée négligeable avec les charbons non agglutinants, mais avait déjà été mise en évidence dans le cas des flambants gras aux faibles débits d'air : elle paraît liée au pouvoir agglutinant du charbon. Si on compare cette fois les résultats obtenus à débit d'air et épaisseur de lit donnés avec différentes vitesses de voûte, on voit que l'intérêt d'un accroissement de la vitesse est fort net, surtout aux faibles valeurs du débit qui conduisent à adopter de toute façon des vitesses relativement basses.

On peut, dès lors, se demander si l'intérêt des débits d'air élevés constaté avec la plupart des charbons subsisterait si on avait pu utiliser une vitesse indépendante du débit. Un tel problème ne se pose pas si on examine le cas d'un appareil de dimension longitudinale donnée, mais il peut être intéressant de comparer les comportements probables de charbon dans deux appareils de taille différente fonctionnant à des allures spécifiques de combustion différentes, pour donner, par exemple, la même puissance. Si on relève les points correspondants aux conditions de marche suivantes :

- hauteur de couche : 15 cm
- vitesse de voûte : 1,5 m/h

sur les courbes de la figure 4 relatives aux deux gammes extrêmes de vitesse de voûte, on constate dans le cas du Lens que le pouvoir gazéificateur s'accroît de 5 g/kg quand on réduit le débit d'air de 2250 à 1500 kg/m².h. De même, pour une valeur de vitesse uniforme de 1,0 m/h, le pouvoir gazéificateur s'accroît de 6 g/kg quand on réduit le débit de 1500 à 1000 kg/m².h. On peut en conclure qu'en débit de la forme des courbes données dans la figure 4, le gras de Lens brûlera mieux à faible allure sur une grille de grande longueur qu'à allure plus poussée sur une petite grille.

On peut aussi observer que l'intérêt des forts débits d'air sera d'autant moins net que la longueur de grille sera grande : le maximum du pouvoir gazéificateur, quand il existe, se déplace vers les faibles débits quand on augmente la vitesse de voûte; dans tous les cas la chute du pouvoir gazéificateur vers les faibles débits d'air est beaucoup plus nette avec la gamme de vitesses faibles qu'avec la gamme de vitesses fortes. On rencontre donc bien ici une difficulté pour l'extrapolation des résultats obtenus sur la grille expérimentale au cas des foyers de grandes dimensions.

On peut, par contre, déduire simplement des discussions qui précèdent un résultat pratique intéressant : puisqu'il faut concilier les possibilités d'utilisation d'une forte hauteur de couche et d'une forte vitesse de grille, les combustibles gras devront être réservés à des appareils d'assez forte puissance. On pourra bien entendu, pour limiter la puissance, réduire dans la mesure du possible la largeur de la grille, du fait de la bonne perméabilité des couches de charbons agglutinants, des effets de rive sont moins à craindre qu'avec les maigres ou les flambants secs; il convient cependant que la largeur reste grande devant les dimensions des cokes éventuellement formés; si on se fixe par exemple comme limites inférieures une largeur de 0,6 m, et à la puissance nominale une vitesse de 4 m/h et une épaisseur de couche de 15 cm, la consommation horaire sera de l'ordre de 250 kg/h correspondant à une puissance utile de l'ordre de 1600 th/h.

- Quant à l'influence de l'humidité sur le pouvoir gazéificateur, nous ne l'avons pas étudiée de façon quantitative. Quand on brûle trop secs des combustibles contenant un pourcentage appréciable de déclassés fins, on observe moins une augmentation de la longueur moyenne du feu que des variations plus ou moins cycliques de cette longueur qui rendent sans intérêt le calcul d'un pouvoir gazéificateur moyen car elles obligent de toute façon à prévoir une surlongueur de grille de l'ordre de 20 à 25 %, même en acceptant à certains moments une augmentation notable des pertes par imbrûlés solides.

c) Etude des pertes par imbrûlés solides

La variation du taux de pertes par imbrûlés solides en fonction du débit d'air primaire est représentée pour les différents combustibles sur les figures 7 à 10.

En fonction de la nature du combustible, on note des différences importantes aux faibles valeurs du débit d'air, le gras de Lens étant le combustible le moins bien épuisé à la fin de la zone de combustion relativement vive des cokes, le lot 1 de gras de la Ruhr réhumidifié étant le mieux épuisé. Il faut signaler que la très forte hétérogénéité des résidus de certains charbons à faible allure de combustion rend assez difficile le prélèvement d'un échantillon représentatif : de là résulte une certaine dispersion des points expérimentaux. Une étude annexe, non présentée ici, effectuée en prélevant les résidus sur une autre plage de la grille, fait d'ailleurs apparaître des différences légèrement moins accusées entre les charbons, sans modifier toutefois leur classement.

Sauf dans le cas du gras de la Ricamarie, l'influence du débit d'air est extrêmement marquée : on réduit considérablement les pertes par imbrûlés solides en augmentant le débit. La pente de la courbe est maximale dans le cas du Lens qui présente un pouvoir gazéificateur croissant avec l'allure, mais c'est aux très forts débits que les pertes sont minimales avec tous les charbons, même avec le Carmaux : pour des valeurs de l'ordre de 2500 kg/m².h, seul le gras de la Ricamarie donne encore des pertes appréciables par imbrûlés solides.

Cette observation renforce considérablement l'intérêt des forts débits d'air pour la combustion des charbons gras et le rend évident même pour des appareils de grandes dimensions.

L'accroissement de la hauteur de couche a également un effet bénéfique dans tous les cas et tout spécialement dans les plus mauvais.

Contrairement à ce qui était attendu compte tenu de la géométrie du foyer, l'augmentation de la vitesse de voûte à débit d'air donné n'a généralement pas conduit à un accroissement des pertes par imbrûlés solides. Ce résultat est très important pour la pratique car il montre qu'un fort rayonnement dans la zone de fin de combustion n'améliore pas de façon spectaculaire les possibilités d'épuisement du charbon : il s'agit moins de brûler les cokes que de limiter leurs dimensions au moment de leur formation, c'est-à-dire dans la zone d'inflammation. De cette remarque on peut déduire qu'on pourra, pour la combustion des gras, se contenter d'une voûte d'inflammation relativement courte. Il est extrêmement probable aussi qu'on obtiendrait le pouvoir gazéificateur optimal en "modulant" le débit d'air de façon à obtenir une bonne division des cokes grâce à un fort débit dans la zone d'inflammation et à limiter l'excès d'air en utilisant un débit beaucoup plus faible vers l'arrière de la grille. Notons que les variations de perméabilité de la couche conduisent dans le cas général à une distribution exactement inverse de l'air soufflé.

Enfin, le pourcentage d'imbrûlés solides augmente de façon sensible, surtout si le pourcentage en déclassés fins est élevé, si le charbon est brûlé trop sec même en prévoyant une assez forte surlongueur de grille pour tenter d'achever la combustion. Nous n'avons pas mené d'étude quantitative à ce sujet car le choix de la ligne de fin de combustion devient trop arbitraire. Une augmentation du retard de soufflage produit un effet de même sens, le taux d'imbrûlés étant multiplié par 2,5 en moyenne au débit de 2000 kg/m².h et à vitesse de voûte donnée pour les gras de Carmaux et de la Ricamarie.

d) Etude de la durée de combustion et du rapport de la durée d'inflammation à la durée de combustion

Le pouvoir gazéificateur de l'air est calculé pour chaque essai à partir de la durée de combustion et du taux de pertes par imbrûlés solides. Réciproquement, on peut déduire des courbes des figures 4 à 9 les durées théoriques de combustion en fonction des différents paramètres de l'étude.

Quand on augmente le débit d'air de 1000 à 2700 kg/m².h, la durée de combustion passe en moyenne, avec les gammes "normales" de vitesse de voûte, de 80 à 28 minutes pour une couche de 15 cm et de 55 à 20 minutes environ pour une couche de 10 cm.

Si on compare ces valeurs à celles trouvées dans le chapitre 3 pour la durée d'inflammation "soufflée", on constate que la phase d'inflammation représente un peu moins du quart de la longueur du feu au faible débit et un peu plus de la moitié au débit maximum.

Pour une longueur de grille donnée, le front d'inflammation est donc beaucoup moins incliné sur le plan horizontal aux fortes allures de combustion qu'aux faibles allures. Ceci provient de ce que la vitesse de combustion augmente beaucoup plus rapidement que la vitesse d'inflammation avec le débit d'air. Aux fortes allures, le charbon s'enflamme en couche plus mince, en moyenne, qu'aux faibles débits d'air. C'est peut-être ce qui permet d'obtenir une meilleure division des cokes : remarquons, en effet, qu'à débit d'air donné on diminue aussi la pente du front d'inflammation en augmentant la vitesse de voûte et qu'un effet bénéfique comparable est obtenu dans ces conditions sur le pouvoir gazéificateur.

Notons au passage que dans une étude en pot-foyer le front d'inflammation est toujours horizontal, c'est-à-dire qu'on simule le cas d'une vitesse de grille infinie. Si on peut parler de difficultés d'extrapolation aux cas des grandes grilles pour l'étude sur grille expérimentale, il semble qu'une étude en pot-foyer ne puisse absolument pas rendre compte de ce qui se passe, avec les combustibles agglutinants, sur une grille de dimensions faibles ou moyennes.

On peut aussi remarquer que l'effondrement de la surface libre du lit intervient bien après la fin de l'inflammation à faible allure et pratiquement à la fin de cette phase (quelquefois même un peu avant) aux plus forts débits.

e) Etude de l'excès d'air

Le pouvoir gazéificateur est aussi en relation avec l'excès d'air qu'on peut calculer à partir du rapport du pouvoir gazéificateur théorique g_n (qui correspondrait à une combustion neutre) au pouvoir gazéificateur réel g .

Le pouvoir gazéificateur g_n a été calculé pour chaque combustible à partir de sa composition; il est donné dans le tableau 1 en annexe. Nous l'avons aussi représenté par une flèche horizontale sur les figures 4 à 7. On est en excès d'air si g est inférieur à g_n .

On voit sur les figures que c'est toujours le cas avec les gammes "normales" de vitesse de voûte, sauf pour le lot 1 de la Ruhr en couche de 15 cm entre 1300 et 2100 kg d'air/m².h environ. Par contre, avec la plus forte gamme de vitesses utilisée pour la couche de 15 cm, la combustion primaire du Carmaux est légèrement réductrice entre 1100 et 2500 kg/m².h et celle du Lens devient réductrice à partir de 1500 kg/m².h (cf. figure 4).

Dans la pratique industrielle, on ne mesure pas le débit d'air primaire et on n'utilise pas la notion de pouvoir gazéificateur. C'est pourquoi nous donnons dans les figures 16 à 21, à titre d'exemples, la transcription des figures 4 à 7 dans un système de coordonnées plus usuel.

- en abscisses nous avons porté la masse de combustible sec brûlée par unité de surface de grille et de temps ("taux de combustion") : c'est le produit du pouvoir gazéificateur par le débit d'air, majoré des masses de cendres et d'imbrûlés correspondant au combustible pur réellement gazéifié.

$$M_s = g A \frac{100}{100 - K - I}$$

- en ordonnées nous avons porté l'excès d'air calculé par la formule :

$$e = 100 \frac{g'_n}{g} - 1$$

g'_n étant le pouvoir gazéificateur théorique corrigé pour tenir compte des imbrûlés solides.

$$g'_n = \frac{1}{a_n - 0,116 I} \frac{100 - K - I}{100}$$

où :

a_n est le pouvoir comburivore du charbon sec.

(Dans le tableau 1 et les figure 4 à 7, g_n représente la valeur non corrigée

$$g_n = \frac{1}{a_n} \frac{100 - K}{100})$$

Comme la qualité de la combustion doit être jugée en prenant aussi en considération le taux de pertes par imbrûlés solides, nous avons également reporté cette grandeur en fonction de la nouvelle variable adoptée en abscisses sur les figures 19 à 21.

Il est clair sur ces figures que les meilleurs résultats d'ensemble sont obtenus pour une consommation spécifique égale ou légèrement supérieure à 200 kg/m².h : sauf pour un seul des combustibles essayés, l'excès d'air avec une couche de 15 cm est alors inférieur ou égal à 10 % et les pertes par imbrûlés solides inférieures ou égales à 1 %.

Pour une grille de 0,6 m de largeur consommant 250 kg de charbon par heure, la surface de grille utile exigée à cette allure de combustion est de 1,25 m², ce qui correspond à une longueur utile de 2,1 m. A la vitesse de 4 m/h, le temps de séjour du charbon sur la partie soufflée est alors de 31,5 minutes qui correspond évidemment à cette allure à la durée moyenne de combustion d'une couche de 15 cm de l'un des charbons étudiés. Il y a évidemment lieu de prévoir une légère surlongueur, ne serait-ce que pour tenir compte des performances inférieures à la moyenne de certains charbons.

6. Maximum de température atteint par les barreaux de grille

a) Valeur du maximum

Rappelons que la température d'un des barreaux de grille est mesurée par un couple chromel-alumel placé dans le métal à faible distance de la surface horizontale supérieure en contact avec le feu. La température initiale est la température ambiante. Dans un foyer à grille mobile, les barreaux subissent une succession de chauffages et de refroidissements et la température de retour (qui dépend en particulier de la vitesse de grille) introduit un nouveau paramètre dans la définition du cycle thermique; dans un foyer à grille fixe (foyer à poussoir par exemple) ce sont toujours les mêmes barreaux qui subissent l'échauffement maximal et les températures localement atteintes pourraient être très supérieures à celles mesurées sur la grille expérimentale; c'est pourquoi la grille est presque toujours refroidie dans ce dernier cas.

Les températures maximales atteintes en fonction du débit d'air primaire pour les différents combustibles étudiés sont données dans les figures 10 à 12. La dispersion des points expérimentaux est beaucoup plus forte qu'avec les combustibles non agglutinants : elle est liée à l'hétérogénéité du lit dans la zone de fin de combustion sous laquelle le barreau est échauffé.

On note en fonction de la nature du combustible des différences extrêmement importantes bien mises en évidence dans le graphique récapitulatif de la figure 12. Au débit de 2000 kg/m².h, la température maximale varie de 260°C pour le gras de Carmaux à 565°C pour le lot 1 de la Ruhr. Ces écarts surprenants ne paraissent pas liés uniquement à la structure de la couche puisque les gras de la Ricamarie et de Beeringen se suivent dans le classement des charbons d'après ce critère. Ils ne semblent pas non plus être provoqués par les différences de granulométrie, le Lens 6-10 mm s'intercalant entre les deux 15-25 mm. Par contre, la fusibilité des cendres paraît jouer un rôle assez important, les charbons à cendres fusibles donnant, quand la fin de combustion est assez active, les températures les plus élevées.

En fonction de l'épaisseur initiale, on note pour quelques combustibles une augmentation de la température maximale quand on passe d'une couche de 10 à une couche de 15 cm (gras de la Ruhr et surtout gras de Lens). Cette influence est cependant assez faible; elle n'est mise en évidence ni pour le Carmaux, ni pour le gras de la Loire. Remarquons que sur un appareil à grille mobile un accroissement de la hauteur du lit s'accompagne, à allure de combustion donnée, d'une diminution de la vitesse de grille, donc d'une réduction de la température de retour pour un maximum donné; cet effet peut l'emporter en pratique surtout dans les gammes de très fortes vitesses de grille.

En fonction du débit d'air primaire, on note comme à l'accoutumée une nette tendance de la valeur maximale à s'abaisser quand l'allure de combustion augmente : quand la masse de combustible brûlée est sensiblement proportionnelle au débit d'air soufflé, l'effet de meilleur refroidissement des barreaux aux forts débits est le phénomène prépondérant.

La vitesse de voûte n'a pas d'influence décelable sur la température maximale de barreau mais au contraire nous avons noté une assez nette tendance à l'augmentation de cette température quand le charbon est brûlé plus humide. L'écart dans les deux séries d'essais effectuées avec les gras de la Ruhr avec des taux d'humidité superficielle très différents est en moyenne de 65°C pour le lot 1 et de 50°C pour le lot 2. Ce résultat a priori surprenant peut s'expliquer par l'amélioration de la structure de la couche qui permet d'obtenir dans la zone de fin de combustion un lit plus homogène et plus actif.

b) Localisation du maximum

Avec les combustibles non agglutinants, le maximum de température des barreaux de grille est localisé très près de la ligne d'extinction, dans les toutes dernières minutes de la combustion. Il n'en est pas de même avec les charbons agglutinants, ce qui s'explique puisque la zone arrière du lit n'est le siège que d'une combustion de coques relativement lente. La dispersion sur la localisation du maximum est d'ailleurs grande : elle est liée à l'hétérogénéité du lit.

On peut dire que le maximum est atteint dans la quasi-totalité des cas dans le deuxième ou le troisième quart de la zone de fin de combustion. On l'observe très tôt avec les gras de la Ricamarie et de Carmaux brûlés en couche de 15 cm, mais aussi avec le Beeringen, ce qui est plus surprenant car ce combustible donne un lit assez homogène. On l'observe au contraire relativement tard avec le Lens et le lot 1 de la Ruhr.

Le maximum se rapproche généralement de la ligne de fin de combustion quand on diminue l'épaisseur de couche et quand on augmente le débit d'air. Ce dernier résultat est à rapprocher de l'amélioration de la structure du lit aux fortes allures; on l'observe d'ailleurs de façon particulièrement nette avec les gras de Lens et de la Ricamarie qui brûlent d'autant plus correctement que le débit d'air est élevé; il est aussi très sensible avec le lot 2 de la Ruhr.

7. Etude de la pression sous grille

a) Pression sous couches non enflammées

Les pressions mesurées avant les essais sous la couche de combustible cru sont données en fonction du débit d'air pour les différents charbons dans la partie supérieure des figures 13 à 18.

On peut admettre que les courbes de variation sont identiques, tant en couche de 10 cm qu'en couche de 15 cm, pour le Lens et le Carmaux 6-10 mm, pour le Beeringen 5-10 mm et pour le gras de la Ricamarie 10-20 mm. Rappelons qu'il s'agit de granulométries commerciales et que les charbons n'ont pas été recalibrés avant essai (les mesures faites sous les couches de 10 cm de gras de la Ricamarie sont entachées d'erreur et les résultats correspondants ne sont pas donnés dans la figure 16). Le lot 2 de la Ruhr conduit à des pressions légèrement plus faibles tandis que le lot 1 (qui contient 42,2 % de plus grand que 16 mm contre 19,3 % pour le lot 2) donne des couches beaucoup plus perméables.

Quand la hauteur de lit est augmentée de 50 %, la pression sous couche crue à débit d'air donné n'est majorée que de 20 % environ.

Quand le débit d'air passe de 1000 à 2000 kg/m².h, la résistance de la couche passe de 4 à 13 mm CE pour une couche de 10 cm et de 5 à 16 mm CE pour une couche de 15 cm dans le cas des combustibles de petits calibres. A ces valeurs correspond, pour la loi de variation de la pression en fonction du débit, un exposant égal à $\frac{5}{3}$. Avec le lot 1 de la Ruhr, la courbe s'approche d'une forme parabolique, $\frac{5}{3}$ l'exposant excédant la valeur 1,8.

Notons que, même avec le gras de la Ruhr, le pourcentage en déclassés fins est trop faible pour que l'humidité superficielle influe de façon spectaculaire sur la perméabilité de la couche crue. Nous avons vu que sa valeur est pourtant suffisante pour jouer un rôle important sur la régularité de structure de la couche enflammée et la qualité de la combustion.

b) Evolution de la pression sous grille au cours de l'essai :

Avec les combustibles non agglutinants, on observe un très important maximum de pression sous grille au début de la phase de fin de combustion : à la fin de la phase d'inflammation en effet la hauteur de la couche active est maximale, la température en couche est élevée et provoque une forte augmentation du volume et de la viscosité des gaz; pendant la phase de fin de combustion, la hauteur de couche diminue et la température moyenne passe rapidement par un maximum.

Ce phénomène existe également pour les combustibles agglutinants, mais il s'en superpose un second qui intervient, lui, dans la zone d'inflammation. Au moment du déclenchement du soufflage d'air, la pression sous grille ne peut pas passer instantanément d'une valeur nulle à la valeur mesurée sous couche crue : du fait de l'épanouissement des filets gazeux au sein de la couche, il existe une pression sous grille mesurable en amont du front de soufflage et, au moment du passage de celui-ci, on observe un accroissement brutal de la pression mais la valeur mesurée avant essai sous couche crue n'est pas immédiatement atteinte; au fur et à mesure que le front de soufflage s'éloigne du point de mesure, le débit d'air tend vers sa valeur théorique ce qui doit se traduire par une augmentation de la pression sous grille.

Dans le cas des charbons non agglutinants, la perméabilité apparente de la couche diminue pendant la phase d'inflammation à la fois parce que la hauteur de la tranche active s'accroît et parce que sa température augmente : toutes les influences allant dans le même sens, la pression sous grille augmente jusqu'au maximum signalé ci-dessus qui n'intervient qu'après la fin de la phase d'inflammation. Mais si le combustible est suffisamment agglutinant, la perméabilité de la couche s'accroît du fait de l'augmentation du calibre réel,

et cette influence s'opposant à celle du débit d'air et l'emportant sur elle dès que le débit est sensiblement stabilisé à sa valeur théorique, on observe un maximum de pression sous grille avant la fin de la phase d'inflammation.

Dans le cas général, on aura donc deux maxima de pression sous grille avec les combustibles agglutinants :

- le premier pendant la phase d'inflammation est un maximum "apparent", lié à la non uniformité du débit d'air à proximité du front de soufflage. On observe ce maximum dans presque tous les cas au bout d'un temps représentant 15 à 25 % de la durée de combustion, donc dans le dernier tiers de la zone d'inflammation à faible allure et à la fin du premier tiers de cette zone avec les plus forts débits d'air. Il est toujours inférieur à la pression sous couche crue, décroissant lentement en valeur relative quand l'allure augmente pour se stabiliser aux forts débits à une valeur d'autant plus élevée que la structure de la couche est plus homogène : la valeur limite représente environ 90 % de la pression sous couche crue avec le lot 1 de la Ruhr et 65 % de cette pression avec le gras de la Ricamarie (cf. figure 13 à 18). On peut noter que dans le cas du lot 1 de la Ruhr, le maximum apparent de pression disparaît à faible allure de combustion : on retombe alors sur une courbe de même allure qu'avec des combustibles non agglutinants.
- le second maximum est de même nature que celui qu'on observe avec tous les charbons; nous le désignons par l'expression "maximum réel". Il intervient le plus souvent dans le troisième quart de la durée de combustion, d'autant plus tard en moyenne que le débit d'air est élevé, et à débit donné que la vitesse de voûte est forte. Comme la pression sous grille à la fin de la phase d'inflammation est inférieure à la pression sous couche crue, le maximum peut être inférieur ou supérieur à cette valeur. A un débit d'air donné, le maximum est d'autant plus fort en valeur relative que les coques sont mieux divisés : au débit de 1500 kg/m².h, il représente 1,2 fois la pression sous couche crue avec le lot 1 de la Ruhr et 0,65 fois la pression sous couche crue avec le gras de la Ricamarie. En fonction du débit d'air, la valeur relative du maximum décroît assez rapidement comme pour tous les combustibles précédemment étudiés (cf. figures 13 à 18); il en résulte qu'aux forts débits le maximum réel est inférieur au maximum apparent (seulement au-dessus de 2500 kg/m².h pour le lot 1 de la Ruhr) alors qu'aux faibles allures c'est le maximum réel qui l'emporte (sauf dans le cas du gras de la Ricamarie qui donne des maxima réels très faibles). Avec le gras de Carmaux, les deux maxima paraissent venir se confondre à faible débit, sensiblement à la fin de la phase d'inflammation; le maximum réel de pression semble se produire prématurément avec ce charbon; rappelons que le maximum de température de barreau était lui aussi atteint très tôt dans la phase de fin de combustion. D'une façon générale, les deux maxima de pression sont d'autant plus distincts et marqués que le débit d'air est élevé.

L'influence de la hauteur de couche sur la valeur relative des maxima n'apparaît qu'avec un seul des combustibles étudiés (gras de Lens, figure 14). Dans ce cas, il semble que le rapport de l'un ou l'autre maximum à la pression sous couche crue augmente avec l'épaisseur du lit. Si on compare aux résultats obtenus avec les flambants gras, on est conduit à en déduire que l'augmentation de la hauteur de couche ne permet pas, dans le cas des gras, d'améliorer sensiblement la structure de la couche (cf. CR M.21/4 du 27 Août 1963).

8. Etude de la composition des gaz de combustion primaire

Lors d'un grand nombre d'essais, nous avons prélevé avec une canne refroidie des gaz de combustion immédiatement au-dessus de la surface libre du lit. La canne étant à une abscisse fixe, le phénomène de combustion se déplace sous elle et on peut suivre l'évolution de la composition des gaz pendant tout le processus. En admettant l'hypothèse de l'équi-répartition de l'air, on peut ainsi théoriquement retrouver la composition moyenne, d'où le pouvoir gazéificateur moyen; mais on peut de plus localiser les zones de combustion

oxydante et les zones de combustion réductrice et en tirer des enseignements en vue de l'obtention d'une combustion secondaire efficace.

Cette étude a été faite systématiquement lors des premières campagnes d'essais sur la grille expérimentale, mais dans le cas des charbons très agglutinants il est pratiquement impossible d'en tirer des conclusions quantitatives du fait de l'hétérogénéité du lit : en fait, les gaz de combustion sont, sur la plus grande partie du lit, réducteurs au-dessus et au voisinage immédiat des mottes de coke, oxydants à l'aplomb des fissures du lit - et a fortiori au-dessus des plages de la grille pratiquement dégarnies de combustible. Il est donc impossible avec la sonde de prélever un échantillon représentatif de l'ensemble des gaz issus de la couche à une distance donnée du front d'inflammation. De plus, la vitesse des filets oxydants est visiblement très supérieure à la vitesse des filets réducteurs d'après l'aspect des flammes, l'ordre de grandeur de ces vitesses étant dans tous les cas trop faible pour faire l'objet d'une mesure quelconque.

Nous dirons seulement à ce sujet que les combustibles très agglutinants sont essentiellement caractérisés à ce point de vue par l'importance de la zone oxydante de fin de combustion, les gaz issus de la zone centrale du lit restant globalement réducteurs dans la quasi-totalité des cas. En augmentant le débit d'air, on tend avec la plupart des charbons à diminuer la longueur de la zone terminale de combustion oxydante, mais de façon moins nette qu'avec les flambants gras; de plus aux débits d'air très élevés, le caractère oxydant de la combustion des coques risque de s'accroître si ces derniers n'ont pas été suffisamment réduits. De là l'intérêt d'une diminution du débit d'air de l'avant à l'arrière du lit déjà signalé au chapitre 5.

Le problème de la combustion secondaire est celui du mélange des filets gazeux, tant à l'échelle des mottes de coke qu'à l'échelle des deux zones principales successives, réductrice puis oxydante. (La zone initiale de combustion oxydante a une importance très faible). La combustion étant dans l'ensemble oxydante dans la majorité des cas, on cherchera à utiliser une masse d'air secondaire faible mais injectée au-dessus du lit de façon à provoquer le brassage le plus énergiques possible des gaz de combustion primaire.

9. Conclusions

L'étude sur la grille expérimentale du comportement des combustibles très agglutinants est compliquée par différents phénomènes qui ont d'ailleurs pour origine commune la structure hétérogène du lit en combustion.

- la vitesse du déplacement relatif de charbon et des parois radiantes a une influence propre sur la qualité de la combustion, ce qui introduit un paramètre indépendant supplémentaire et interdit d'extrapoler, sans formuler quelques réserves importantes, les résultats numériques obtenus aux cas des foyers dont la dimension longitudinale est très différente de celle de la chambre utilisée.
- l'humidité superficielle est aussi un paramètre important, au moins quand le pourcentage en déclassés fins est élevé.
- l'efficacité d'un accroissement du débit d'air pour obtenir une meilleure division des coques est différentes suivant les charbons, et il en résulte que les lois de variation du pouvoir gazéificateur sont plus complexes et plus variées qu'avec les combustibles faiblement agglutinants.
- la courbe de pression sous grille est compliquée par une amélioration rapide de la perméabilité du lit au cours de la phase d'inflammation. Elle présente en général deux maxima successifs.
- il est impossible de tirer des renseignements quantitatifs de la composition d'échantillons gazeux prélevés au-dessus de la couche à différents stades de la combustion du fait d'une forte hétérogénéité de composition et de vitesse à l'échelle des mottes de coke.

On a décelé en outre une accélération de la vitesse d'inflammation avec la profondeur atteinte au sein du lit, accélération qui est sans doute elle aussi liée à la variation de perméabilité.

L'hétérogénéité du lit dans la phase de fin de combustion conduit enfin à une certaine dispersion dans les valeurs des maxima de température atteints par les barreaux et surtout à des difficultés dans un grand nombre de cas pour l'appréciation correcte de la durée de combustion et du taux de pertes par imbrûlés solides.

Cependant des règles pratiques relativement simples peuvent être tirées de cet ensemble d'essais.

- a) On a intérêt à brûler les combustibles agglutinants avec un fort débit d'air primaire : même quand le pouvoir gazéificateur présente un maximum pour des débits de l'ordre de 1500 kg/m².h, on utilisera la surface de grille de façon plus rationnelle, et on réduira les pertes par imbrûlés solides en portant le débit à 2000 kg/m².h au moins. Toutefois, une amélioration de qualité pourra être recherchée en abaissant le débit sous la zone terminale de combustion des cokes; il faudra donc s'opposer à la tendance naturelle de l'air à passer au contraire préférentiellement dans cette région.
- b) Il faudra aussi chercher à augmenter simultanément la hauteur du lit et la vitesse de voûte. Ceci conduit à réserver dans la mesure du possible les combustibles gras à des installations d'assez fortes puissances, et à augmenter au maximum l'allongement de la grille (rapport de la longueur à la largeur) si on veut quand même utiliser ce type de charbons dans des appareils de puissances plus faibles.
- c) L'intérêt des forts débits sera d'autant plus net que la grille sera courte. On ne doit donc s'attendre à un fonctionnement satisfaisant à allure ralentie que dans des appareils de grandes dimensions.
- d) L'épuisement du charbon devra être recherché par une meilleure mise en condition du lit dans la zone d'inflammation plutôt que par le maintien d'une température de chambre très élevée au-dessus du lit : l'utilisation d'une voûte longue ne paraît pas pouvoir apporter d'amélioration substantielle et ne se justifie donc pas.
- e) Dans les meilleurs conditions, on peut obtenir avec la plupart des charbons gras une combustion d'ensemble légèrement réductrice, mais la quantité d'air secondaire nécessaire est toujours faible, le rôle essentiel de cet air étant en fait de brasser énergiquement les filets de gaz de combustion primaire dont la composition est très hétérogène.
- f) Certains charbons gras conduisent à des températures maximales de barreaux très élevées. Nous avons trouvé à ce sujet des différences très marquées entre les divers combustibles essayés. Pour expliquer ces différences, il semble qu'il faille considérer à la fois la fusibilité des cendres et la structure du lit obtenue après inflammation complète.

L'ingénieur,

Le chef du groupe COMBUSTION,

J. DESSEINE

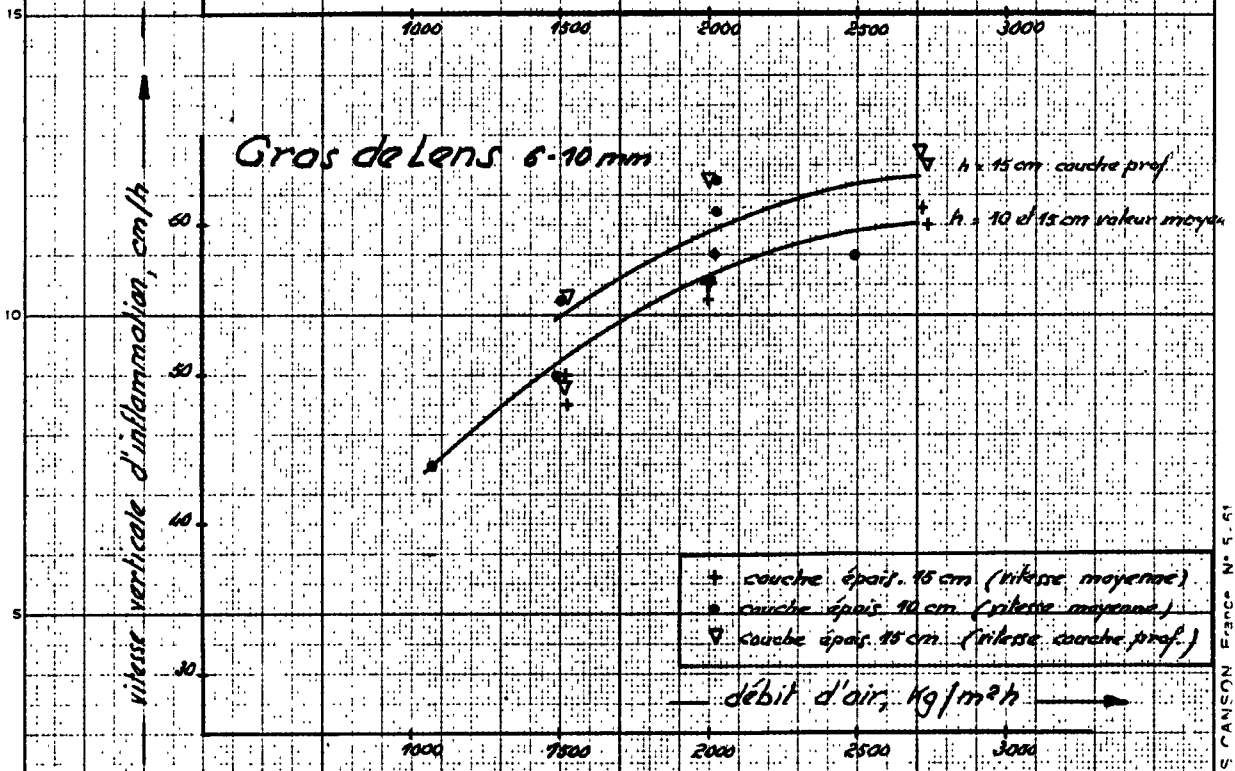
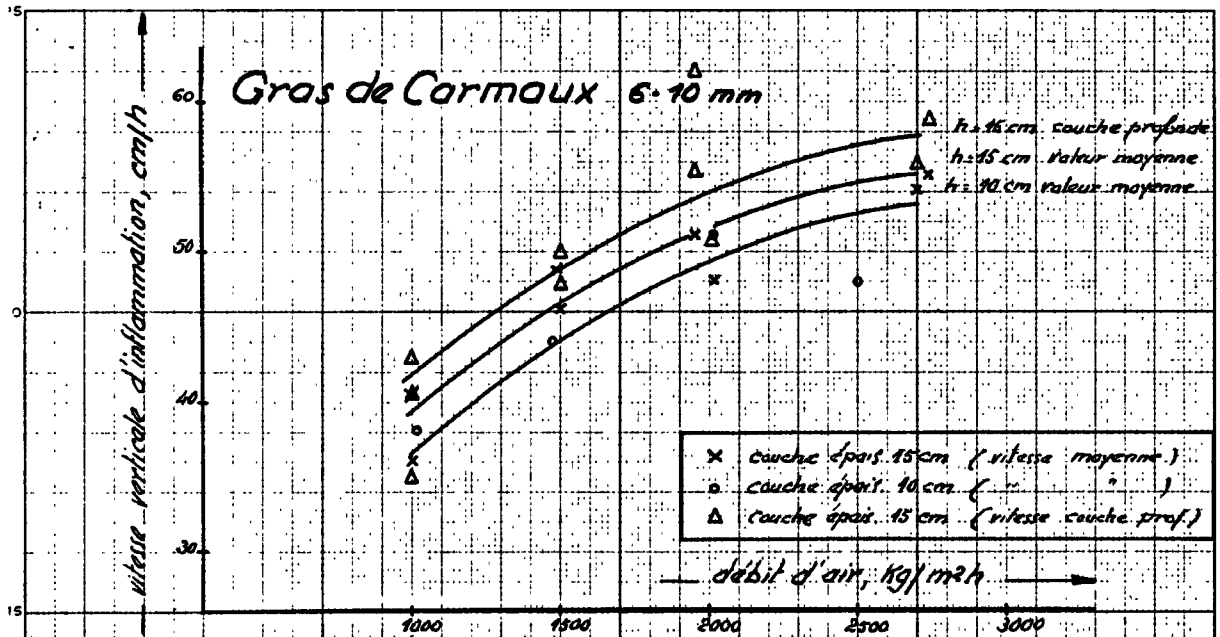
P. DUMOUTET

G R I L L E E X P E R I M E N T A L E

Caractéristiques principales des combustibles

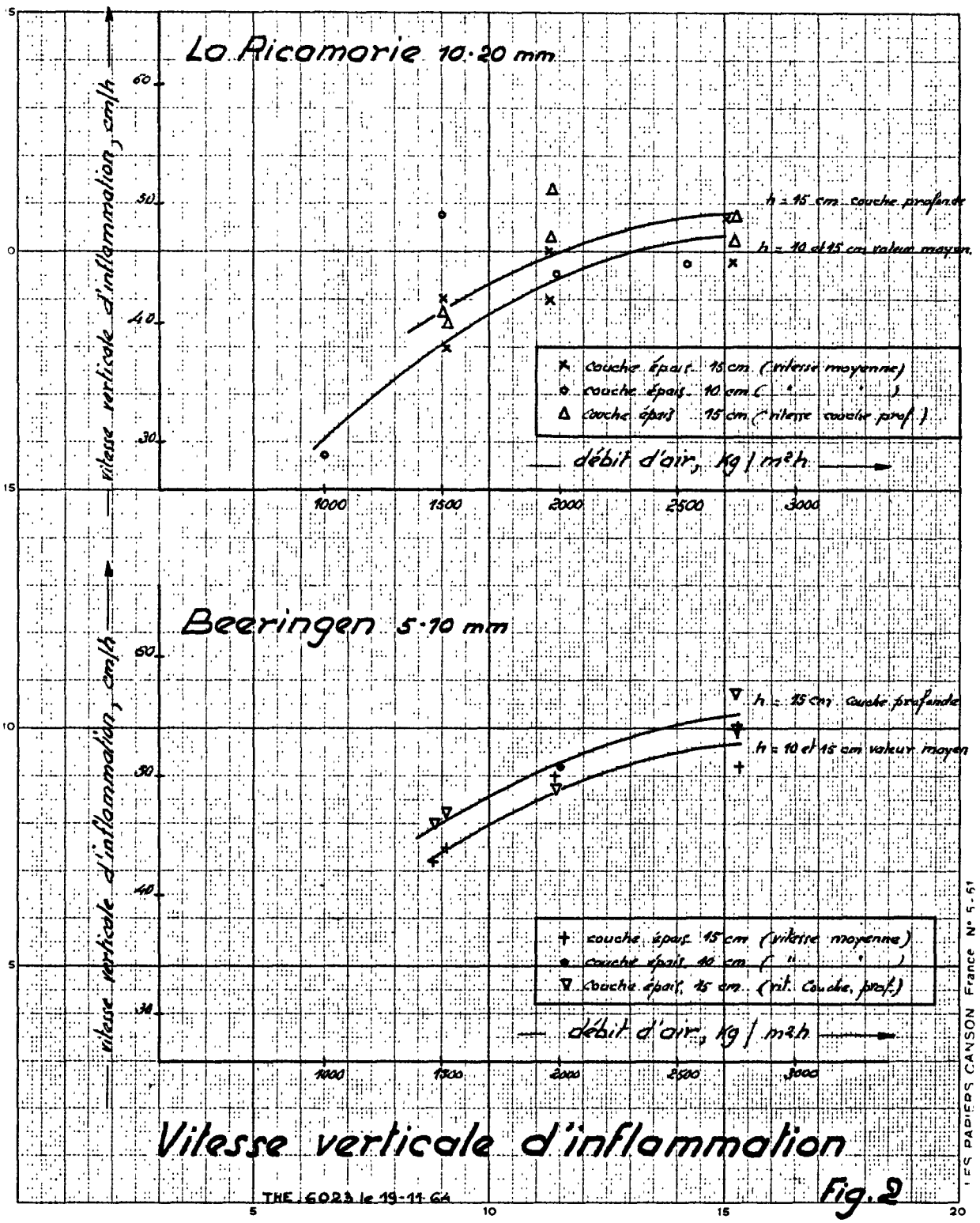
TABLEAU I

Origine Granulométrie mm n° de lot	Carmaux 6-10 2690	Lens 6-10 2713	La Ricamarie 10-20 2691	Beeringen 5-10 2709	Ruhr 1, 15-25 2734	Ruhr 2 15-25 2735
Cendres %	9,0	4,7	7,6	5,5	4,4	6,2
Matière volatiles %	25,5	23,7	30,5	30,5	20,1	27,1
Pouvoir calorifique supérieur mth/kg	7810	8310	7885	8045	8220	8020
Indice Roga	79,5	83,8	81,1	78,6	72,2	77,4
Indice de gonflement	8,0	8,5	9,0	8,5	8,0	8,5
Fusibilité des cendre °C						
Atmosphère	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>	<u>Oxyd.</u> <u>Réd.</u>
Début fusion	1450 1450	1280 1150 1320 1210	1380 1260 1405 1320	1385 1375 1410 1415	1290 1150 1320 1230	1400 1160 1420 1290
étalement		1360 1270	1435 1380	1440 1460	1360 1340	1440 1370
Carbone %	80,1	86,6	79,9	81,5	85,2	82,0
Hydrogène %	4,8	4,9	5,1	5,1	4,6	5,0
Oxygène %	4,0	3,6	5,0	5,5	3,2	4,5
Azote %	1,4	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5
Soufre %	0,5	0,7	1,2	0,9	0,9	1,3
Pouvoir gazéificateur théorique $\frac{\text{g pur}}{\text{kg air}}$	84,2	82,0	85,0	82,7	84,0	84,5
Densité moyenne de chargement kg sec/dm ³	0,691	0,683	0,688	0,654	0,708	0,708
Humidité moyenne %	1,8	1,3	1,9	4,6	4,6	4,6



Vitesse verticale d'inflammation

Fig. 1



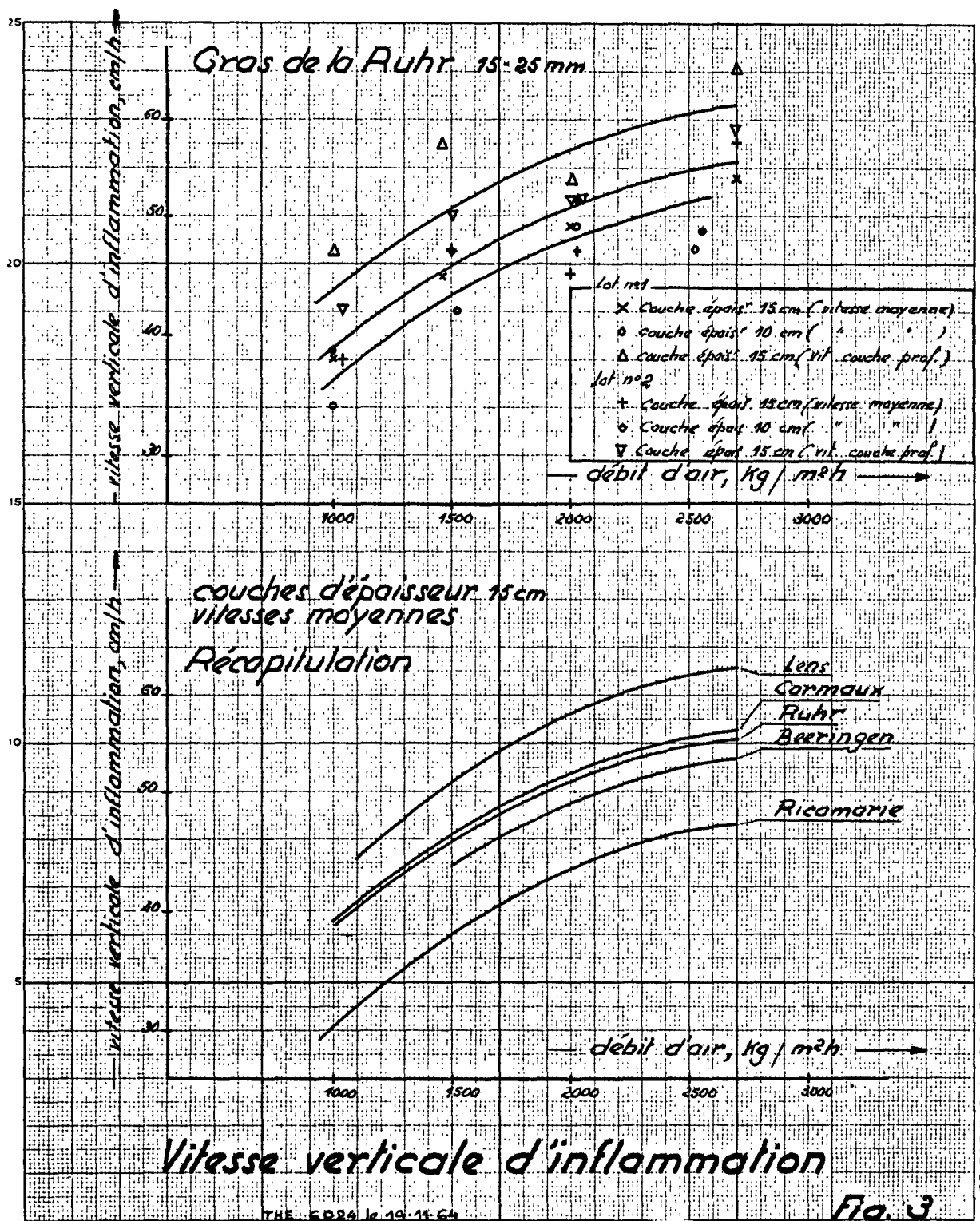
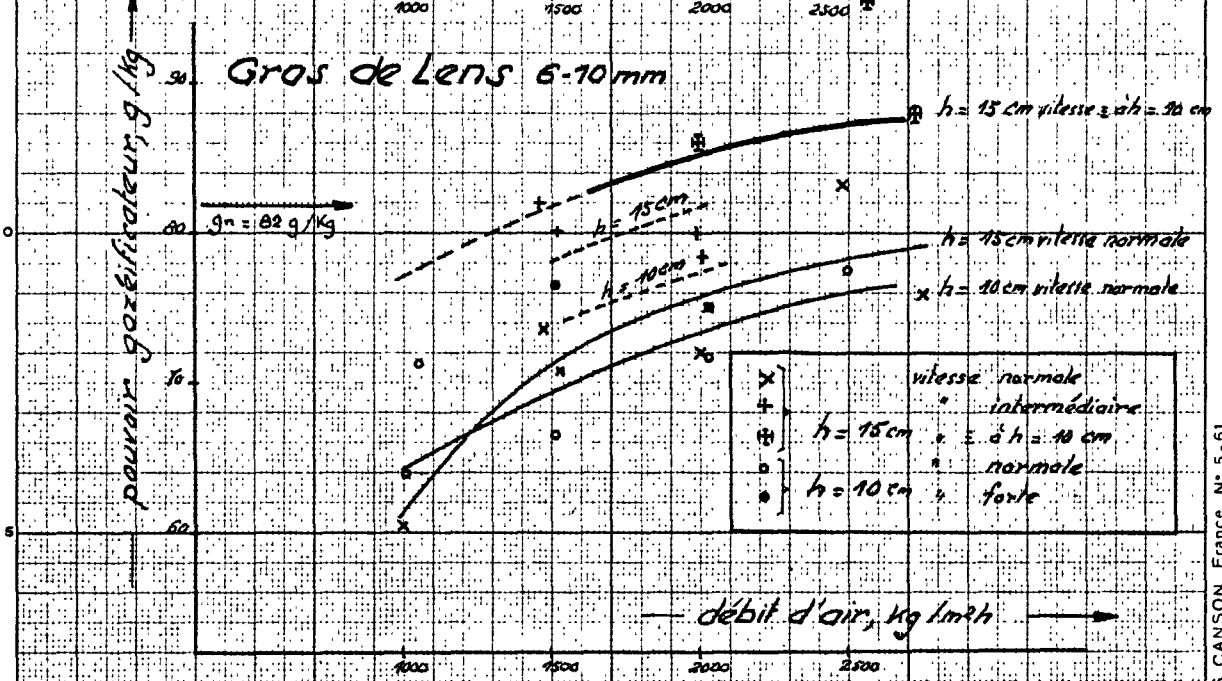
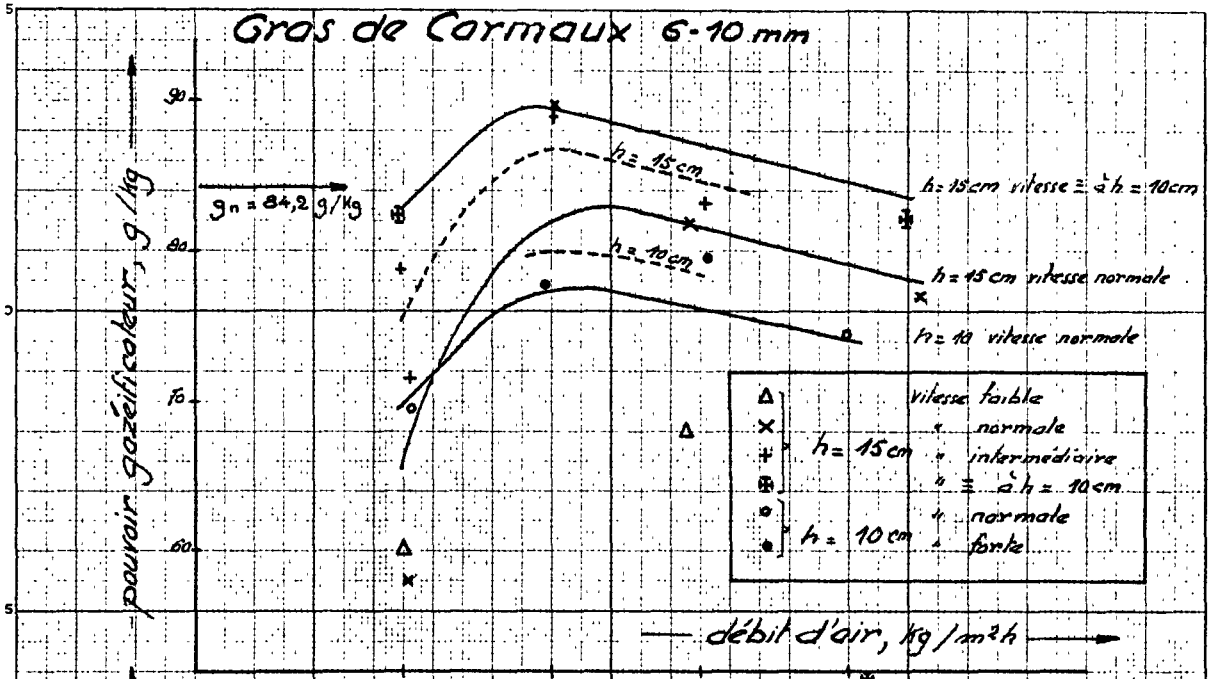


Fig. 3

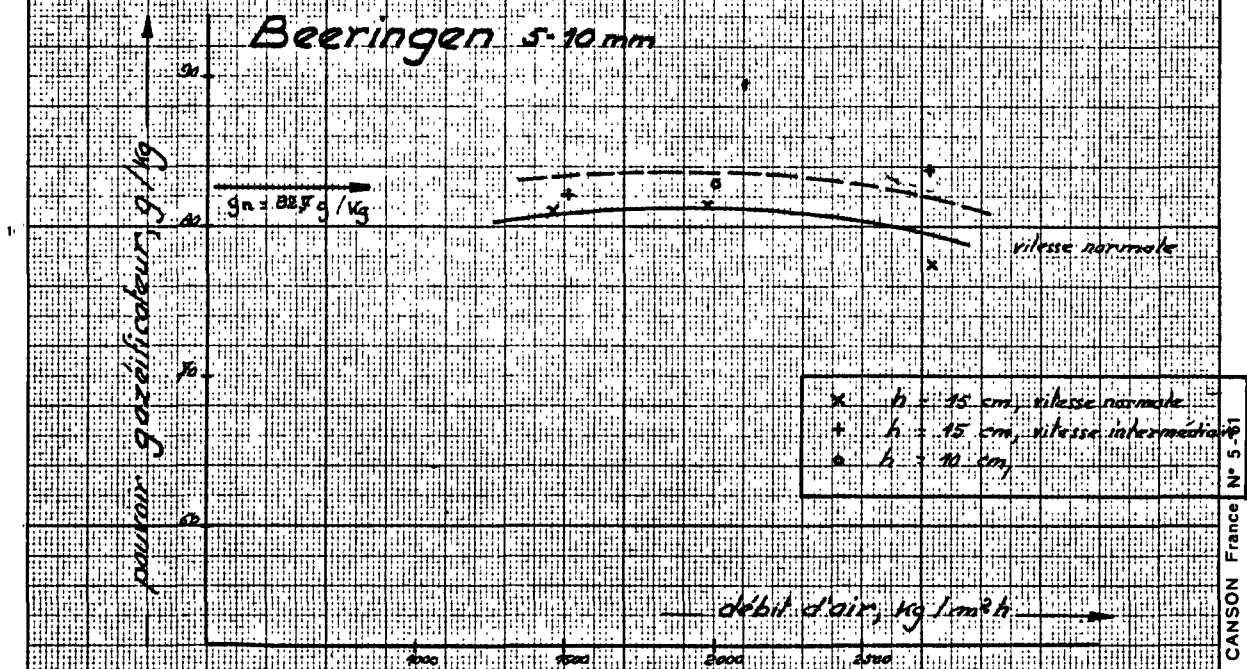
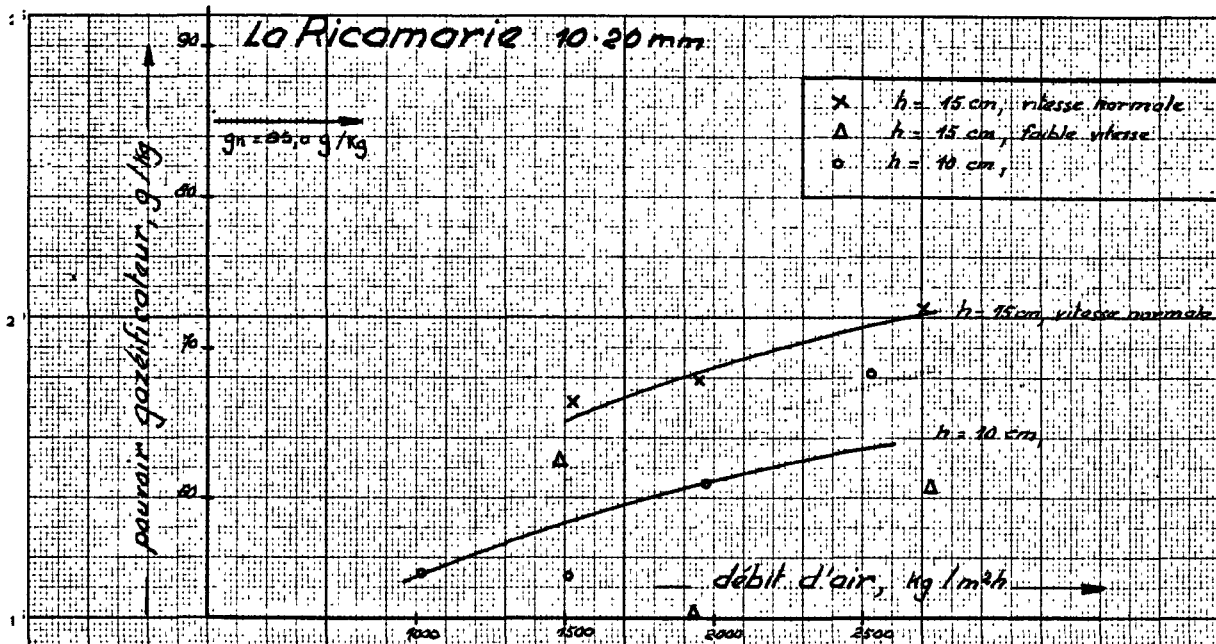


Pouvoir gazéificateur

Fig. 4

THE 5025 e 19 11-64

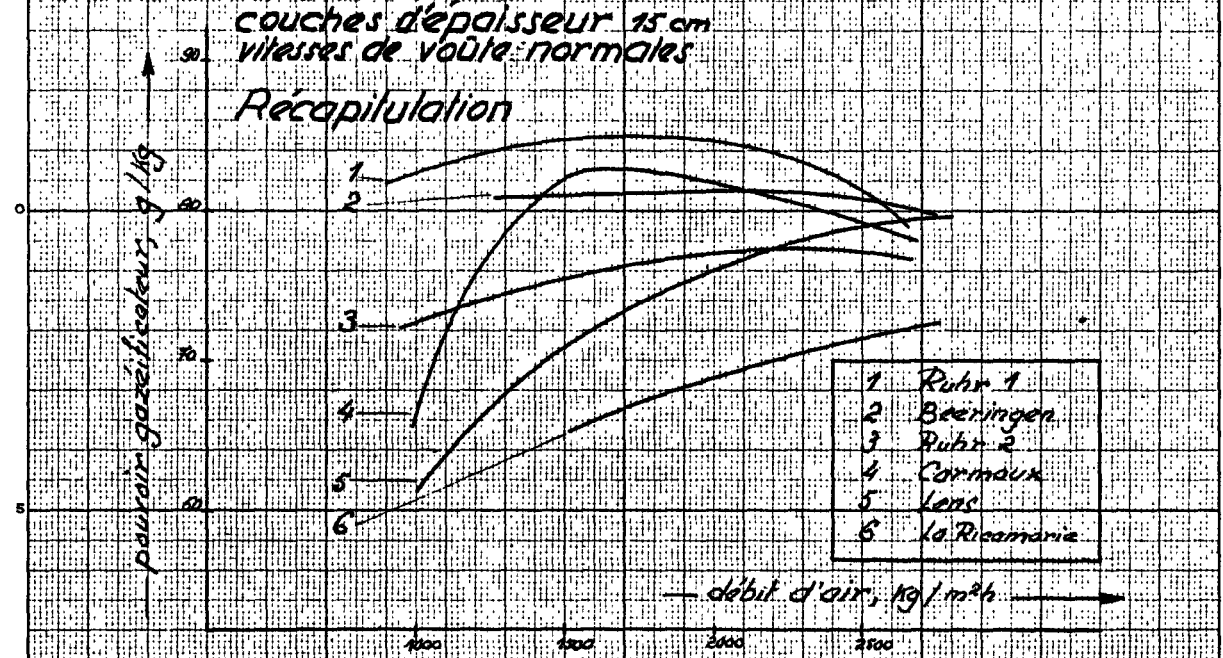
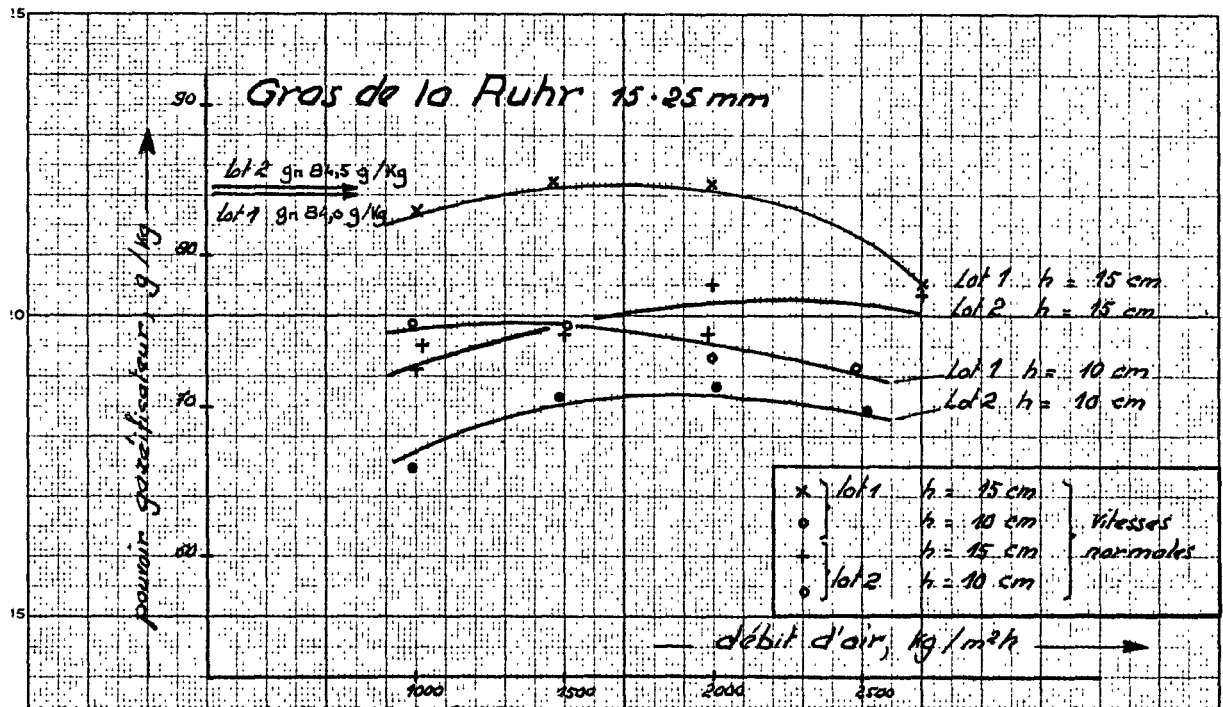
LES PAPIERS CANSON France N° 5-61



Pouvoir gazéificateur

THE 6026 14 10-11-68

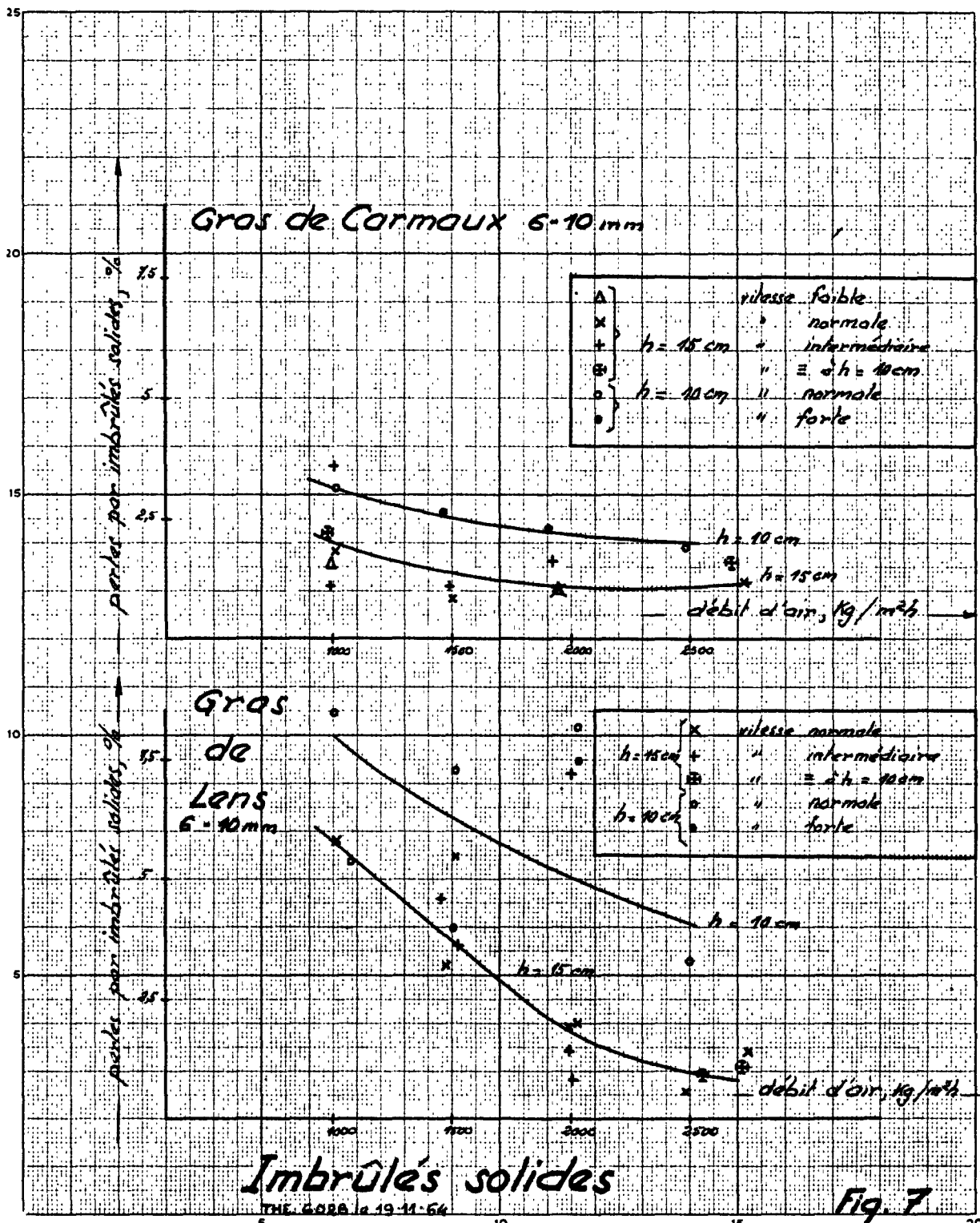
Fig. 5



Pouvoir gazéificateur

THE GORE 1944 G4

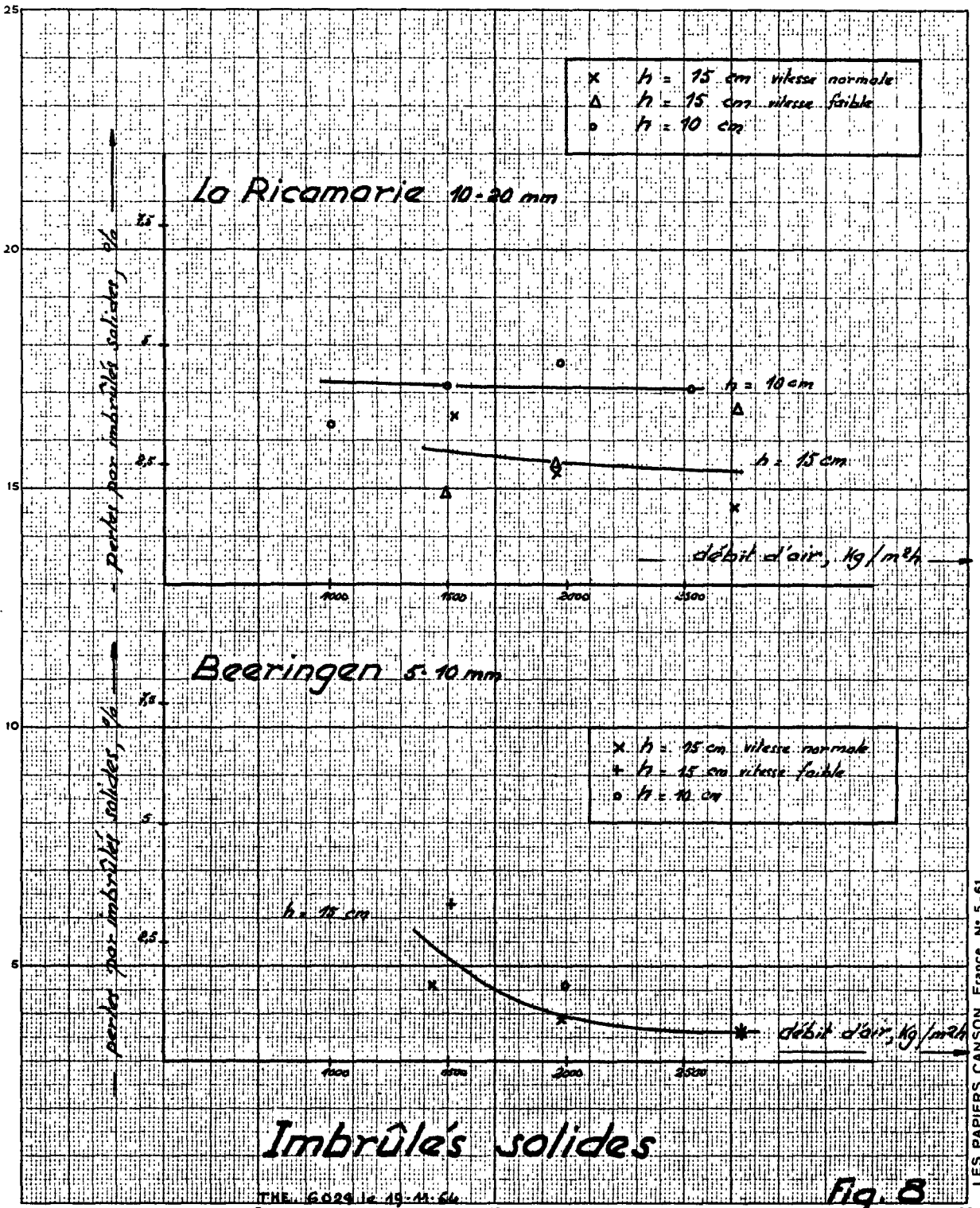
Fig. 6



A	h = 15 cm	·	vélocité faible
		x	normale
		+	intermédiaire
B	h = 10 cm	·	≅ à h = 10 cm
		o	normale
		·	forte

h = 15 cm	x	vélocité normale
	+	intermédiaire
	·	≅ à h = 10 cm
h = 10 cm	o	normale
	·	forte

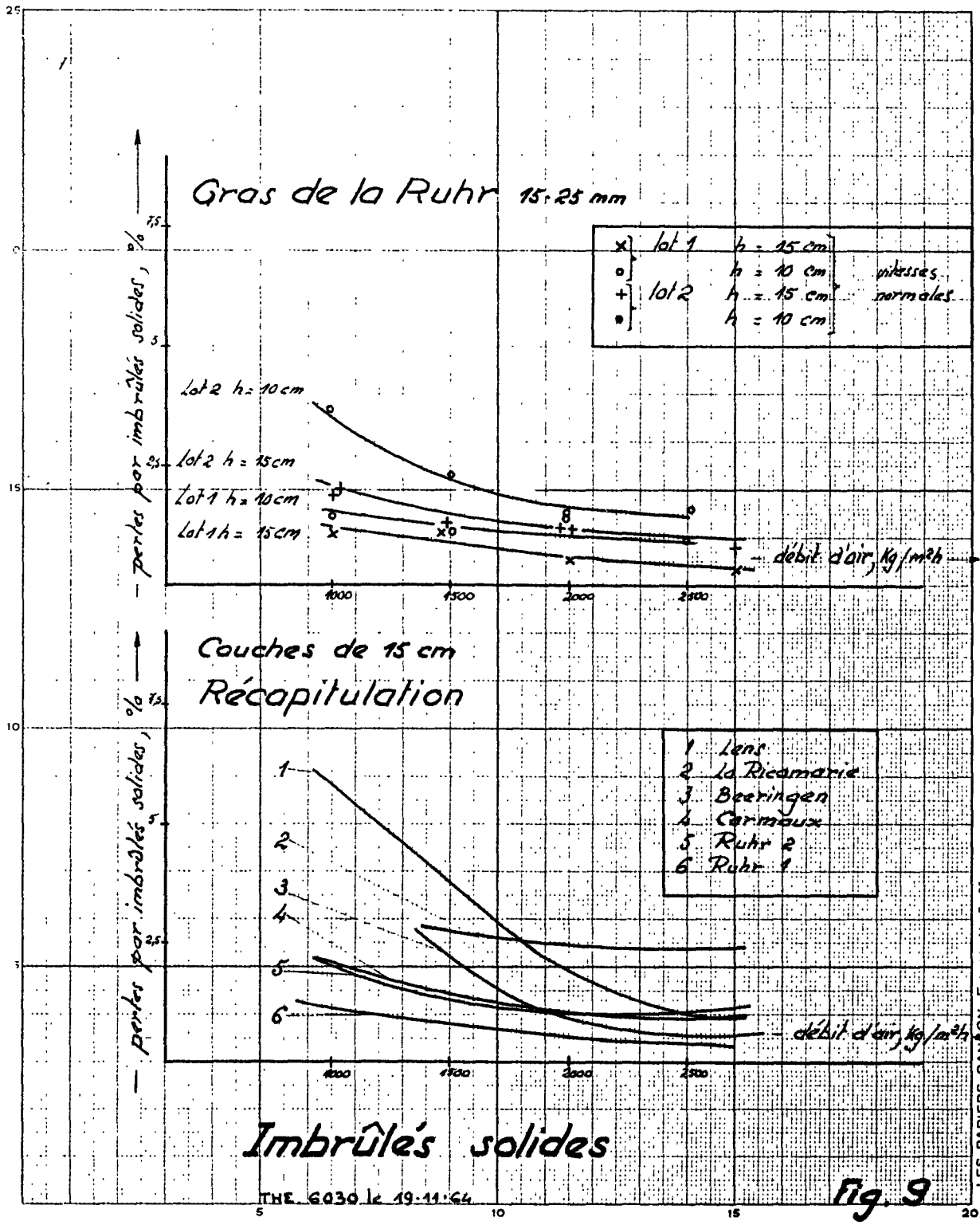
LES BADIÉY CANSON FRANCE N° 5 47



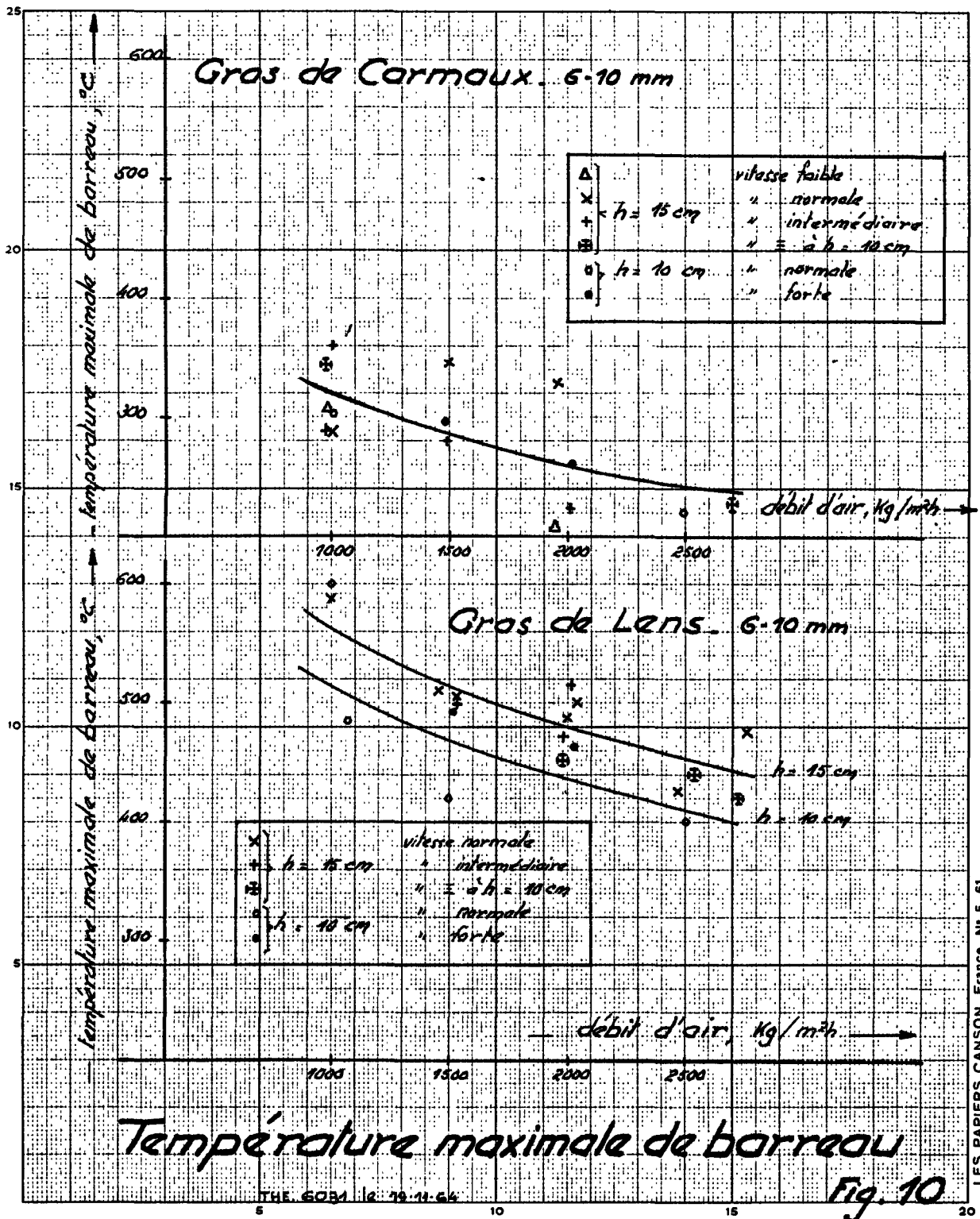
x h = 15 cm vitesse normale
 Δ h = 15 cm vitesse faible
 o h = 10 cm

x h = 15 cm vitesse normale
 + h = 15 cm vitesse faible
 o h = 10 cm

LES PAPIERS CANSON France N° 5. 61

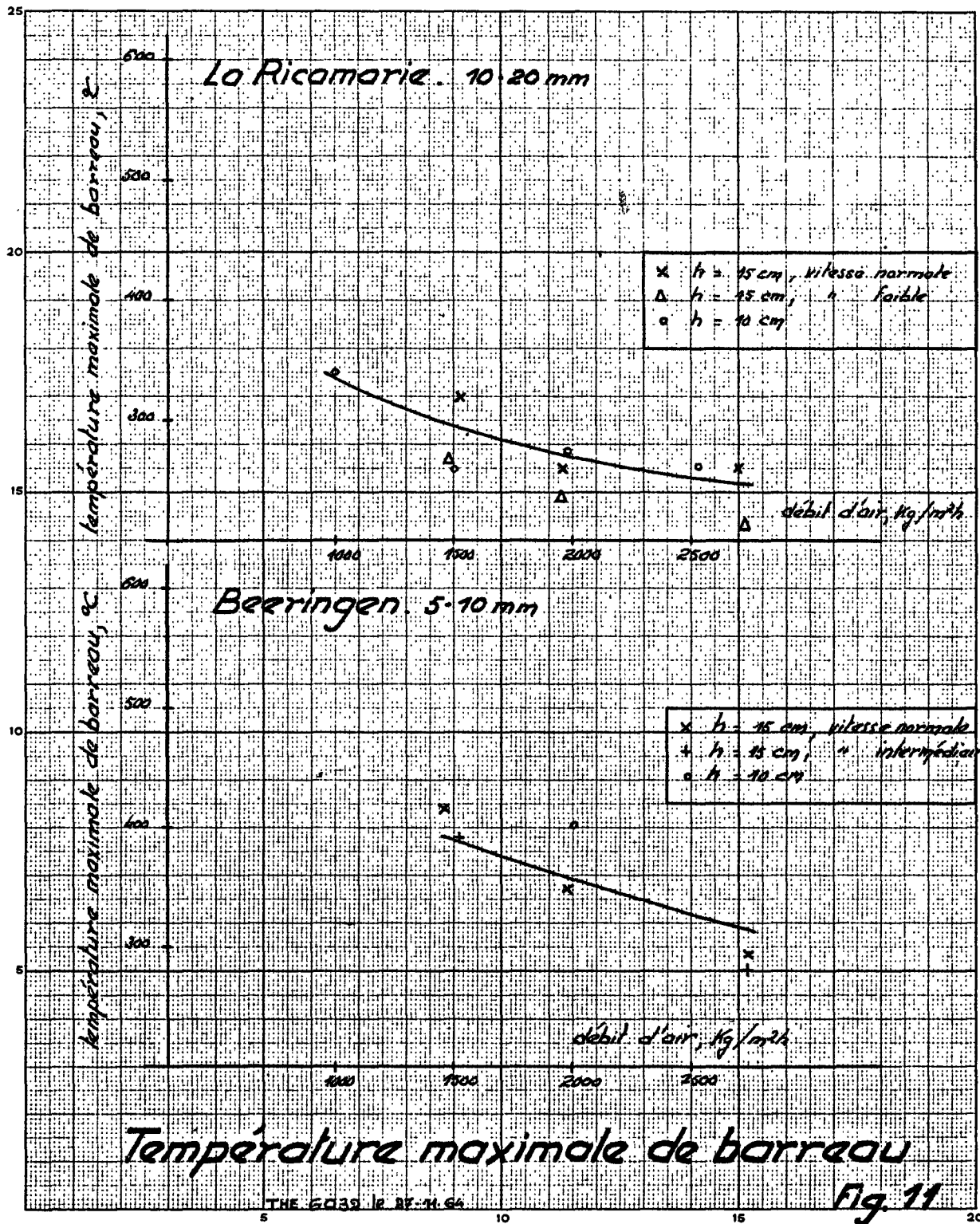


LES PAPIERS CANTON France N° 5-61



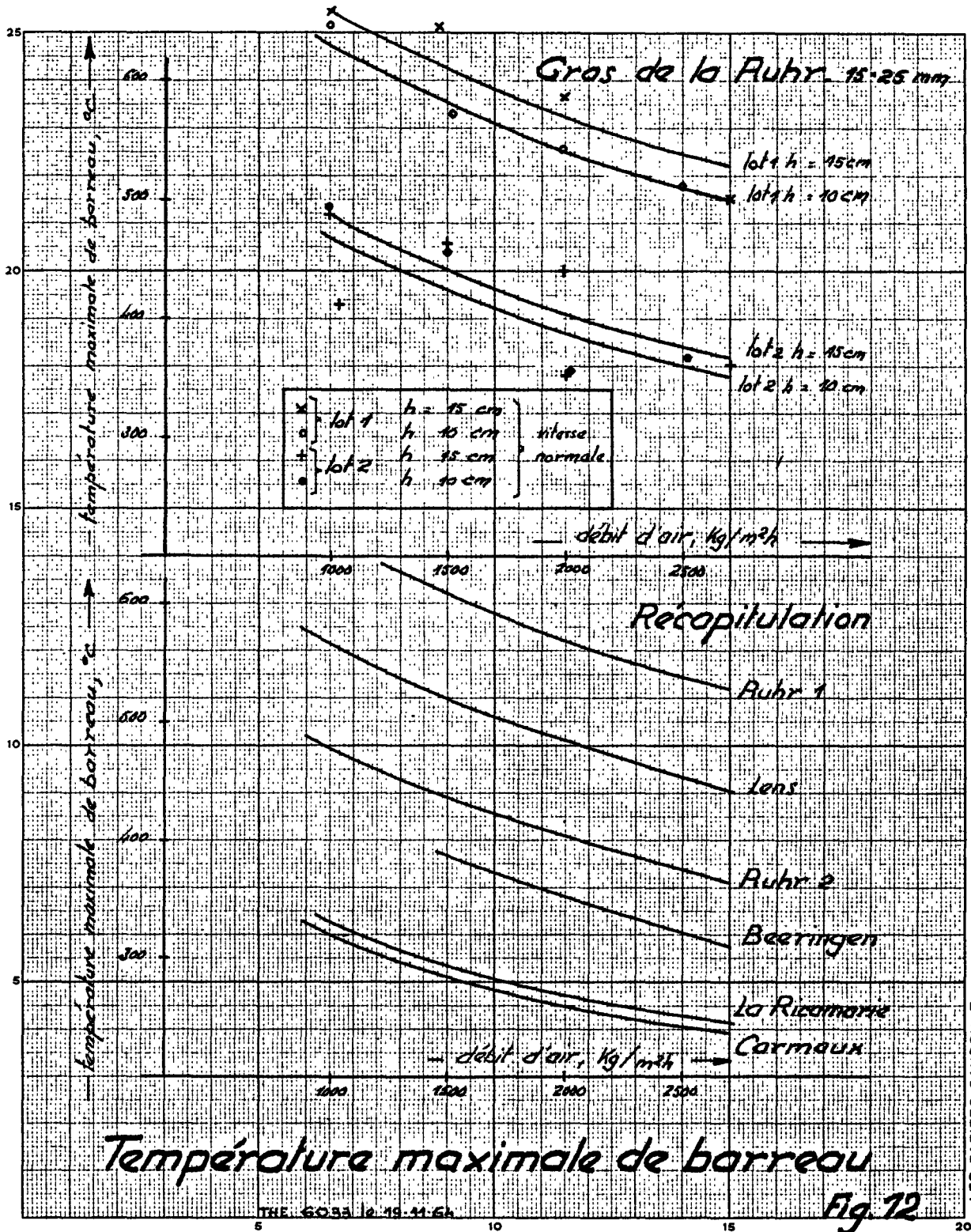
LES PAPIERS CANSON France N° 5-61

THE 6031 12 79-11-66

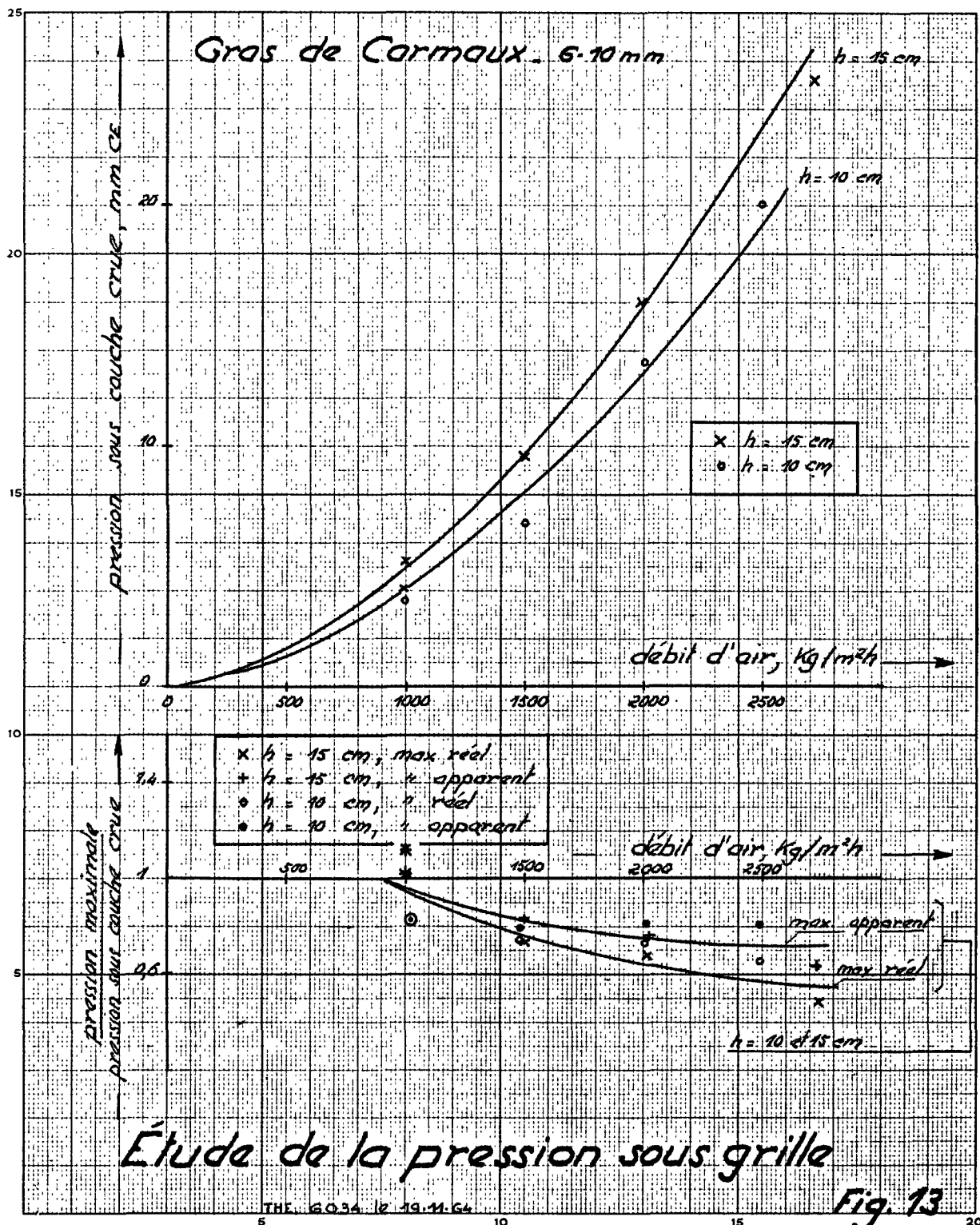


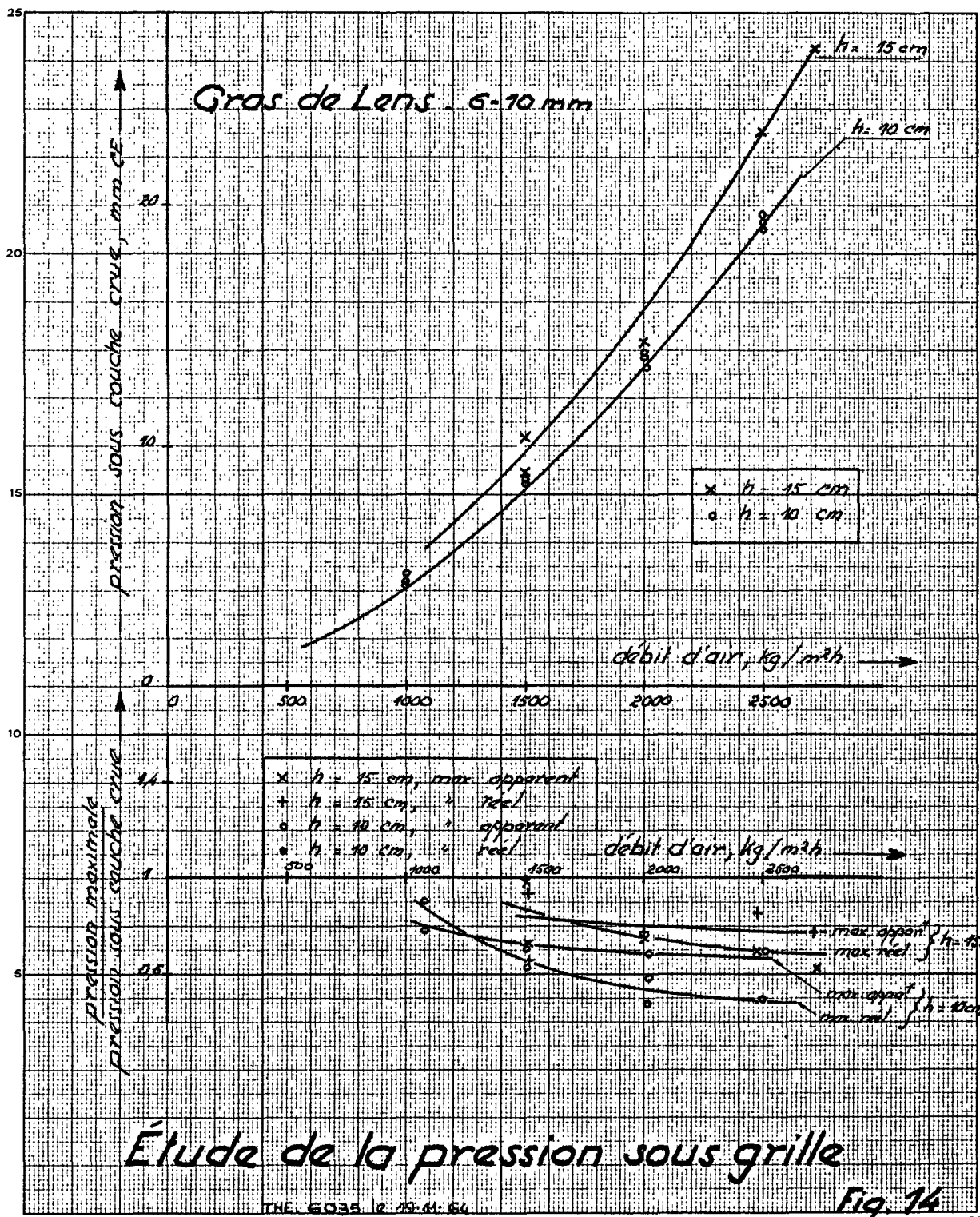
LES PAPIERS CANSON France N° 5. 61

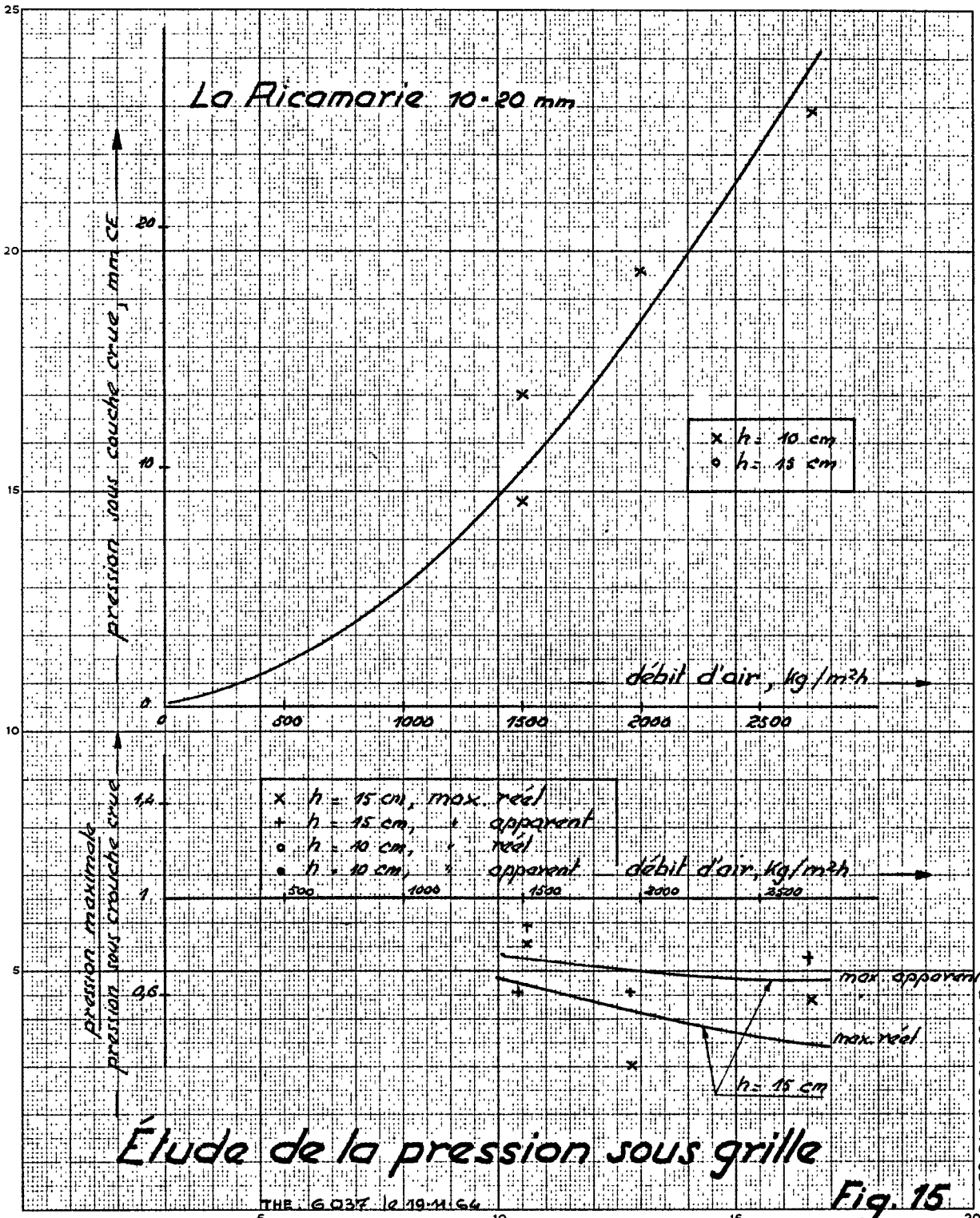
Fig. 11



LES PAPIERS CANSON France N° 5-61



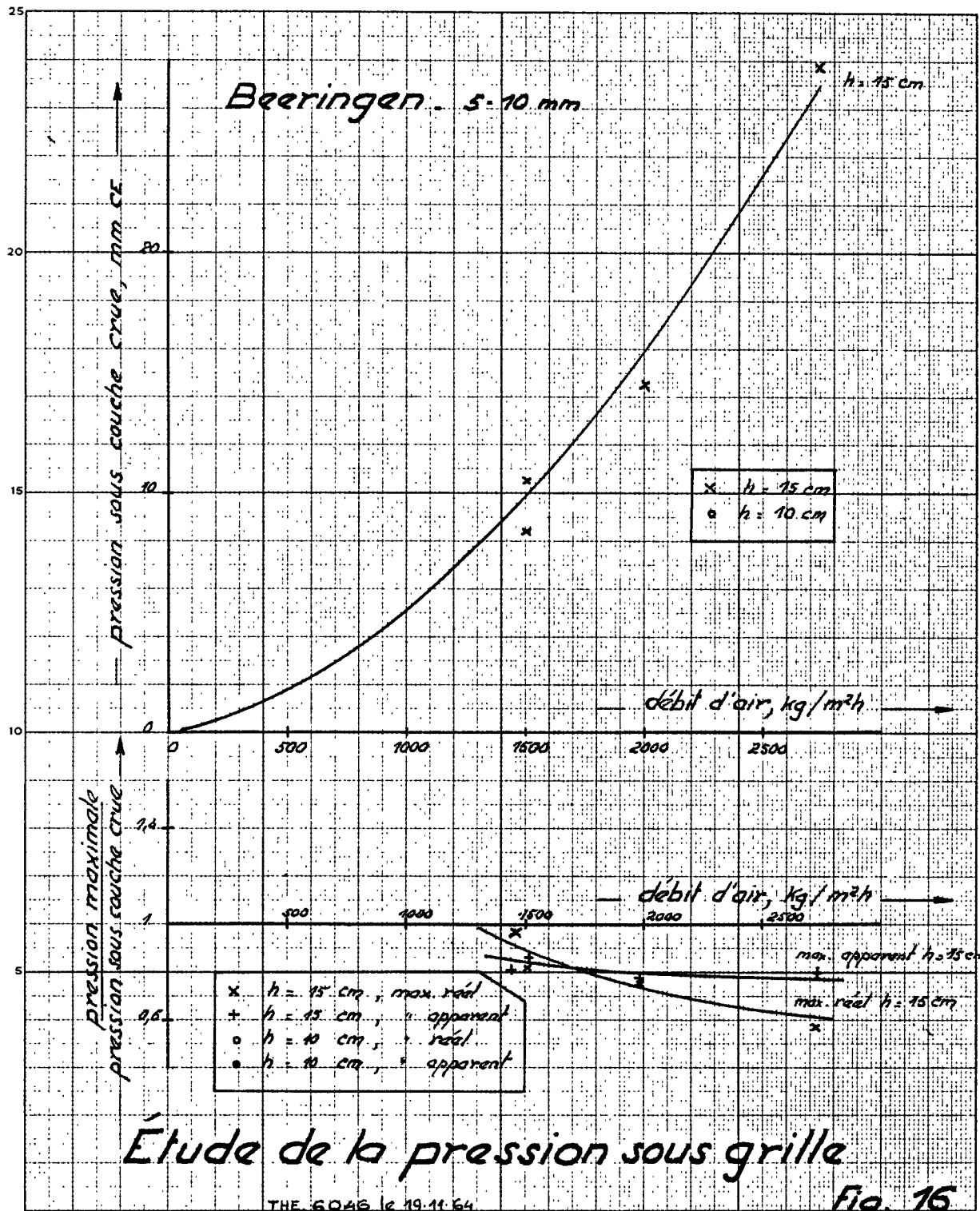


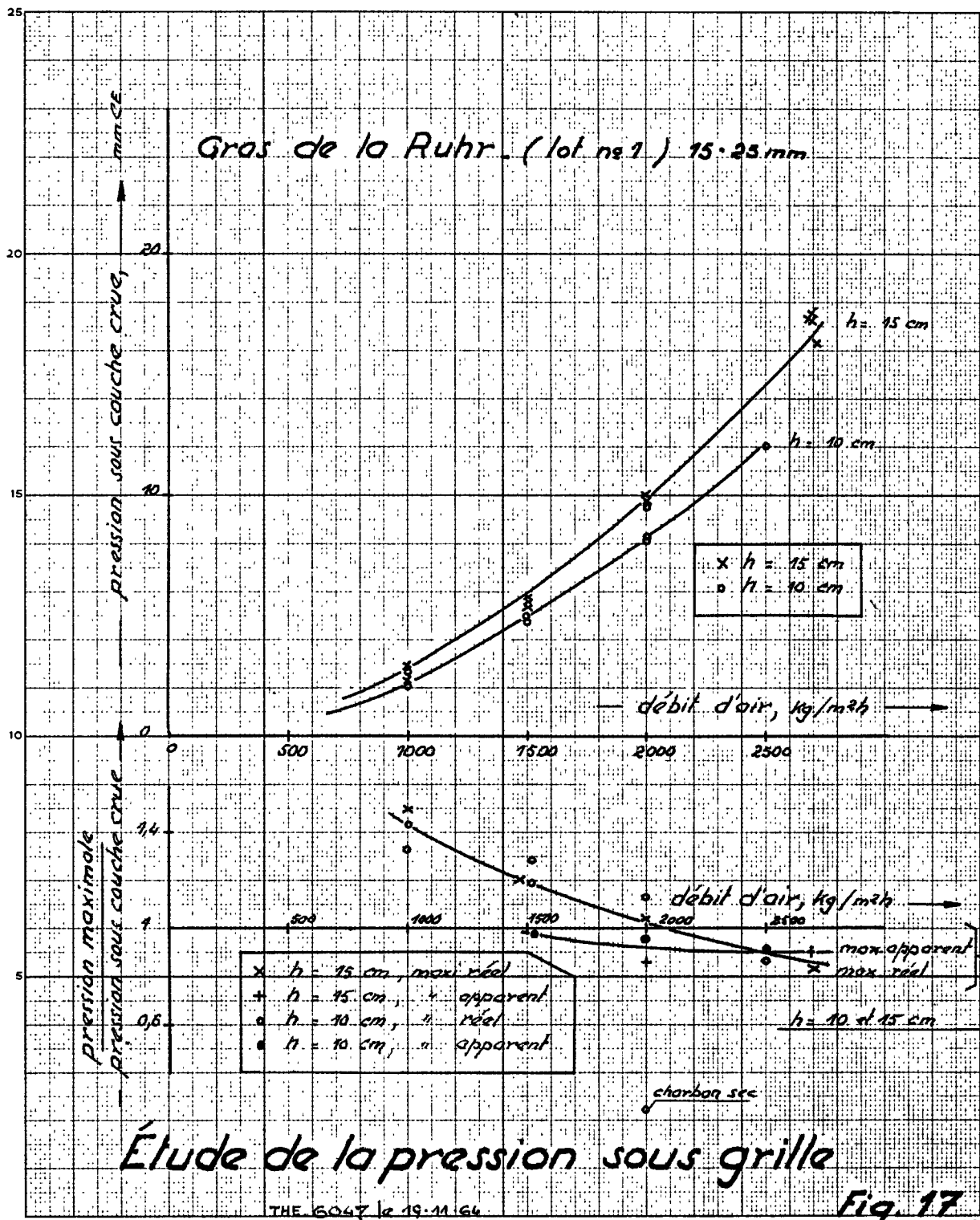


Étude de la pression sous grille

Fig. 15

THE 6037 12 19-11-64



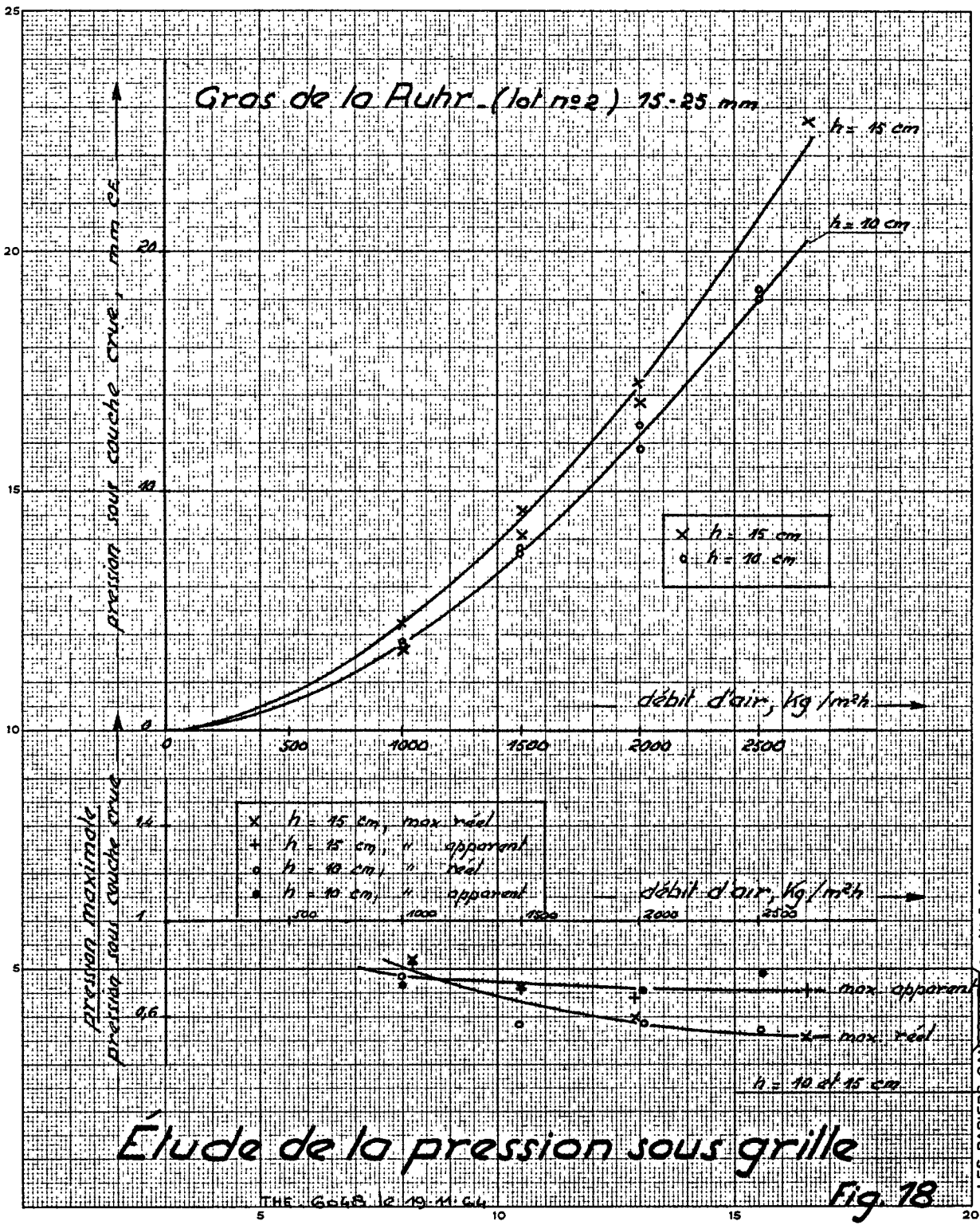


Étude de la pression sous grille

Fig. 17

LES PAPIERS CANSON France N° 5-61

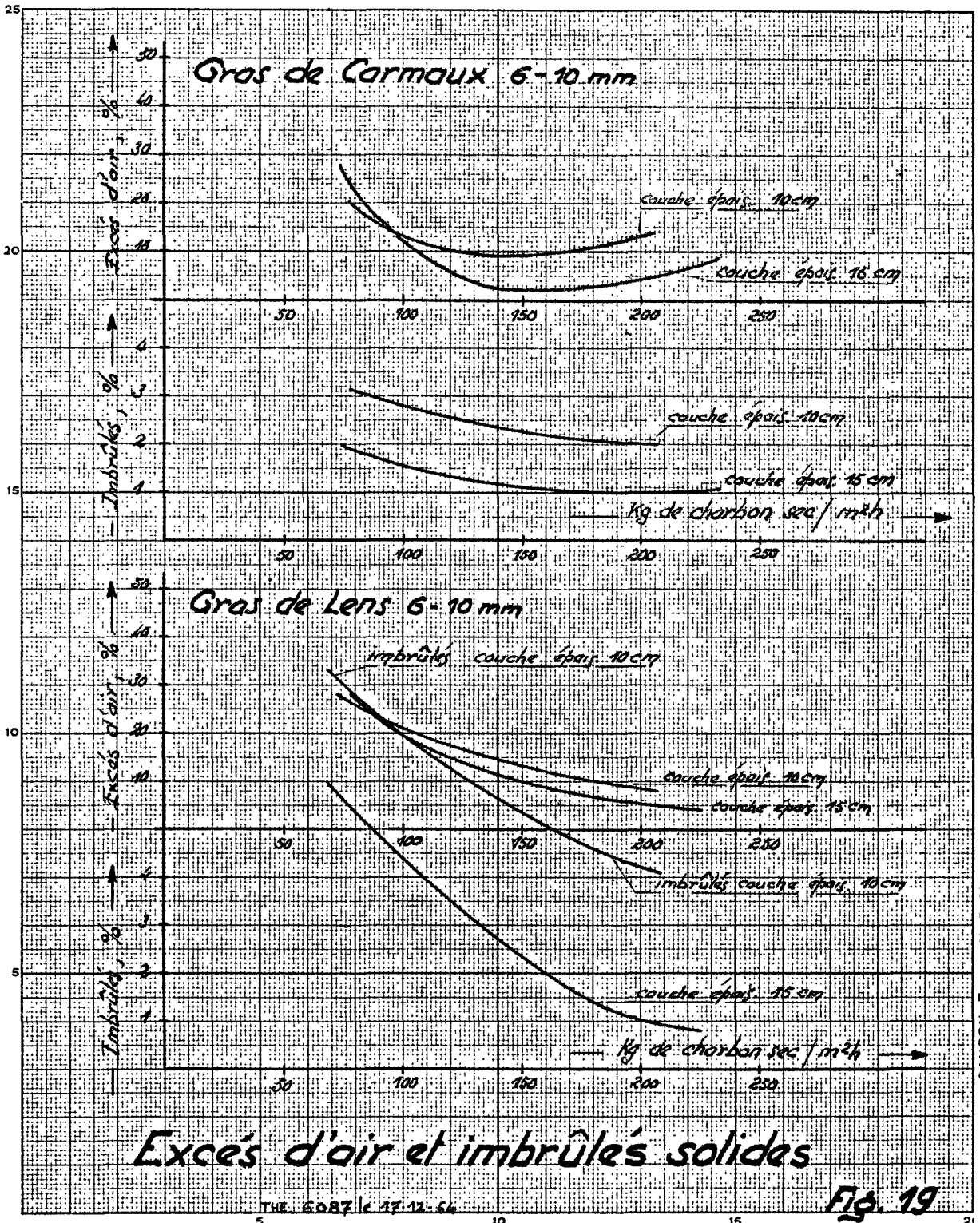
THE 6047 | 12-19-11-64



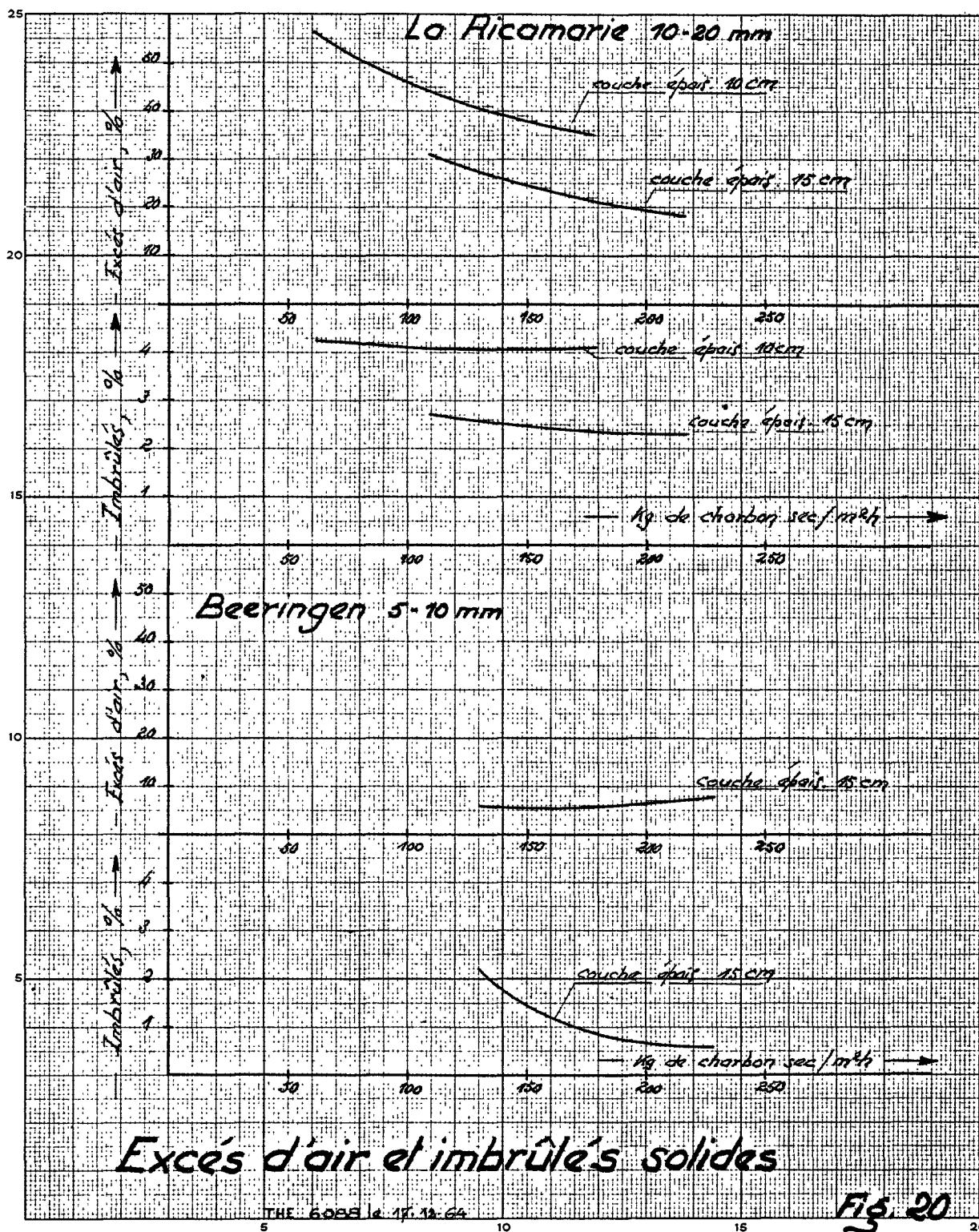
Étude de la pression sous grille

Fig. 18

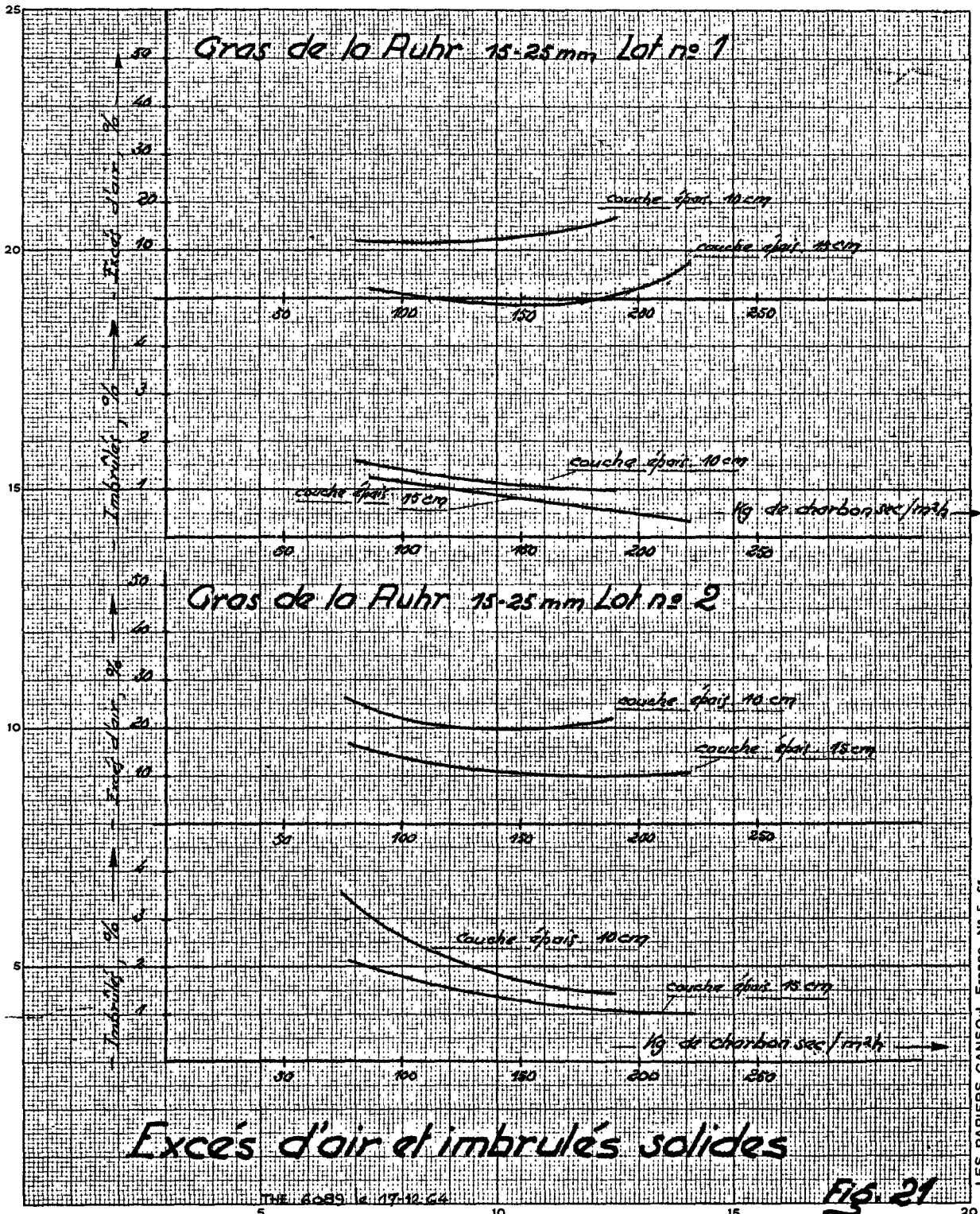
LES PAPIERS-GANSON France N° 5-61



C. L. GORZ, E. M. E. 61



LES PAPIERS CANSON France N° 5-61



Excès d'air et imbrulés solides

Fig. 21

LES PAPIERS CANSO, France N° 5-61

THE 6089 12 17-12-64

Des exemplaires supplémentaires du présent rapport
tout comme les publications mentionnées plus haut
peuvent être commandés à

l'Office central de vente des publications
des Communautés européennes

9, rue Goethe

LUXEMBOURG

SERVICES DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

11 735/2/66/1