La gazéification souterraine dans les divers pays

RAPPORT D'INICHAR

SAMENVATTING

Inleiding.

Proeven over de ondergrondse vergassing van de steenkolen werden gedurende de drie jongste jaren, op de verlaten koolmijnzetel van Bois-la-Dame, te Wandre, bij Luik, uitgevoerd door een Belgisch-Frans-Pools consortium. Die werken werden door het Nationaal Instituut voor de Steenkolennijverheid voor rekening van de Belgische Staat gevolgd.

Deze phase van de experimenten is nu geeindigd. Een algemeen overzicht over deze proeven, alsook over degenen die in Rusland, Italie, de Verenigde Staten en Marocco hebben plaats gehad, bleek dan ook in de « Annalen der Mijnen » te passen.

De bekomen uitslagen laten uitschijnen dat het misschien wel mogelijk is arm gas langs de ondergrondse vergassingsmethoden te bekomen, doch dat men er tot hiertoe niet gelukt is (behalve misschien in Rusland) het proces regelmatig genoeg te doen verlopen om industriele toepassingen mogelijk te maken.

* * *

Over de proeven die hierna beschreven zullen worden ontbreken er vaak talrijke experimentele gegevens. Anderzijds blijkt het tamelijk lastig de bruto resultaten te vergelijken van experimenten die in verschillende omstandigheden en met steenkolen van uiteenlopende aard uitgevoerd werden. Om deze rede is hier een vereenvoudigde interpretatie methode uitgewerkt geweest, waardoor rechtstreeks vergelijkbare coefficienten bekomen worden, die de verschillende experimentele resultaten op een bondige wijze moeten weergeven.

Die berekeningen steunen op de samenstelling van de bekomen gassen en op de materiebalans uitgedrukt door de algemene vergelijking :

$$\left.\begin{array}{l} a\ Nm^3 \text{ brandmiddel (lucht met of zonder zuurstof aanrijking)} \\ +\ c\ kg \text{ brandstof (zuivere kolen, droog en asvrij)} \\ +\ h'\ Nm^3\ H_2O \text{ (ingeblazen stoom of vochtigheid van het terrein)} \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l} 1\ Nm^3 \text{ gas (droog gemeten)} \\ h''\ Nm^3\ H_2O \text{ (waterdamp in het gas, of condensatie water)} \\ +\ k\ kg \text{ onverbrande koolstof.} \end{array}\right.$$

Daar de samenstellingen van brandmiddel, brandstof, gas en onverbrande brandstof (in zuiver C omgerekend) bekend zijn, is het mogelijk deze vergelijking op de zuurstof, de waterstof, de koolstof en de stikstof van het stelsel toe te passen : op die wijze ontstaan vier vergelijkingen waardoor de coefficienten a, c, k en $h = h' - h''$ bepaald worden.

Dit maakt het mogelijk de samenstelling van het gas door een drietal verschijnselen : distillatie van de steenkolen, luchtgasvorming, watergasvorming of verbranding van de waterstof uit de steenkolen, te verklaren. Men kan ook een vereenvoudigde thermische balans opmaken.

Het werkelijk proces is natuurlijk veel meer ingewikkeld, doch het is onmogelijk dit na te gaan indien men alleen over de materie balans beschikt. Buiten de gegevens van de klassieke gasgeneratoren beschikt men hiervoor enkel over hypothesen.

Het thermisch rendement van het proces hebben wij berekend als de verhouding tussen het onderste verwarmingsvermogen van het gas, en het verschil tussen het onderste verwarmingsvermogen van de gebruikte steenkolen en dat van de onverbrande koolstofdelen :

$$\eta_{th} = \frac{\text{P.C.I. gas}}{c \times \text{P.C.I. kolen} - k \times 8.100} = \frac{P_g}{c\,P_c - P_k}$$

* * *

In de door deze nota beschreven experimenten werd gebruik gemaakt van vier afzonderlijke methoden, die wij als volgt kunnen schetsen :

1. *Percolatie, of doorzijpelingsmethode : het gas zijpelt door de brandstoflaag dank zij de natuurlijke porositeit van de brandstof of de spleten veroorzaakt door de ontploffing van doelmatig geplaatste springstofladingen.*
2. *Kamermethode : de steenkolen, met klassieke methodes afgebouwd, worden ter plaatse opgestapeld in kamers door de ontkoolde ruimte ge-*

vormd, om daar, zoals in een bovengrondse gasgenerator, vergast te worden.

3. *Boorgaten methode : boorgaten met geringe doormeter worden in de laag, evenwijdig met de gelaagdheid, geboord. De lucht wordt erdoor geblazen, de wanden van de gaten leveren de brandstof en de boorgaten worden geleidelijk in sigaarvorm uitgebrand.*
4. *Stromingsmethode : in de laag wordt een groot paneel afgezonderd, waarvan een der wanden door de luchtstroom bestreken wordt. Het vuur vordert dan als een pijlerfront.*

I. — Experimenten in Rusland.

Onderzoekingen werden uitgevoerd van 1933 tot 1938 in een vijftal verschillende proefstations.

In Krutov (Moscoubekken) is, na het mislukken van andere procédé's, de boorgatenmethode beproefd geweest op steenkolen met 35 % vochtigheidsgehalte en 40 %-50 % asgehalte. Het verwarmingsvermogen van het gas bleef dan ook onder 500 cal/m³ voor luchtgas, en 750 cal voor menggas. Met dezelfde kolen zou echter de percolatie methode succesvol toegepast geweest zijn in het naburig station van Nova-Bass.

In Schakhtinsk (Noord-Caucasus) werd de kamermethode toegepast op een anthracietlaag van 0,40 m. Het was onmogelijk een stabiele werking te verkrijgen.

In Lissitchansk (Donetz) zijn interessante proeven uitgevoerd geweest met de boorgaten methode. Luchtgas aan 940 cal/m³, watergas aan 2.000 cal/m³ en distillatie gas aan 2.500 cal/m³ werden op regelmatige wijze verkregen, doch slechts op kleine schaal, in een koollaag met 38 % vluchtige bestanddelen.

Te Gorlovka (Donetz) heeft men de stromingsmethode op half industriele schaal toegepast met 1/2 magere steenkolen en aan zuurstof aangerijkte lucht. Gas van 900 tot 1.500 cal/m³ werd voortgebracht naar gelang het O_2 gehalte van de ingeblazen lucht van 21 % tot 39 % bedroeg.

Rijker distillatie gas aan 1.900 cal/m³ werd ook afwisselend voortgebracht met armer gas aan 700 cal/m³. Deze inrichting heeft zelfs gedurende twee maanden in de gasbehoeften van een naburige cokesfabriek voorzien.

In Leninsk, ten slotte (Siberie), zijn met steenkolen à 45 % VB kleine hoeveelheden distillatie gas van 1.500 tot 4.000 cal/m³ voortgebracht geweest, en in een ander experiment, luchtgas aan 1.000 cal/m³.

AVANT-PROPOS

Depuis environ deux décades, le problème de la gazéification souterraine du charbon retient l'attention des techniciens et a donné lieu à divers essais. L'idée n'est pas neuve. Elle a été émise il y a plus d'un demi-siècle par le chimiste russe MENDELIEF et c'est dans son pays qu'ont eu lieu les premières réalisations, vers 1934.

La Belgique s'y est intéressée après la dernière guerre. Au mois de décembre 1944, un syndicat, dénommé Syndigaz, s'est constitué sous forme d'association en participation dans le but de rechercher les méthodes de gazéification de la houille en veine, appropriées aux gisements belges. Ce syndicat comportait vingt-huit entreprises intéressées à l'extraction ou à l'utilisation de la houille et de ses sous-produits.

Par décision du Conseil des Ministres en date du 4 septembre 1945, des crédits furent prévus par le Gouvernement belge en vue d'octroyer une subvention à Syndigaz pour l'aider dans ses recherches.

En 1947, Syndigaz céda son actif et son passif à la Société Coopérative Socogaz, chargée de poursuivre les mêmes travaux. Socogaz, ayant la personnalité juridique, peut négocier plus aisément, notamment avec divers organismes étrangers dont l'intérêt a été éveillé par les recherches belges.

Le 20 décembre 1947, un contrat tripartite fut passé entre l'Etat, Syndigaz et Socogaz, fixant la position des parties en ce qui concernait notamment les subventions passées et futures.

Durant toutes ces négociations, un essai de gazéification souterraine était préparé au siège abandonné de Bois-la-Dame, situé à Wandre près de Liège, dans la concession de la Société Anonyme des Charbonnages de Bonne-Espérance, Batterie et Violette. Cet essai eut lieu du 5 février au 12 mars 1948.

Le 27 mai 1948, un accord fut conclu entre Socogaz et les Charbonnages de France en vue de poursuivre en commun des recherches de gazéification souterraine.

Le 14 décembre 1948, un accord analogue fut conclu entre Socogaz et les Charbonnages de Pologne.

Chacun des trois participants s'engageait à apporter à la recherche la somme de 50 millions de francs belges, l'apport de Socogaz étant représenté en partie par les travaux déjà exécutés. La haute direction des travaux était confiée à un Comité international tripartite, leur exécution incombant à Socogaz.

Le 5 juin 1948, le Gouvernement belge demanda à l'Institut National de l'Industrie Charbonnière (Inichar) de suivre les recherches. En vertu d'une convention avec Socogaz, Inichar délégua deux membres au Comité international tripartite et ses ingénieurs se tinrent au courant des travaux effectués au siège Bois-la-Dame. L'un d'eux y fut détaché full-time pendant huit mois.

Un deuxième essai eut lieu à ce siège à partir du 6 novembre 1949. Il comporta trois périodes actives de production : du 6 au 12 novembre 1949.
du 11 au 18 mai 1950,
du 1er au 6 septembre.

Les périodes intermédiaires furent consacrées à des travaux de réfection, préparation, etc...

Ces essais souterrains de Bois-la-Dame pouvant être considérés comme terminés, il est opportun d'en donner un compte rendu détaillé que les lecteurs des Annales trouveront ci-après. Il paraît indiqué, à cette occasion, de faire le point de la question et de relater en même temps tous les autres essais qui ont eu lieu ailleurs dans le monde, en Russie, en Italie, aux Etats-Unis et au Maroc.

Les résultats connus, obtenus en Belgique et à l'étranger, ne permettent pas encore d'établir des conclusions fermes au sujet de la méthode d'exploitation par gazéification « in situ ».

Au cours des essais il a été possible, en utilisant l'air froid comme comburant, de produire, pendant plusieurs semaines consécutives, un gaz pauvre dont le pouvoir calorifique atteint quelques centaines et parfois 800 à 1.000 cal/m³.

Par l'emploi d'air suroxygéné à 30 %, ce pouvoir calorifique a atteint environ 1.200 calories; par l'emploi d'oxygène et de vapeur d'eau, il a pu être porté à 2.000 calories. Ces comburants spéciaux n'ont été utilisés que durant des périodes très courtes.

Il existe apparemment une tendance assez générale à la dégradation de la qualité du gaz produit après un certain temps de fonctionnement. Le contrôle des divers phénomènes souterrains intervenant dans l'opération n'est que très partiellement réalisé.

Il se produit souvent une combustion partielle des gaz au moyen du comburant by-passé au remblai. Dans beaucoup d'essais, le pouvoir calorifique produit par distillation a été plus important que celui produit par gazéification.

Tout ce travail de documentation et d'interprétation a été effectué par les ingénieurs d'Inichar, parmi lesquels on peut distinguer M. l'Ingénieur en chef, P. STASSEN, et, tout spécialement, M. l'Ingénieur de CROMBRUGGHE. Ils ont pu disposer très librement des archives importantes réunies par Socogaz.

INTRODUCTION

L'intérêt suscité par la gazéification souterraine explique qu'une littérature abondante ait été consacrée à ce problème.

La question est complexe, aussi bien du point de vue étude théorique que du point de vue réalisation pratique, et fait appel à des disciplines très diverses : art des mines, chimie, thermodynamique, propagation de la chaleur, etc... Elle pose même de nombreux problèmes d'un genre nouveau pour lesquels les données font défaut.

C'est pourquoi, d'une part, les études théoriques consacrées à la question ne peuvent en embrasser que des aspects limités et fournissent rarement des résultats d'application pratique, et, d'autre part, les essais expérimentaux réalisés se heurtent souvent à des difficultés d'interprétation insurmontables et ne se prêtent guère à une généralisation.

Ecartant de ce rapport les aspect théoriques du problème et les expériences de laboratoire, nous nous efforcerons de décrire objectivement les essais réalisés sur des couches en place et d'en tirer le maximum d'enseignements.

Malheureusement, de nombreuses données manquent en général. Les expérimentateurs se sont bornés souvent à publier les résultats les plus spectaculaires sans indiquer dans quelles conditions ils avaient été obtenus.

De plus, une grosse difficulté se présente lorsqu'il s'agit de comparer des essais effectués sur des charbons différents. La teneur en matières volatiles, par exemple, a une influence sensible sur la composition du gaz.

Il nous a cependant paru impossible de borner cet exposé à une froide relation des faits sans en donner un commentaire qui présente évidemment certains risques, en raison notamment des hypothèses qu'il comporte ou implique. A cet effet, nous avons établi un mode simplifié d'interprétation, permettant de calculer, à partir des données dont on dispose pour la plupart des essais, des coefficients définissant schématiquement le fonctionnement d'un chantier de gazéification et permettant certaines comparaisons.

Le schéma d'interprétation classique du phénomène considère, le long du trajet du courant gazeux, d'abord une *zone d'oxydation*, où la réaction du charbon avec l'oxygène libre du comburant donne CO_2 et dégage une quantité importante de chaleur, transmise aux zones suivantes principalement par convection par le courant gazeux lui-même et, accessoirement, par conduction à travers la masse de combustible et les terrains encaissants.

Dans la *zone de réduction*, qui commence dès que l'oxygène du comburant est épuisé, le CO_2 et la vapeur d'eau entraînée par le courant gazeux sont réduits plus ou moins complètement en CO et en H_2 par le charbon incandescent, selon les réactions endothermiques bien connues :

$$CO_2 + C = 2\ CO$$
$$H_2O + C = H_2 + CO.$$

Ces réactions et les pertes de chaleur dans le massif contribuent à refroidir le courant gazeux. La teneur en CO sera d'autant plus forte que l'apport de calories de la zone d'oxydation aura été plus abondant et les pertes au terrain moins importantes.

Si le contact CO_2-charbon est très imparfait, la réaction mettra beaucoup de temps à s'accomplir. Les pertes de chaleur seront élevées et l'équilibre ne sera atteint qu'à une température relativement basse correspondant à une faible teneur en CO.

Si, par contre, les pertes sont faibles et le contact CO_2-charbon favorable à une réaction rapide, l'équilibre s'établit à haute température avec une proportion élevée de CO.

Le refroidissement graduel du gaz peut théoriquement provoquer une certaine rétrogradation des réactions suivant les formules :

$$2\,CO = CO_2 + C$$
$$CO + H_2O = H_2 + CO_2$$

Ces réactions ne s'établissent cependant qu'avec un certain retard; il n'a jamais été possible de les mettre en évidence au cours des expériences de gazéification souterraine. On n'a jamais découvert les dépôts de suies, dont la première de ces réactions devrait provoquer la formation, et l'on a pu attribuer à d'autres raison la détérioration constatée maintes fois dans les dernières parties du trajet gazeux.

Pour élaborer un gaz intéressant, il faut disposer d'une zone de réduction à haute température, suffisamment longue et calorifugée pour que la composition du gaz ait atteint un équilibre avant que la température ne soit descendue en dessous de 800° environ.

Il faut ensuite un refroidissement rapide à 300° pour limiter les réactions de rétrogradation. Ces conditions sont évidemment difficiles à réaliser en pratique.

Lorsque la température est tombée assez bas et qu'il n'y a plus de réaction, les gaz n'agissent plus sur le charbon que par leur chaleur sensible : une *zone de distillation* se forme en aval et autour des précédentes. Le charbon chauffé par convection sur le trajet du courant gazeux ou par conduction dans l'auréole entourant les zones à haute température, abandonne ses matières volatiles qui se mêlent au gaz et l'enrichissent.

Il peut se faire aussi que, dans la dernière partie du trajet, de l'air vienne se mêler au gaz. Cet air peut provenir de l'extérieur, si le chantier est en dépression, ou du chantier lui-même, par by-passage parallèle au front. Non seulement le gaz est dilué par cet air, mais souvent brûlé en partie.

La composition finale du gaz est la résultante de tous ces phénomènes et elle permet d'en reconstituer certains éléments.

C'est le but que l'on poursuit en établissant un bilan des matières. Les éléments du comburant et du charbon doivent se retrouver dans le gaz produit et dans les résidus de la combustion.

Remarquons cependant que, si la composition du gaz dépend de toutes les réactions intervenues, elle ne permet pas d'en reconstituer la cinétique ni l'ordre chronologique. Il est, par exemple, impossible de déterminer si le CO du gaz est formé par combustion incomplète de carbone :

$$2\,C + O_2 = 2\,CO$$

ou par réduction de CO_2 :

$$CO_2 + C = 2\,CO.$$

L'interprétation de la composition du gaz reviendra par conséquent à expliquer celle-ci par quelques réactions globales, équivalentes par leurs résultats à celles qui se sont produites en réalité.

La quantité de chaleur dégagée dépend d'ailleurs uniquement de la composition initiale et finale du comburant, du combustible, du gaz et du résidu et des quantités mises en jeu, et non des états intermédiaires. Ceux-ci n'ont d'influence que sur la localisation du dégagement de chaleur aux différents points du circuit.

* * *

Les calculs dont il est question ci-dessus sont établis à partir de l'équation générale :

a Nm³ d'air (éventuellement suroxygéné) + c kg charbon (net) + h' Nm³ de vapeur d'eau entrant	=	1 Nm³ de gaz (sec) + h'' Nm³ de vapeur d'eau sortant + k kg d'imbrûlé solide.

Pour définir complètement ce bilan, il faudrait connaître les différentes quantités a, c, h', h'' et k. Malheureusement, certaines d'entre elles ne sont indiquées que très rarement dans la documentation (par exemple h'', la quantité d'eau sortant du chantier), d'autres échappent à toute mesure (le charbon brûlé c, l'imbrûlé k) ou bien les mesures sont faussées par suite de l'inétanchéité du circuit (a), de l'intervention de l'humidité du terrain (h') et des condensations non mesurables (h'').

En général, les seules données sûres dont on dispose sont les compositions du gaz, du charbon et du comburant. Nous supposons en outre les imbrûlés constitués par du carbone pur.

Si nous écrivons la même équation que ci-dessus en l'appliquant à chacun des éléments C, H, O, N, en tenant compte de leur concentration respective dans le comburant, le combustible, l'eau, le gaz et les imbrûlés, nous obtenons quatre équations permettant de déterminer les coefficients a, c, k, et la différence h' — h'' = h.

Ceci revient à faire les opérations suivantes (nous raisonnons toujours sur 1 m³ normal de gaz). L'oxygène, introduit par le comburant, est évalué au moyen de l'azote contenu dans le gaz, le rapport O_2/N_2 du comburant étant connu. Une correction est faite pour tenir compte de l'azote contenu dans le charbon (supposé dégagé à l'état libre). On détermine ainsi le coefficient a : rapport volumétrique comburant/gaz.

Un excès d'oxygène dans le gaz par rapport à l'oxygène du comburant est attribué à la formation de gaz à l'eau. Un défaut d'oxygène est attribué à la combustion de l'hydrogène des matières volatiles du charbon. On tient compte de l'oxygène contenu dans le charbon.

L'hydrogène du gaz, corrigé des influences de la décomposition et de la formation d'eau, est supposé provenir du charbon (H_2 ou CH_4).

Ceci permet d'évaluer, à partir de la teneur en H du charbon net, la quantité c de charbon intervenant dans le phénomène. D'autre part, les teneurs du gaz en CO_2, CO et hydrocarbures permettent

de calculer la quantité de carbone entraîné sous forme gazeuse.

La différence entre le carbone du charbon et celui du gaz est attribuée aux imbrûlés k.

Ces résultats permettent alors d'établir un bilan thermique simplifié: la différence entre le pouvoir calorifique du charbon brûlé et celui des imbrûlés doit être égale à la somme du pouvoir calorifique du gaz et de la chaleur sensible dégagée (établie par différence). De cette chaleur sensible, une partie se perd dans les terrains, l'eau de condensation, etc..., l'autre est entraînée par les gaz sortant chauds et humides du chantier. Cette dernière partie est parfois mesurée; dans ce cas, on peut se faire une idée des pertes de chaleur au terrain par Nm^3 de gaz.

Remarques.

1) Ces calculs n'ont de sens que si les données correspondent à un état de régime suffisamment prolongé.

2) La détermination indirecte, celle par exemple du charbon brûlé et du résidu imbrûlé, donne lieu à une accumulation d'erreurs de mesures. Les coefficients c et k sont très sensibles à des écarts même peu importants dans les analyses du gaz et du comburant, qui servent de point de départ. Leur différence l'est cependant moins, de sorte que la valeur résultante des calories consommées est plus exacte que les quantités respectives de charbon et d'imbrûlé calculées.

3) Nous avons supposé les imbrûlés composés de carbone uniquement; cette hypothèse est inexacte, car le charbon se dégaze progressivement. Le mode de calcul adopté consiste à remplacer toute la gamme de produits intermédiaires entre le charbon inaltéré et complètement dégazé par une somme (charbon inaltéré + carbone pur). Ceci n'est, en toute rigueur, légitime que si les éléments H, O et N se trouvent dans les matières volatiles dégagées dans les mêmes proportions respectives que dans le charbon intact. Les teneurs du charbon en oxygène et azote étant d'habitude faibles, l'erreur introduite restera réduite.

Les imbrûlés ainsi définis ne constituent pas nécessairement une perte définitive : ils peuvent représenter la zone de coke entourant les zones à haute température et destinée à être brûlée à son tour, lors de l'avancement du feu.

4) La méthode définie ne s'applique que si la proportion d'azote du gaz et du comburant est suffisamment élevée pour permettre de déterminer avec précision la quantité d'oxygène introduite par le comburant.

Dans le cas extrême d'un soufflage à l'oxygène pur ou oxygène-vapeur, le fil d'Ariane de l'azote manque pour établir la liaison entre comburant et gaz et il est impossible de départager, même d'une manière théorique, l'hydrogène du gaz à l'eau et celui des matières volatiles.

5) A l'aide des coefficients calculés plus hauts, il est possible de diviser le gaz en une fraction produite par la distillation du charbon (CH_4, H_2, N_2, CO, CO_2), une fraction produite par la réaction du gaz à l'air (CO_2, CO, N_2, O_2) et une fraction produite par la réaction du gaz à l'eau (H_2, CO, CO_2) ou disparue par combustion de l'hydrogène (disparition de H_2 et O_2, addition de N_2).

Cette répartition, utilisant les mêmes hypothèses simplificatrices que le calcul du bilan, n'offre guère de difficultés, sauf en ce qui concerne le CO_2 et le CO qui peuvent se trouver en proportions variables dans chacun des composants. Nous avons admis, pour chacune des fractions considérées, un rapport CO/CO_2 constant et égal à celui du gaz total.

* * *

Cet ensemble de calculs et d'hypothèses, tout imparfait qu'il soit, nous a permis de présenter sous une forme comparable les résultats des essais très divers décrits dans ce rapport.

Il est en effet difficile de tirer des conclusions des compositions brutes du gaz produit, surtout si l'on a affaire à des charbons de teneur différente en matières volatiles.

Nous avons effectué les calculs en prenant les pouvoirs calorifiques inférieurs du gaz et du charbon, calculés d'après les formules :

$$P_g = 30{,}20\ CO + 25{,}70\ H_2 + 85{,}50\ (CH_4 + C_nH_m)\ (\%\ \text{volumétriques})$$
$$P_c = 81\ C + 280\ H - 35\ O\ (\%\ \text{pondéraux}).$$

Nous n'avons pas tenu compte, dans le bilan matière, du soufre du charbon, de l'ammoniaque, des composés soufrés et des goudrons, rarement mesurés.

Pour chaque essai où des données suffisantes sont disponibles, nous avons calculé les coefficients définis ci-dessus ainsi que, en pourcentage du pouvoir calorifique du charbon brûlé $c\,P_c$:

Le PC des imbrûlés	P_k	$P_k + P_g + P_s = c\,P_c$
le PC du gaz	P_g	
la chaleur sensible dégagée	P_s	

Le rendement carbone est le rapport du carbone entraîné sous forme gazeuse au carbone total du charbon intervenant dans le phénomène (gazéification + distillation).

Nous avons calculé aussi le rendement thermique du système, égal au rapport entre les pouvoirs calorifiques du gaz d'une part et du combustible réellement utilisé d'autre part (charbon moins imbrûlés) :

$$\eta_{th} = \frac{P_g}{c\,P_c - P_k} = \frac{P_g}{P_g + P_s}$$

Ce rendement est assez analogue à celui qu'on obtiendrait par un calcul simplifié, où l'on détermine directement le charbon brûlé par les teneurs en carbone du gaz et du combustible.

Enfin, la décomposition du gaz en gaz à l'air, en gaz à l'eau et en gaz de distillation permet de donner, en pourcentage du pouvoir calorifique total du gaz, la fraction attribuable à chacun de ces phénomènes ou perdue par combustion partielle de l'hydrogène des matières volatiles.

Eléments du bilan par Nm^3 de gaz					
	Entrées	Combustible c (kg) Comburant a (Nm^3) H_2O réduit h (Nm^3)	Distillation P_D (cal) Gaz à l'air P_A (cal) Gaz à l'eau P_e (cal) Combustion $-P_h$ (cal)	PCI du gaz P_g cal %	Chaleur sensible du gaz humide sortant p_g = cal %	Chaleur totale extraite $P_e = P_g + p_g$ cal %
	Sorties	H_2O formé — h (Nm^3) Imbrûlés k (kg)	Imbrûlés $8.100 \times k = P_k$ cal %		Pertes au terrain $p_t = P_s - p_g$ cal %	Chaleur restée dans la mine $P_m = P_k + p_t$ cal %
Rendements		Rendement carbone $\eta_c = \frac{C\ gaz}{C\ charbon}$ Rendement thermique $\eta_{th} = \frac{P_g}{c\,P_c - P_k}$	Chaleur potentielle totale $P_p = P_g + P_k$ cal %		Chaleur sensible totale $P_s = c\,P_c - P_p$ cal %	PCI du combustible $c \times P_c$ cal 100 %

Le présent rapport est relatif :

I. — Aux essais effectués en Russie, de 1932 à 1943, à :
   A. Krutov et Nova-Bass (Basse-Moscovie)
   B. Schakhtinsk (Caucase septentrional)
   C. Lissitchansk (Donetz)
   D. Gorlovka (Donetz)
   E. Leninsk (Kuznetzk, Sibérie)

II — Aux essais effectués en Italie, en 1947 et 1948, à :
   A. Valdarno (Toscane)
   B. Terni (Ombrie)

III. — Aux essais effectués en Belgique, au siège Bois-la-Dame (Liège), de 1948 à 1950 :
   A. Chantier I
   B. Chantier II

IV. — Aux essais effectués aux Etats-Unis, de 1947 à 1949, à Gorgas (Alabama) :
   A. Chantier I
   B. Chantier II

V. — Aux essais effectués et actuellement en cours à Djérada (Maroc), en 1949 et 1950.

La documentation concernant les essais russes est tirée principalement des « Rapports » et des « Nouvelles de l'Académie des Sciences d'U.R.S.S. », du « Bulletin des Ingénieurs et Techniciens », de la revue « Gazéification souterraine » et d'autres revues soviétiques, propriété de la Société Coopérative Socogaz qui nous a ouvert sa documentation. Le résumé et la nomenclature de la littérature russe, publiés par Jolly, nous ont été fort utiles.

Les données concernant les essais exécutés en Italie nous ont été fournies par les ingénieurs de Socogaz, ayant participé aux essais, et par les publications de MM. Pani, Bonetti, d'Alessandro et Mezzetti dans la « Rivista dei Combustibili » de février 1948.

Les essais américains ont été décrits d'après les « Reports of Investigations » du Bureau of Mines des Etats-Unis.

Pour l'essai réalisé à Bois-la-Dame (Liège) en 1948, nous avons utilisé largement le rapport rédigé par M. Fréson, Ingénieur en Chef-Directeur à l'Administration des Mines, d'après les notes de M. Michel, Ingénieur au Corps des Mines, qui avait suivi de près les essais.

Pour le second essai de Bois-la-Dame, nous nous sommes servi surtout des rapports mensuels de Socogaz, complétés par les notes propres des ingénieurs d'Inichar.

Quant aux essais effectués au Maroc, à Djérada, nous avons cité ou résumé les rapports du Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France et ceux de M. Doumenc qui dirigeait les essais.

* * *

Pour simplifier la terminologie, et sans vouloir entrer ici dans les détails d'exécution, rappelons brièvement les principales méthodes essayées pour la gazéification des couches de charbon ou de lignite « in situ » :

1) les méthodes par percolation, où le flux gazeux circule d'un point à un autre de la couche de combustible (par exemple entre deux sondages), à travers les fissures provoquées dans la couche par l'explosion de charges judicieusement placées, ou même à travers le combustible massif, si celui-ci est suffisamment poreux (fig. 1);
2) les méthodes par chambres souterraines, où le combustible abattu par les méthodes classiques (par taille montante par exemple) est empilé dans des chambres souterraines, formées par l'espace déhouillé, et gazéifié comme dans un gazogène de surface, mais sans avoir été extrait au préalable (fig. 2);
3) les méthodes « par trous », où l'on fait passer le courant gazeux dans des trous de faible diamètre, forés dans la couche parallèlement au plan de celle-ci. Le charbon des parois fournit le combustible à gazéifier et le trou s'élargit peu à peu par érosion latérale (fig. 3);

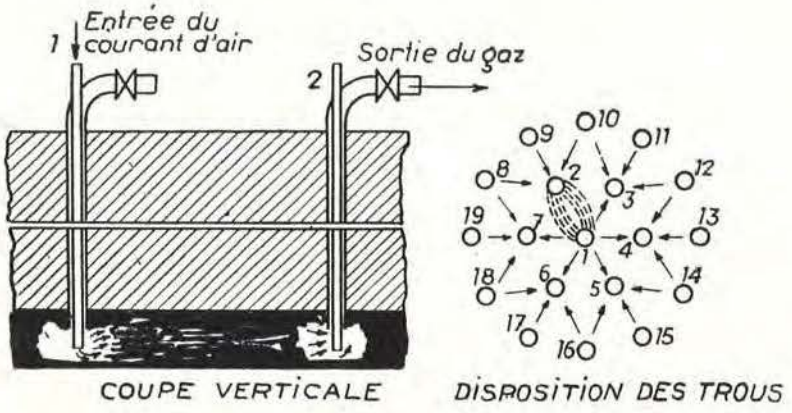

Fig. 1.

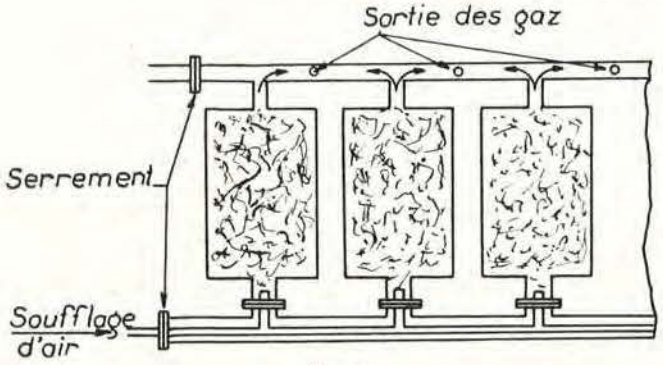

Fig. 2.

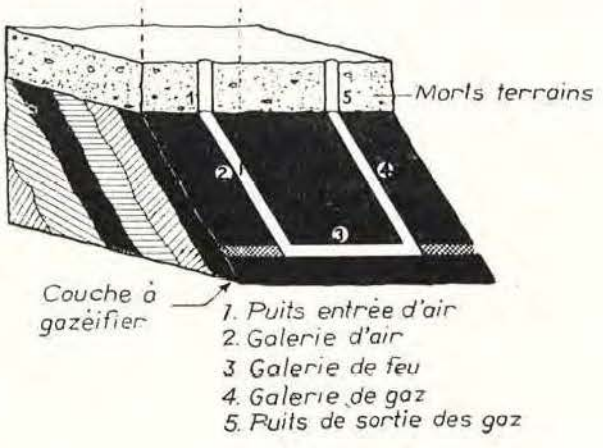

Fig. 4.

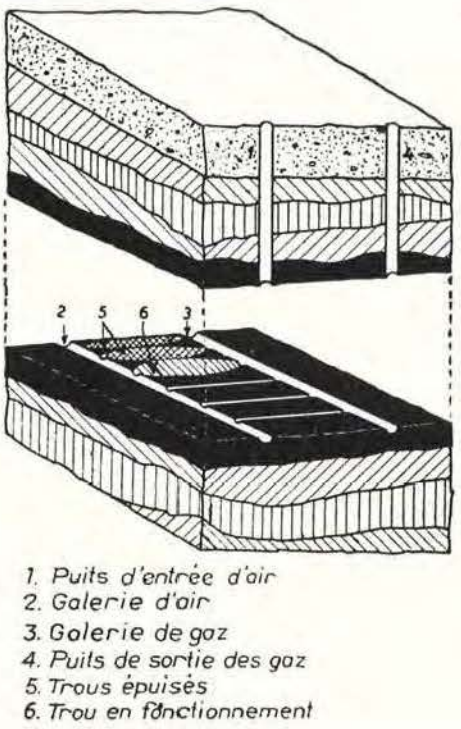

Fig. 3.

4) les méthodes « par courant », où le courant gazeux lèche une des parois d'un vaste panneau découpé dans la couche et l'entame peu à peu, à la façon d'une taille rabattante (fig. 4).

Note.

Sauf spécification contraire dans le texte :

les compositions de gaz ou de comburant sont toujours données en proportions volumétriques;

les compositions de combustibles (charbons ou lignites) sont données en proportions gravimétriques. Les teneurs en humidité sont calculées par rapport au tout venant, les teneurs en cendres par rapport au combustible sec, les teneurs en carbone fixe et en matières volatiles et les analyses élémentaires par rapport au combustible « net » (sec et sans cendres);

les pouvoirs calorifiques cités sont les pouvoirs calorifiques inférieurs;

les m^3 cités sont toujours des m^3 normaux (à 0° C 760 mm de Hg), qu'il s'agisse de gaz ou de vapeur d'eau (1 Nm^3 H_2O = 0,804 kg);

les cal sont toujours de grandes calories;

les coefficients

a : comburant en Nm^3 par Nm^3 de gaz,
c : charbon net brûlé en kg par Nm^3 de gaz,
k : imbrûlés en kg en carbone par Nm^3 de gaz,
h : vapeur d'eau formée (signe —) ou réduite (signe +) en Nm^3 par Nm^3 de gaz,

les rendements calorifiques (PC du gaz/PC du combustible réellement utilisé) et carbone (carbone contenu dans le gaz/carbone total du charbon)

ont été définis dans l'introduction.

I. — ESSAIS RUSSES

Dès 1931, le Gouvernement Soviétique accorda des subsides en vue d'essais préliminaires de gazéification souterraine de charbon. Deux ans plus tard fut constitué le Podzemgaz, organisme chargé d'exécuter des travaux expérimentaux et d'étudier la réalisation d'installations industrielles.

Le Podzemgaz organisa cinq installations d'essais en Basse-Moscovie, dans le Donetz et le Kuznetzk (Sibérie orientale). Les premières tentatives, visant à reconstituer aussi fidèlement que possible un gazogène ordinaire dans le fond de la mine (méthode par chambres), ne rencontrèrent guère de succès. Mais de 1933 à 1939, le Podzemgaz mit au point trois nouvelles méthodes (par percolation, par trous et par courant), s'appliquant aux différents genres de couches. Avec chacune de ces méthodes, on aurait enregistré des succès importants à l'échelle expérimentale et deux d'entre elles auraient été appliquées à échelle industrielle (méthodes par courant et par percolation).

En 1938, les résultats obtenus parurent suffisamment concluants pour que l'on décidât de construire une série d'installations industrielles dans le Donetz, en Basse-Moscovie et en Sibérie, et d'utiliser le gaz produit pour la production d'électricité, pour l'industrie chimique et pour les services de distribution urbains. On ne sait guère où en est actuellement la construction de ces grandes installations; elle a dû être freinée, sinon arrêtée, par la guerre. Il est cependant certain que celle de Gorlovka a fonctionné avec succès et que celle de Moscovie a été mise en service en novembre 1940.

Une des installations prévues devait assurer une production équivalente à celle de 1.500 mineurs et produire 400.000 m^3 de gaz par heure, représentant environ 500.000 tonnes de charbon par an.

On a rassemblé dans le tableau ci-joint quelques données relatives aux couches dans lesquelles furent exécutés les essais décrits. On remarquera que les conditions signalées, très diverses, rendaient l'exploitation par les méthodes ordinaires difficile ou non économique pour l'une ou l'autre raison : faible valeur du charbon (A), couche mince (B — C), forte inclinaison (C — D), combustion spontanée (E), teneur en cendres élevée (D).

La région de Toula, où eurent lieu les premiers essais (Krutov) et les réalisations industrielles de la méthode de percolation (Nova-Bass), se trouve à 125 km environ au sud de Moscou.

Plusieurs stations d'essais ont été groupées dans le bassin du Donetz, aux environs de Rostov (sur la mer d'Azov) : Gorlovka, à 140 km au nord-ouest de cette ville, Lissitchansk, à 180 km au nord-nord-ouest, et Schakhtinsk, à 55 km au nord-est, aux confins du Donetz et du Caucase septentrional.

Une station, sur laquelle nous ne possédons guère de détails, a été installée dans l'Oural, à Tchéliabinsk, à 200 km au sud-est de Sverdlovsk.

Enfin, d'autres essais ont eu lieu en Sibérie orientale, dans le bassin du Kuznetzk, à Léninsk, à 220 km au sud-sud-est de la ville de Tomsk.

A. — Basse-Moscovie. — Station de Krutov.

De mai 1933 à fin 1935, des essais ont été exécutés sur quatre panneaux différents.

1) *Premier essai - mai 1933.*

Le charbon de Krutov, très cendreux et humide (voir tableau I), est très poreux. Aussi, le premier essai fut-il tenté sur un panneau massif de 10 m × 10 m, contenant 250 t de charbon et isolé de la couche par des maçonneries. L'amenée d'air et le collecteur de gaz débouchaient au milieu de deux parois opposées.

Après l'allumage, on constata que l'étanchéité du système laissait à désirer et que la combustion ne progressait que lentement. En deux semaines, une faible partie seulement du panneau avait été consumée. Le gaz recueilli contenait moins de 10 % de CO, mais 10 à 14 % d'O_2 en excès. On cite d'autre part les chiffres suivants :

TABLEAU I

Site	A *Krutov*	A *Nova-Bass*	B *Schakhtinsk*	C *Lissitchansk*	C *Lissitchansk*	D *Gorlovka*		E *Leninsk*
Bassin	Basse-Moscovie	Basse-Moscovie	Donetz Nord-Caucase	Donetz	Donetz	Donetz		Kuznetzk
Profondeur	20 m	60 m		24-33 m	135 m	110 m		20-30 m
Couche			Rosovy	Bobrovsk	K8 (2 laies)	Dérézovka	Zolotarka	Zhurinsk
Pendage	0°	0°	19°-22°	36°-45°	43°-65°	70°-75°		2°
Puissance	1 m 75	3 m 50... 4 m	0 m 38	0 m 75	1 m 68	1 m 80	0 m 75	5 m
Epontes	Toit incohérent sable + argile	Toit: 1 m d'argile, puis bancs de sable et d'argile	Toit: schiste argileux. Mur: schiste sableux à 6-7 % de H_2O. Pas de calcaires	Toit et mur : schiste	Toit: calcaire compact Mur: schiste sableux	Schistes. Intercalations stériles		
Charbon	Très poreux : 1,28 t/m³. Ininflammable, même sec. S'allume vers 140-150° dans air suroxygéné	Le même qu'à Krutov, moins humide	Anthracite	Charbon à longue flamme, non cokéfiant	Charbon à longue flamme	Barré		Charbon à longue flamme. Combustion spontanée
Analyse immédiate s/ tout venant — PCS	—	5.200	7.869	5.200	5.536	5.988	6.170	6.290
Analyse immédiate s/ tout venant — H_2O	30-34	12	3,5	14,3	6	1,05	1,63	9,7
Analyse immédiate s/ sec — Cendres	40-50	40	4,45	20,8	15	29,6	26,2	3,5
Analyse immédiate ch net — CF	—	—	94,3	—	59	—	—	55,4
Analyse immédiate ch net — MV	—	—	2,5	35,8	38,3	18,5	20,3	44,6
Analyse élémentaire sur charbon net — C			93,7	77		85	83,6	79,1
Analyse élémentaire sur charbon net — H			2,7	5,4		4	5,1	5,9
Analyse élémentaire sur charbon net — S			1,7	2,8		4,7	2,5	0,3
Analyse élémentaire sur charbon net — O			2,2	13,1		3,9	7,2	12,3
Analyse élémentaire sur charbon net — N				1,7		2,4	1,6	2,4
Méthodes essayées	Percolation sans explosifs, avec explosifs. Trous horizont.	Courant (taille rabattante) Percolation	Chambres Courant	Percolation (avec explosifs) Trous : verticaux horizontaux	Courant (taille montante)	Courant (taille montante)		Courant (taille rabattante)

CO	H_2	CH_4
10-12	5-6	3-4

Ce premier essai démontra surtout la nécessité de disposer d'un équipement de soufflage puissant et d'un chantier suffisamment étanche.

2) *Second essai - août 1934.*

La perméabilité au gaz du massif vierge s'étant avérée trop faible lors du premier essai, un second panneau fut réalisé avec fragmentation préalable de combustible par des charges de dynamite, placées au fond de trous de sonde et mises à feu à partir de la surface.

Le schéma du chantier représentait un gazogène couché dans un plan horizontal (fig. 5).

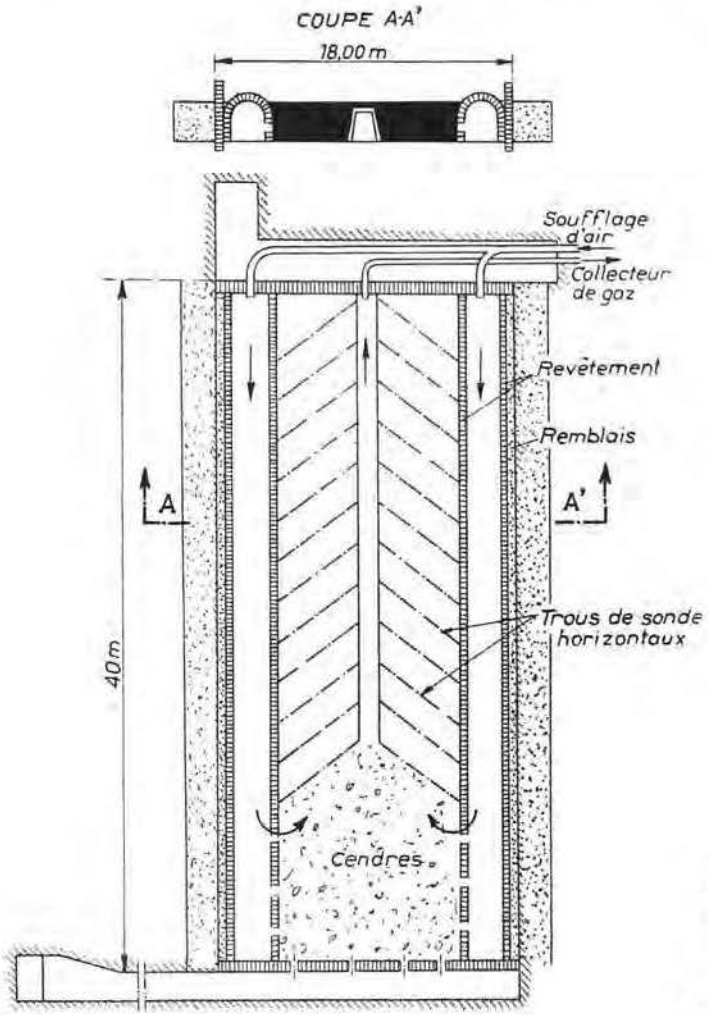

Fig. 5.

Ce second panneau, de 18 m × 40 m, isolé par des cloisons et pourvu de trous de sonde pour prises de gaz, fut mis à feu le 18 août 1934.

Dans les différents trous de prise de gaz, on a obtenu du gaz combustible, mais ce gaz était brûlé avant de parvenir au collecteur général.

CO_2	CO	CH_4	H_2
15-23	0,4-7,6	0,3-11	0,6-20

On ne réussit pas à obtenir une marche régulière. Cette fois-ci encore l'équipement se révéla trop peu puissant.

3) *Troisième essai - janvier 1935.*

Le troisième essai a été exécuté selon la méthode des trous de sonde, à une profondeur d'une vingtaine de mètres sous la surface. On accédait au chantier par deux puits et de courtes galeries (figure 6).

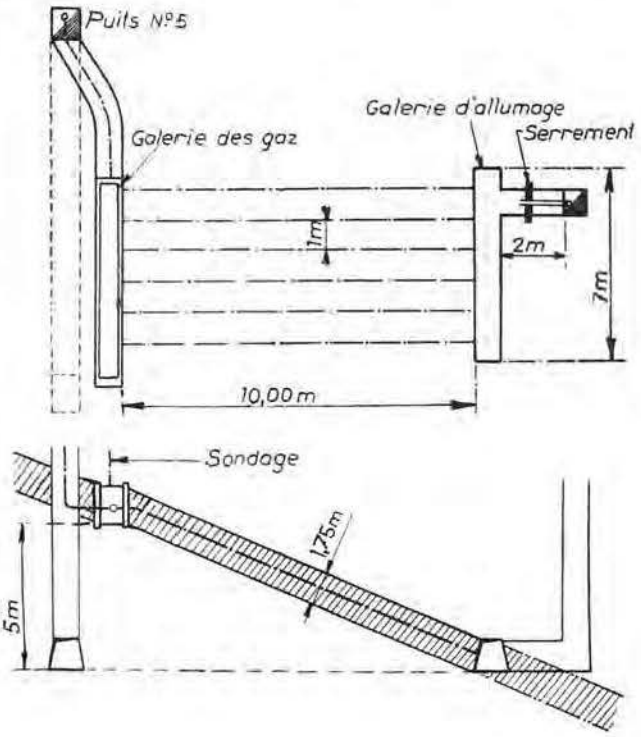

Fig. 6.

Six trous parallèles de 50 mm de diamètre ont été forés à des intervalles de 1 m entre une « galerie de combustion » et une « galerie de gaz » parallèles, distantes horizontalement de 10 m et verticalement de 5 m. Le panneau avait donc une longueur de 12 m, une largeur de 6 m et, pour une puissance de la couche de 1 m 75 et un poids spécifique du charbon de 1,25 t/m³, contenait 157 t de combustible.

L'entrée des trous était élargie en entonnoir sur 0 m 50 de largeur et de profondeur. La galerie de gaz était soutenue par deux murs épais de 0 m 50, laissant entre eux un passage de 0 m 50. Les gaz étaient évacués, soit par un tuyau placé dans un des

puits, soit par un sondage mettant la galerie des gaz en communication directe avec la surface.

Les ventilateurs soufflants pouvaient fournir une pression de 600 mm H_2O. On a également fait des injections de vapeur. Malheureusement, les débits n'ont pas été mesurés d'une façon continue.

L'essai se déroula du 6 au 17 janvier 1935. La température du chantier resta basse, par suite de l'humidité du charbon. C'est ce qui explique les fortes teneurs en CO_2. Ce gaz était très humide (370-460 g de H_2O/m^3). Une partie du gaz se perdit par des fuites dans les vieux travaux de l'essai 2, voisin du chantier actuel. Chose importante, le processus s'est avéré réglable et pour la première fois on a pu « tenir le phénomène en main ».

Les résultats obtenus avec soufflage d'air sont indiqués ci-dessous. Si l'on exclut la période de mise en train, caractérisée par la présence d'oxygène résiduel dans le gaz sortant du chantier, les teneurs des différents composants du gaz et les débits ont varié du 10 au 17 janvier entre les limites suivantes:

	CO_2 %	O_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	N_2 %	PCI cal/Nm^3	Débit air Nm^3/h	Débit gaz Nm^3/h
de	18,0	0,1	1,4	2,7	0,5	67,0	200	1.200	1.000
à	20,4	0,6	5,6	8,6	3,1	75,5	506	1.600	1.350
le 10/1	18,4	0,4	5,6	8,6	2,1	67,0	506	?	1.060
Moyenne	19,0	0,4	1,8	5,0	2,1	72,0	363	1.300	1.200

Par le procédé de « régénération », c'est-à-dire avec injection intermittente d'air et de vapeur, on a obtenu du 12 au 16 janvier les résultats ci-dessous. les pourcentages d'azote minimum correspondant aux débits les plus faibles et vice-versa.

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI	Débit air	Débit gaz
de	19,4	0,1	1,9	6,1	0,8	67,3	420	1.400	1.360
à	41,4	1,0	5,5	15,5	3,1	41,5	720	0	400
le 13/1	19,4	0,1	1,9	15,2	3,1	60,2	720	—	1.200
le 16/1	31,9	0,3	5,5	14,1	0,8	47,4	600	—	400

D'après une autre source on aurait obtenu, par soufflage d'air et de vapeur, un gaz de composition:

CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
30-40	0,4	1-10	30-40	1,5-3	15-25	1.200-1.500

Cependant, on a rencontré dans cette station de grandes difficultés : le charbon y était vraiment trop mauvais (35 % de cendres, 25-30 % H_2O) et très friable, ce qui occasionnait une production abondante de suies et de cendres volantes, causant des obstructions dans les tuyauteries.

On eut à faire face à d'autres difficultés encore dues à l'irrégularité et l'inétanchéité du gisement, à des incendies dans les travaux d'approche, à l'insuffisance de la force motrice et de l'appareillage de mesure. C'est pour ces raisons qu'on n'a pas pu passer, à Krutov, à des réalisations industrielles et que les essais subséquents furent effectués sur d'autres sites.

Le gisement de Nova-Bass, situé aussi dans le bassin de Basse-Moscovie, à 3 km au sud de Toula, a la forme d'une lentille irrégulière, mesurant 2 km dans le sens est-ouest et 2,5 km dans le sens nord-sud.

Il contient des couches d'épaisseur fort variable d'un charbon brun, de mauvaise qualité, analogue à celui de Krutov. Ces couches se terminent souvent en coin dans les bancs de sables ou d'argiles ou se subdivisent, de sorte qu'on a en certains endroits jusqu'à vingt couches superposées.

Par suite de la présence de bancs d'argile, il y a plusieurs niveaux aquifères, rendant impossible l'exploitation de certaines couches.

En 1939, on y fit des essais par la méthode de courant. La méthode par percolation fut aussi essayée et réussit grâce à la haute teneur du charbon en cendres peu fusibles. Ces cendres restent poreuses à 1.200°, soutenant le toit et permettant une progression normale de la zone de réaction. Elles s'écrasent vers 1.300-1.400° et fondent à 1.500°. On obtient, avec soufflage à l'air, du gaz à 800-900 cal/m^3 et, avec de l'air suroxygéné à 25-30 % d'O_2, du gaz à 1.000-1.100 cal/m^3.

La première installation industrielle de ce bassin fut mise en marche en novembre 1940. On y utilisa une variante de la méthode de courant appliquée à une couche de charbon analogue à celle de Krutov, horizontale, située à 60 m de profondeur. Le charbon tient 12 % d'humidité et 40 % de cendres.

Dans cette variante, on atteint la couche par trois puits verticaux, distants de 50 m et traversant les morts-terrains. Du pied de ces puits par-

tent trois galeries horizontales, parallèles, longues de 70 à 100 m et réunies à leur extrémité par une recoupe transversale : la taille de feu.

Ces galeries sont garnies d'un tubage perforé de 500 mm de diamètre. Les ouvertures sont fermées par des couvercles en tôle mince, maintenus extérieurement par un fil de fer et rendus étanches par un joint d'amiante. Lors de l'avance du feu, le fil de fer doit être détruit, libérant les ouvertures au fur et à mesure de l'avance du front de taille. Le vide entre les tubes et le terrain est colmaté par de l'argile. Les puits verticaux sont également pourvus d'un tubage et colmatés à l'argile.

La mise à feu se fait électriquement, au moyen de bûchers de bois et de charbon.

L'installation est complétée par une soufflerie, un générateur d'oxygène, des compresseurs et des chaudières à vapeur.

Cette station était en démarrage en novembre 1940. Une autre installation, devant commencer à fonctionner en 1941, devait employer la méthode de percolation. Un projet de pipe-line était à l'étude pour amener le gaz produit à Moscou.

D'après l'auteur russe Nussinoff, cette nouvelle station était, en 1946, en pleine activité et en voie d'agrandissement.

B. — Station de Schakhtinsk (Donetz).

Les essais furent entrepris dans cette station dès novembre 1933. On y étudia la méthode par chambres, appliquée à une couche d'anthracite de 0,40 m, en plateure (20°) (fig. 7).

Des essais furent effectués en donnant aux chambres des orientations diverses par rapport à la ligne de plus grande pente de la couche. Plusieurs chambres furent réunies en parallèle à une entrée d'air et une sortie des gaz communes. On disposait de deux ventilateurs, donnant 3.000 m^3/h sous 75 mm de pression (on pouvait au besoin les placer en série pour obtenir 140 mm), et d'un autre capable de fournir 7.000 m^3/h sous 700 mm, réunis à un collecteur général descendant au panneau à gazéifier par un puits vertical et la galerie d'air.

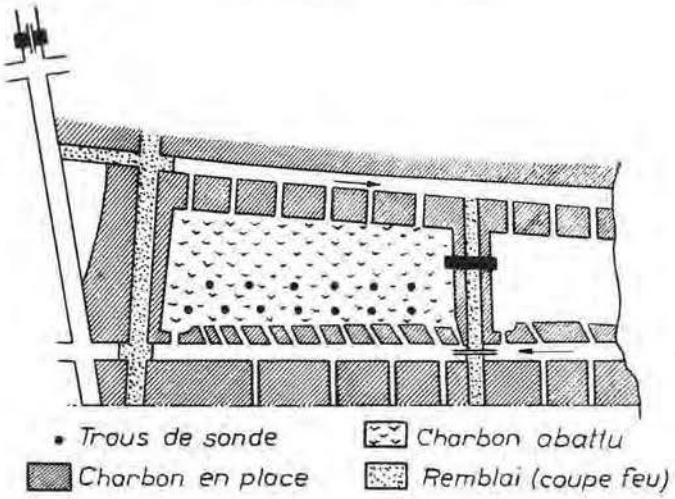

Fig. 7.

L'aspiration était équipée de deux extracteurs débitant respectivement 4.000 m^3/h (— 220 mm H_2O) et 3.000 m^3/h (— 120 mm).

On obtint dès le mois de janvier 1934 les résultats suivants :

	CO	H_2	CH_4	PCI	PCS
10-1-34	7,7	13,2	0,2	590	655
11-1-34	13,8	27,3	1,2	1.222	1.365
12-1-34	16,2	30,4	2,0	1.442	1.610
13-1-34	7,6	28,4	0	960	1.100

La composition du gaz dépend fortement de la présence d'humidité provoquant la formation de gaz à l'eau. On a brûlé de 25 à 75 kg de charbon par m^2 et par heure de fonctionnement. La quantité de charbon brûlé fut à peu près équivalente à la charge des chambres, la gazéification d'une partie des parois compensant approximativement les pertes par imbrûlés.

Les pertes de chaleur par conduction paraissent peu importantes, l'influence de la température ne se marquant plus au delà de 1 m à 1 m 50 de la zone de feu.

On a donc pu obtenir du gaz combustible, mais pas d'une façon régulière. Il se forme des « cheminées », des chemins de passage privilégiés pour le gaz dans la masse de charbon entassée dans les chambres.

D'autres essais furent exécutés dans la suite, à plus grande échelle, en veillant spécialement à l'étanchéité des panneaux. On cite les résultats suivants :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
?	12,0-18,0	-	10,0-19,0	6,0-12,0	1,0-2,0	-	750-1.100
du 5-8-34 au 16-8-34	6,0-12,0	0-1,2	13,5-23,0	6,5-19,0	0-0,6	70,9-58,6	-
du 15-9-34 au 20-9-34	12,6-16,6	0-0,4	11,5-30,2	15,0-24,1	0,3-1,8	54,5-33,4	1.170-1.727

Malgré la proportion de travail souterrain inhérent à cette méthode, le prix du gaz obtenu serait 1/5 de celui du gaz de gazogène ordinaire (?).

D'autres essais eurent encore lieu postérieurement à Schakhtinsk, entre autres par la méthode de courant. Ils ont montré que les roches du toit gonflaient et s'infléchissaient, venant fermer l'arrière-taille (fig. 8 et 9).

Le charbon est attaqué en biseau, la partie supérieure de la couche brûlant la première. Les scories fondues se déposent sur le mur. Un mince canal reste ouvert le long du charbon et une certaine quantité de coke imbrûlé reste parmi les cendres.

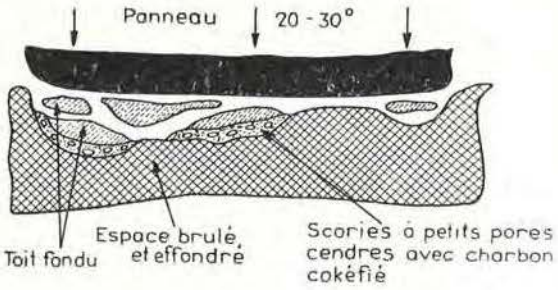

Fig. 8.

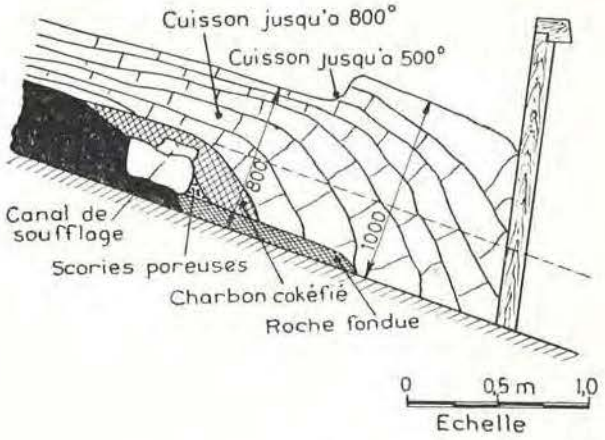

Fig. 9.

C. — Station de Lissitchansk.

Le gisement de Lissitchansk comporte plusieurs couches de l'assise C_2^5 (la même qu'à Gorlovka), à haute teneur en matières volatiles. Elles ont une direction SE-NO et sont inclinées vers le S-O avec des pendages variables, diminuant du nord au sud de 60° à 35°.

La couche utilisée pour les premiers essais est la veine Bobrovsk, fournissant du charbon à longue flamme de composition :

PCI	H_2O	Cendres	MV	Analyse élémentaire (net)					PCI
tout venant		sec	net	C	H	N	O	S	sur net
5.150	14,3	20,8	35,8	77,0	5,4	1,7	13,1	2,8	7.704

Elle a un pendage de 36° à 45° et une puissance de 0,75 m. Les épontes sont constituées de schistes. Les essais de gazéification ont été effectués à faible profondeur (25-35 m) suivant les méthodes les plus variées.

1) *Premier essai.*

Les premières tentatives eurent lieu en 1933 et 1934, selon un procédé intermédiaire entre la méthode de percolation et celle des chambres.

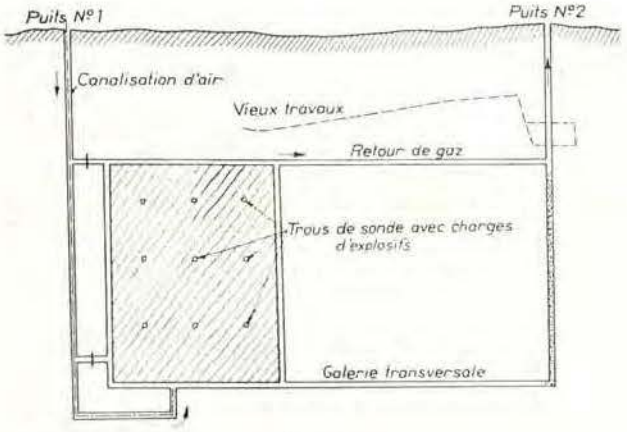

Fig. 10.

Le panneau à gazéifier, d'assez grandes dimensions, isolé du reste de la couche par des maçonneries, était relié à la surface par deux puits inclinés creusés dans la couche et servant de passage, l'un (n° 1) à la conduite d'air, aboutissant à la partie inférieure du panneau à sept tuyères, et l'autre (n° 2) à la conduite de gaz, partant de la partie supérieure. Ce panneau fut truffé de charges de dynamite placées dans des trous de sonde et destinées à exploser au fur et à mesure de l'avancement du feu, de façon à fragmenter le massif et à assurer le contact du gaz avec le combustible (fig. 10).

On disposait, pour le soufflage, de trois compresseurs de 2.500 m^3/h et d'un ventilateur de 5.000 m^3/h.

L'allumage se fit en février 1934 au moyen de bois et de copeaux arrosés de pétrole.

Les charges de dynamite explosèrent comme prévu, mais d'une manière fort irrégulière, causant des by-passages d'air dans les fissures produites. Cet air venait brûler le gaz en aval de la zone de réaction. Aussi n'obtint-on qu'une production intermittente de gaz de mauvaise qualité, contenant du O_2 résiduel, beaucoup de CO_2 et peu de CO et de H_2.

Après deux mois de fonctionnement, on n'avait pas encore obtenu de gaz combustible. Cependant le 29 juin, à l'orifice d'un des neuf sondages qui

avaient servi à placer les charges de dynamite, on constata un dégagement de gaz combustible qui se maintint jusqu'au 13 juillet avec les compositions citées ci-dessous :

		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	C_nH_m	N_2	PCI	PCS
1-7	7 h 25	18,0	0,87	9,3	20,6	2,8	0,05	48,2	1.054	1.180
3-7	2 h 35	12,3	0,74	11,9	13,8	2,8	0,15	58,2	967	1.064
4-7	15 h 35	15,6	0,63	5,98	7,8	4,2	0,15	66,24	753	834
moyenne		15,3	0,76	9,0	14,1	3,3	0,11	57,5	925	1.026

Puisque, malgré la mauvaise qualité du gaz recueilli à la sortie de la mine, on pouvait soutirer un gaz à 1.200 cal/m³ par un trou de sonde atteignant directement la zone de feu à partir de la surface, le point d'intersection du sondage et de la couche devait constituer une zone favorable à la gazéification. Des essais effectués sur des blocs de charbons extraits confirmèrent cette constatation : le charbon des parois du trou se gazéifiait jusqu'à ce que le diamètre soit devenu un multiple du diamètre primitif. Ceci fut le point de départ de la méthode par trous de sonde qui fut appliquée avec succès.

2) *Essais préliminaires sur trous isolés.*

Un premier essai effectué le 24 avril 1934 prouva qu'il n'était pas nécessaire de fragmenter le charbon au préalable. En injectant l'oxygène pur, comprimé dans des bonbonnes, par un sondage en roche aboutissant à la surface de la couche de charbon, on forma dans celle-ci une excavation de plus de 1 m 50 de profondeur sur 0 m 60 de largeur (fig. 11).

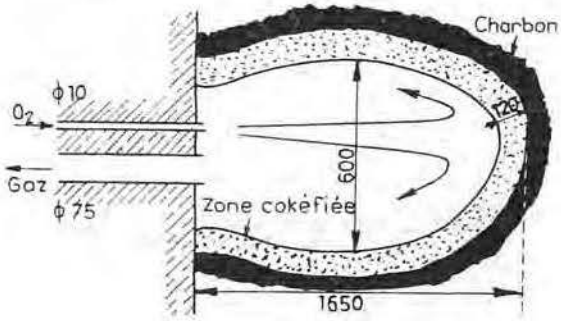

Fig. 11.

Le gaz recueilli accusait un rapport CO/CO_2, qui, faible au commencement, alla en augmentant au fur et à mesure que le trou s'approfondissait.

Le PCI du gaz monta jusqu'à 2.500 cal/m³ (voir tableau ci-dessous). L'essai dura au total trois heures et fut arrêté à cause d'une avarie au tuyau collecteur de gaz.

	Pression de comburant	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	C_nH_m	N_2	PCI
Allumage									
2 h 20	—	40,0	—	12,0	—	—	—	—	—
2 h 40	2,8 atm	17,6	0,2	27,2	—	—	—	—	—
3 h 20	2,6 »	12,7	0,9	51,6	28,0	0,5	0,15	6,55	2.250
3 h 40	3,5 »	13,1	0,4	53,5	31,3	0,5	0,1	1,3	2.450
5 h	7,0 »	12,8	0,6	55,8	23,6	0	0,1	7,1	2.290
fin de l'essai									
5 h 20	—	11,0	—	62,0	—	—	—	—	—

La teneur du gaz en hydrocarbures est insignifiante; ceux-ci sont en effet crackés par suite de la haute température réalisée par le soufflage à l'oxygène (1.900°). Cette pyrogénation s'accompagne d'un dépôt de suie. Le charbon, non cokéfiant dans les conditions ordinaires, forme ici un coke brillant, fendillé, graphitisé.

La zone influencée par la chaleur n'a, malgré les hautes températures atteintes, que 10 à 12 cm d'épaisseur. On y trouve successivement :

un dépôt de suie et de cendres fondues sous forme de perles,
un coke brillant, fendillé,
du semi-coke,
le charbon séché, inaltéré.

Le schiste encaissant est partiellement vitrifié donnant un verre gris sombre ou blanchâtre.

Les zones concentriques, désignées ci-dessus, se retrouvent sans doute également dans les essais par la méthode avec courant : les gaz de distillation, dégagés par la masse de charbon échauffée peu à peu, traversent ces zones successives en se dirigeant vers le front de feu.

Un autre essai du même genre fut exécuté au mois de septembre. Un trou de sonde fut foré suivant la plus grande pente de la couche au diamètre de 75 mm. On mit le feu au moyen d'oxygène pur et on l'alimenta ensuite pendant quelque temps en air suroxygéné à 45-60 % de O_2. Le sondage resta quatre jours en activité et fournit jusqu'à 380 m³/h de gaz combustible de composition :

		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	C_nH_m	N_2	PCI
5-9	4 h 35	12,3	0,72	10,0	6,7	0	0,13	70,4	485
5-9	15 h 50	13,5	0,17	6,6	4,4	1,6	0,05	73,6	453
6-9	2 h 50	11,2	0,8	11,4	7,4	2,5	0,15	67,6	760
7-9	11 h 20	13,5	0,2	8,9	3,9	1,5	0,05	72,0	501
8-9	12 h	11,6	0,4	12,7	9,0	1,0	0,53	65,0	745

3) *Essai n° 3.*

L'essai suivant (1935) devait permettre l'étude du processus dans plusieurs trous simultanément, la détermination de la quantité de charbon brûlée dans chaque trou et l'étude de l'influence des injections d'air ou de vapeur d'eau. Cinq trous de

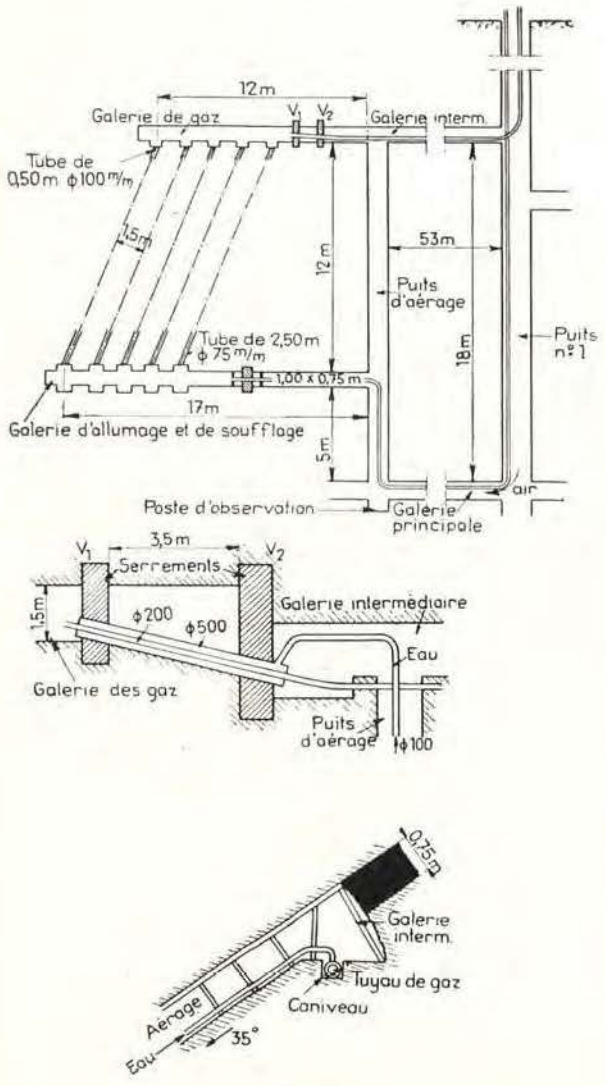

Fig. 12.

12 m de longueur et de 75 mm de diamètre, distants entre eux de 1 m 50 et numérotés de 1 à 5, furent forés suivant la plus grande pente de la couche, reliant deux galeries horizontales fermées par des serrements (fig. 12). Les extrémités de chaque trou étaient renforcées en haut sur 50 cm par des tubes de 100 mm, en bas sur 2 m 50 par des tubes de 75 mm, chaque trou étant alimenté indépendamment en air (conduite de 40 mm aboutissant à la base du trou) et en eau ou vapeur (conduite de 18 mm débouchant à 7 m de hauteur dans le trou).

Le gaz était recueilli dans une galerie collectrice commune, où débouchaient les têtes de sondages, et évacué par une conduite de 200 mm, refroidie par une circulation d'eau.

On mesurait les débits d'air (pour chaque trou) et de gaz au moyen de diaphragmes, les températures au moyen de pyromètres, de thermomètres à Hg ou à vapeur, suivant les cas. Les analyses se faisaient toutes les demi-heures, au moyen d'un appareil d'Orsat perfectionné.

Allumage.

Un essai d'allumage, avec une spirale de fil de fer rendue incandescente par un courant électrique, introduite à 4 m de profondeur dans un sondage, tandis que l'on introduisait du O_2 par le bas, échoua; il fallut amener O_2 au moyen d'un tube de 18 mm contre la paroi du trou, au point même où devait se faire l'allumage (12 avril 1935). Le trou n° 5 fut allumé à 12 heures et le n° 1 à 17 h 45. On dut alors interrompre le soufflage pendant cinq jours, pour effectuer des modifications au matériel; le n° 1 continua seul à brûler, par tirage naturel, et fournit un gaz de composition variable :

CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4
3-13	0-3	1-12	0-16	0-3

Le 17 avril, on procéda à l'allumage normal des autres trous, mais le n° 2 dut être mis hors service. Le gaz sortant était à 700° C.

Marche de l'expérience.

Quelques minutes après l'allumage, on recueillait déjà du gaz combustible. Après 40 minutes de fonctionnement sous tirage naturel, on souffla des débits de 200 à 300 m^3/h dans chacun des quatre trous en service, soit au total environ 1.000 m^3/h d'air, produisant 1.600 m^3/h de gaz.

CO_2	CO	H_2	CH_4	PCI
20-9	13-15	11-13	1,5-3	850-950

Ce régime fut maintenu pendant dix jours, sauf quelques interruptions dues au bouchage des conduites par du coke ou du mâchefer. Pendant ces interruptions, on laissa le système fonctionner sous tirage naturel. Ces arrêts du soufflage firent apparaître des quantités de CO_2 élevées (17 à 20 %). Le rétablissement du débit normal améliorait nettement le gaz.

A plusieurs reprises, on a constaté des températures anormalement élevées (900° au lieu de 700°) à la sortie des gaz.

La cause en fut attribuée à la combustion, dans la galerie collectrice, du gaz formé dans certains trous par l'air by-passé dans d'autres trous. En effet, en fermant les trous suspects, on fit retomber immédiatement la température du gaz à sa valeur normale (750°). Le 27 avril, la conduite de gaz se boucha définitivement et, le 29 avril, l'expérience fut arrêtée.

Conclusions.

1) En douze jours, on a fait passer dans les trous 1, 3, 4 et 5 un total de 104.300 m³ d'air, produisant 120.500 m³ de gaz de composition moyenne :

CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
12,0	0	9,4	12,8	3,0	62,8	870

Si, en partant de cette composition moyenne et de celle du charbon, nous effectuons le calcul du bilan matières suivant la méthode développée dans l'introduction, nous obtenons, par Nm³ de gaz :

Eléments du bilan par Nm³ de gaz						
Entrées	Combustible c = 0,442 kg Comburant a = 0,787 Nm³ H_2O réduit h = — Nm³	Distillation 856 cal Gaz à l'air 214 cal Gaz à l'eau cal Combustion — 200 cal	PCI du gaz 870 cal 27 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = 0,078 Nm³ Imbrûlés k = 0,210 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,210 = 1.700 cal 55 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 58 % η_m = 57 %	Chaleur potentielle totale 2.570 cal 80 %		Chaleur sensible totale 640 cal 20 %	PCI du combustible 0,442 × 7.280 = 3.210 cal 100 %

D'après le rapport comburant/gaz calculé, à 104.300 m³ d'air soufflé devraient correspondre 133.000 m³ de gaz au lieu de 120.500; la différence de 12.500 m³, soit 10 % environ, s'explique facilement par les fuites d'air ou de gaz, tout le circuit se trouvant en pression par rapport à l'atmosphère extérieure (200 mm de H_2O environ).

On aurait consommé en douze jours :

133.000 × 0,442 = 59.000 kg de charbon,

dont 38 % ou 22,5 t environ auraient été intégralement gazéifiées et 36,5 t, cokéfiées.

Le panneau mesurait environ 7 m 50 de largeur sur 12 mètres de hauteur, ce qui correspond, avec une puissance de 0 m 75 et une teneur en cendres de 20,8 %, à :

7,5 × 12,0 × 0,75 × 0,792 × 1,5 = 70 t de charbon net.

85 % du panneau auraient donc participé à l'élaboration du gaz et le tiers environ aurait été vraiment gazéifié.

Ces chiffres concordent bien avec les constatations faites après l'essai, lors de l'examen du panneau : les trous s'étaient élargis en forme de cigare, atteignant 1 m 05 dans leur partie la plus large.

Si l'on essaie de décomposer le gaz en produits de distillation et de gazéification, on obtient :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Distillation	2,9	—	2,3	20,6	3,0	0,6	856
Gaz à l'air	9,1	—	7,1	—	—	47,6	214
Combustion de H_2 ...	—	—	—	— 7,8	—	14,6	— 200
Total	12,0	—	9,4	12,8	3,0	62,8	870

Les recombustions masquent donc presque complètement les effets de la gazéification.

2) Avec un débit d'air de 500 m^3/h dans un trou, on a noté une perte de charge de 32 mm. Aux extrémités du trou, protégées par les tuyaux de fer, le diamètre était resté de 75 mm comme au commencement, ce qui correspond à une vitesse de 31 m/sec pour le courant gazeux. La partie médiane du trou s'était élargie juqu'à 1 m 05. En supposant les gaz à 1.000°, ceci correspond à une vitesse de 0 m 80 par seconde. Alors qu'aux extrémités des morceaux de coke sont arrachés des parois par la violence du courant gazeux, dans la partie médiane il se dépose, grâce à la réduction de vitesse, une couche de cendres qui recouvre peu à peu le charbon et ralentit les réactions.

3) Il apparaît nettement que, dans les limites des essais ci-dessus, le gaz s'améliore à débit croissant. Avec 1.700 m^3/h, on a obtenu du gaz à 1.300 cal/m^3. Avec 1.000 m^3/h, on obtient en moyenne 900 cal/m^3, avec par exemple 10 % CO_2, 15 % CO, 12 % H_2 et 2 % CH_4.

Dès que le débit tombe en dessous de cette valeur, le gaz s'appauvrit fortement. Le CO_2 monte à 17 %, le CO et le H_2 tombent à environ 5 % et, pour des faibles débits (tirage naturel), à des pourcentages insignifiants.

Débit total	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Tirage naturel	15-16	0,2-0,5	1-3	1- 2	-	-	-
200- 300 m^3/h	16-18	-	3-4	5- 7	-	-	-
500- 600 m^3/h	-	-	5-6	5- 6	-	-	-
720 m^3/h	17-	-	4-	5-	-	-	-
1.000 m^3/h	9-10	-	7,8-15	12-15	3-7	-	800-1.200
1.700 m^3/h	-	-	-	-	-	-	1.300 cal

Les débits doivent naturellement être en rapport avec la largeur effective des trous et doivent augmenter au fur et à mesure que ceux-ci s'élargissent par combustion des parois.

Lorsque l'arrivée d'air est complètement coupée, on constate un dégagement de CO_2 (50 %) et de H_2 (35 %), provenant sans doute de la réaction du charbon chaud avec l'humidité du terrain et de la distillation des matières volatiles de la couche.

4) *Essai n° 4.*

Un nouvel essai a été fait du 24 juin au 5 juillet 1935. La disposition du circuit de gaz avait été simplifiée et modifiée pour éviter le dépôt de cokes et mâchefers dans les parties horizontales de la conduite de gaz.

Trois trous de 25 m de longueur et 100 mm de diamètre ont été forés parallèlement à 2 m 50 l'un de l'autre, en suivant la plus grande pente de la couche. Contrairement à l'essai précédent, les trous n'étaient pas raccordés individuellement à la conduite d'air, mais alimentés tous ensemble par deux compresseurs fournissant chacun 1.000 m^3/h. Un premier essai, avec soufflage à l'air, a duré cinq jours.

Le tableau ci-dessous donne les résultats de cet essai :

Durée (heures)	Débits m^3/h		Composition					PCI
	air	gaz	CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	
31	1.000	1.140	9,8	11,6	12,6	2,9	63,1	923
30	1.800	2.100	11,5	13,7	11,9	2,2	62,7	913
15	900	850	14,5	7,5	10,8	0,9	66,3	584
10 ½	1.940	1.900	12,8	11,8	12,4	2,3	60,7	875
15 ½	870	1.060	16,4	3,6	8,3	1,8	69,9	487
7 ½	1.950	2.250	13,8	9,3	10,5	1,8	64,6	712
Total 107 ½	144.630	160.445	12,1	11,3	11,5	2,1	63,0	825

Le gaz sortait à 350° C environ et ne contenait pas d'oxygène.

On remarque nettement que le pouvoir calorifique diminue au fur et à mesure que les trous s'élargissent. Pour le relever, il faut augmenter le débit. Ceci confirme parfaitement les résultats du premier essai.

Le bilan matières, calculé comme ci-dessus, donne :

Eléments du bilan par Nm^3 de gaz					
Entrées	Combustible c = 0,322 kg Comburant a = 0,791 Nm^3 H_2O réduit h = Nm^3	Distillation 628 cal Gaz à l'air 284 cal Gaz à l'eau cal Combustion — 95 cal	PCI du gaz 817 cal 34,8 %	Chaleur sensible du gaz 120 cal 5,1 % (gaz sec)	Chaleur totale extraite 937 cal 39,9 %
Sorties	H_2O formé — h = 0,037 Nm^3 Imbrûlés k = 0,112 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,112 = 908 cal 38,6 %		Pertes au terrain 505 cal 21,5 %	Chaleur restée dans la mine 1.413 cal 60,1 %
Rendements	η_c = 55 % η_{th} = 56,5 %	Chaleur potentielle totale 1.725 cal 73,4 %		Chaleur sensible totale 625 cal 26,6 %	PCI du combustible 0,322 × 7.280 = 2.350 cal 100 %

La chaleur sensible du gaz sortant à 350°, compte non tenu des calories emportées par la vapeur d'eau contenue dans ce gaz, représentait 120 cal par m^3. Les pertes au terrain (y compris les calories emportées par la vapeur d'eau) s'établissaient donc à 500 cal par m^3 de gaz environ.

D'après le rapport comburant/gaz calculé, aux 160.500 m^3 de gaz recueillis devraient correspondre 127.000 m^3 d'air, au lieu des 144.630 m^3 mesurés effectivement. Les fuites représentent ici 17.600 m^3, soit 12 % environ du débit total.

En cinq jours on a consommé :

160.500 × 0,322 = 51.700 kg de charbon net, dont 55 % ou 28,4 tonnes environ ont été complètement gazéifiées et 45 % ou 23,5 tonnes cokéfiées.

La composition du gaz peut être interprétée comme suit :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Distillation	2,0	—	1,9	15,2	2,1	0,4	628
Gaz à l'air	10,1	—	9,4	—	—	55,6	284
Combustion de H_2 ...	—	—	—	— 3,7	—	7,0	— 95
Total	12,1	—	11,3	11,5	2,1	63,0	817

A cet essai à l'air a succédé un essai avec soufflage alternatif d'air et de vapeur à une cadence de 20 min dans le but de produire du gaz à l'eau.

Cet essai a duré 112 heures.

On a relevé les compositions suivantes :

		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
1 période	gaz à l'eau	25,8	0,1	14,0	44,5	5,8	11,8	2.080
	gaz à l'air	11,0	0,2	12,0	12,0	5,0	59,8	1.100
Moyenne de 2 périodes	gaz à l'eau	20,7	—	15,6	51,6	5,6	6,5	2.275
	gaz à l'air	17,1	—	4,9	11,3	0	66,7	438
Moyenne de 10 périodes	gaz à l'eau	21,9	0,6	15,0	50,1	5,4	7,0	2.200
Production globale	gaz à l'eau 22 %	23,8	—	14,1	44,5	5,8	11,8	2.075
	gaz à l'air 78 %	17,0	—	2,5	6,7	1,4	72,6	362
	mélange	18,5	—	4,9	15,0	2,3	59,3	730

La qualité du gaz obtenu pendant les phases de soufflage à l'air dépend évidemment de la durée de celles-ci et du refroidissement de la couche de combustible pendant la formation de gaz à l'eau.

Le bilan, établi d'après l'analyse du mélange global, se présente comme suit :

Eléments du bilan par Nm^3 de gaz					
Entrées	Combustible c = 0,217 kg Comburant a = 0,714 Nm^3 H_2O réduit h = 0,065 Nm^3	Distillation 430 cal Gaz à l'air 109 cal Gaz à l'eau 191 cal Combustion cal	PCI du gaz 730 cal 46,3 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = Nm^3 Imbrûlés k = 0,030 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,030 = 243 cal 15,3 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 82 % η_{th} = 54,7 %	Chaleur potentielle totale 973 cal 61,6 %		Chaleur sensible totale 607 cal 38,4 %	PCI du combustible 0,217 × 7.280 = 1.580 cal 100 %

Décomposition du gaz :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Distillation	1,8	—	0,5	8,5	2,3	0,3	430
Gaz à l'air	13,8	—	3,6	—	—	59,0	109
Gaz à l'eau	2,9	—	0,8	6,5	—	—	191
Total	18,5	—	4,9	15,0	2,3	59,3	730

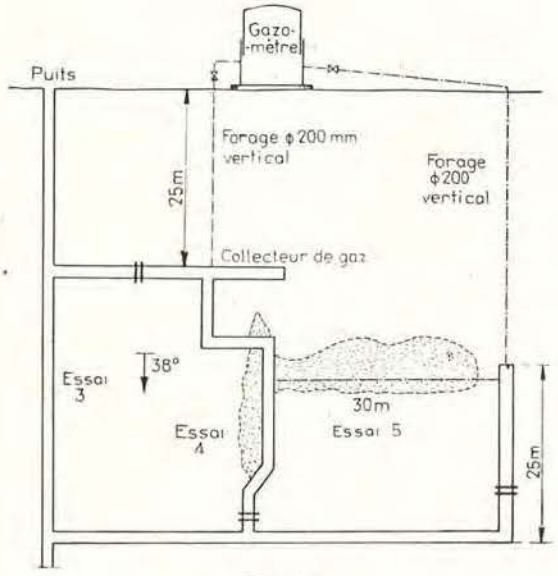

Fig. 13.

Après ces essais, on a ouvert le chantier et on a constaté que les trous s'étaient élargis jusqu'à atteindre à 4 mètres de l'entrée un diamètre de 1 m 50. Ce vide était entouré d'une zone de 26 à 27 cm de charbon partiellement cokéfié et brûlé.

5) *Essai n° 5.*

Ce nouvel essai fut fait au moyen d'un sondage horizontal de 30 mètres avec 100 mm de diamètre, relié à la surface par les anciens travaux ayant servi aux essais précédents et deux sondages verticaux de 200 mm de diamètre. Ce trou horizontal pouvait jouer le rôle du montage de départ d'une taille montante; cet essai peut donc être considéré comme un compromis entre la méthode « par trous » et celle du courant (fig. 13).

On a obtenu les résultats suivants :

	Comburant	Gaz	CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Soufflage à l'air	2.000 m³/h d'air	2.400 m³/h	11,5 9,5	12,0 17,5	14,0 14,0	2,5 0,5	60,0 58,5	940 953
Soufflage mixte alternatif	2.000 m³/h d'air	2.350 m³/h	15,0	5,0	8,0	—	72,0	554
	1.300 m³/h vapeur	600 m³/h	13,7	21,7	42,6	5,7	18,3	2.100
Sans soufflage	0		22,8	14,0	53,0	7,5	2,7	2.425

On a constaté, après l'extinction du chantier, que le trou s'était élargi jusqu'à atteindre 5 m 35 dans sa plus grande largeur. Une zone de coke de 40 cm d'épaisseur séparait le charbon vierge de l'espace brûlé, colmaté en partie par le toit partiellement fondu (fig. 14).

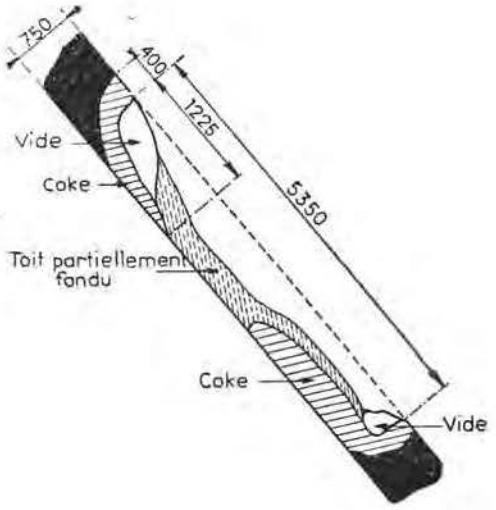

Fig. 14.

On a pu se rendre compte que le feu avait tendance à attaquer de préférence la partie supérieure de la couche, de sorte que le massif non brûlé se termine en biseau. Deux chenaux étroits étaient restés ouverts, le long de la surface du coke, assurant un bon contact entre comburant et combustible.

6) *Méthode du courant.*

D'autres essais ont été effectués depuis à Lissitchansk sur la couche K 8, par la méthode du courant. Les terrains étant ici assez compacts (toit de calcaire compact, mur de schiste sableux), on n'a pas éprouvé de difficultés pour empêcher les éboulements dans les sondages. Par contre, le foudroyage derrière la zone de feu se fait difficilement. Aussi le canal s'élargit d'une façon exagérée, ce qui est défavorable au contact du courant gazeux avec le charbon.

Une partie de l'air ne réagit pas et brûle le gaz en aval. C'est ainsi que, après un fonctionnement initial excellent, le pouvoir calorifique tombe progressivement à 1.000 cal/m³, malgré l'emploi d'un comburant à 50-60 % de O_2. Il a fallu miner dans le toit pour réaliser un foudroyage artificiel.

En 1941, on avait établi dans la couche K 8 (deux lies totalisant 1 m 68 de puissance) deux panneaux indépendants pour l'application de la méthode du courant. Chaque panneau était délimité par une galerie à 135 mètres de profondeur et trois descenderies parallèles en couche tracées à 115 mètres d'intervalle et reliées à la surface par des sondages verticaux. Ces conduits étaient renforcés par des tubes métalliques perforés (700 mm en couche, 800 mm dans les sondages verticaux). Les perforations étaient munies de couvercles ouvrant vers l'extérieur. L'espace entre les tubes et le terrain avait été colmaté avec de l'argile.

L'installation est alimentée en O_2 à 97 % (5 kg/cm²) et en vapeur surchauffée. Elle est équipée de systèmes de commande à distance, d'analyseurs et de calorimètres automatiques, etc... Le gaz produit, refroidi, purifié et dépoussiéré est destiné à l'alimentation des chaudières et à la distribution dans les villes. De février à septembre 1941, 40.000.000 m³ de gaz ont été fournis à l'usine de Donsoda, puis au Lis-chim-Combinat. Le fonctionnement de la station a été interrompu par la guerre, mais on compte la remettre en service et développer ses installations de production d'oxygène.

D. — Station de Gorlovka.

On dispose à Gorlovka d'un faisceau de couches redressées de l'assise C^5_2, formant le flanc sud de l'anticlinal de Donetz. Elles affleurent sur une largeur de 1.250 mètres, sous une couverture de quelques mètres de limons quaternaires.

Le pendage, de 70 à 75° à l'affleurement, diminue avec la profondeur jusqu'à 65° à 100 mètres sous le niveau du sol, de sorte qu'il est impossible de suivre la couche avec des sondages rectilignes.

Le terrain houiller est fortement altéré jusqu'à 40 mètres de profondeur.

Le gisement est attaqué en dessous du niveau de 275 mètres par des exploitations souterraines au-dessus desquelles un stot de protection de 65 mètres doit être ménagé.

Les couches à prendre en considération pour une gazéification souterraine entre les niveaux de 40 et de 210 mètres sont les veines Dérézovka (1 m 80), Zolotarka (0 m 75) et Boukharoff (1 mètre), séparées les unes des autres par des

stampes schisteuses de 8 mètres et 100 mètres respectivement.

D'autres couches sont encore disponibles à plus grande distance : la couche 13/14 de 4 m 50 et la couche Smolaminoff de 3 m 60 de puissance.

La couche Dérézovka, qui a servi aux premiers essais, est salie par de nombreuses bandes stériles. Sur une ouverture totale de 1 m 80 à 1 m 90, le charbon pur ne représente que 1 m 50.

Le charbon a comme composition :

Couche	PCS	H_2O	Cendres	MV	C	H	O	N	S	PCI calc.
	Tout venant		Sec	Charbon net						
Dérézovka	5.988	1.0	29,6	18,5	85,0	4.0	3,9	2,4	4,7	7.870
Zolotarka	6.170	1.6	26,2	20,3	83,6	5,1	7,2	1,6	2,5	7.940

Remarque : Les pouvoirs calorifiques indiqués pour le charbon tout venant sont trop élevés si on les compare à la composition chimique du combustible. Nous avons pris la valeur du PCI du charbon net, calculée à partir de l'analyse élémentaire.

Les épontes consistent en schistes argileux ou argilo-sableux.

Par suite de la présence d'une usine d'engrais synthétiques à proximité du chantier, on dispose d'une source d'oxygène bon marché. Il y a également une cokerie fournissant un débouché pour le gaz pauvre produit, utilisé pour la chauffe des fours à coke.

1) *Premiers essais (échelle expérimentale).*

La méthode de gazéification par courant fut imaginée en 1934 par Skafa, Matveev et Filippov, à l'Institut de Chimie du charbon du Donetz, et fut appliquée à Gorlovka dès 1935.

Un premier panneau de 7.000 t fut préparé dans la couche Dérézovka. Il était délimité par une galerie horizontale à 110 mètres de profondeur, reliée à la surface par cinq puits inclinés, espacés de 25 mètres (fig. 15).

La partie à gazéifier était comprise entre la galerie de base, les trois puits centraux et le niveau de 40 mètres, de façon à laisser un stot de protection de 40 mètres entre la surface et la zone de feu.

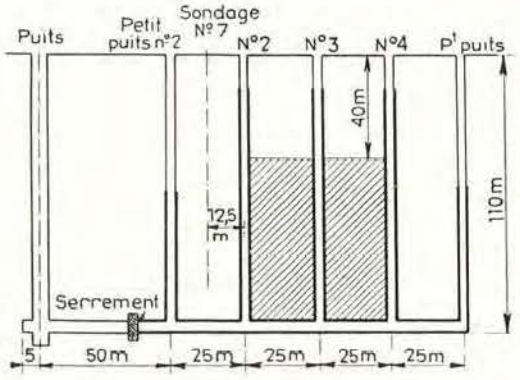

Fig. 15.

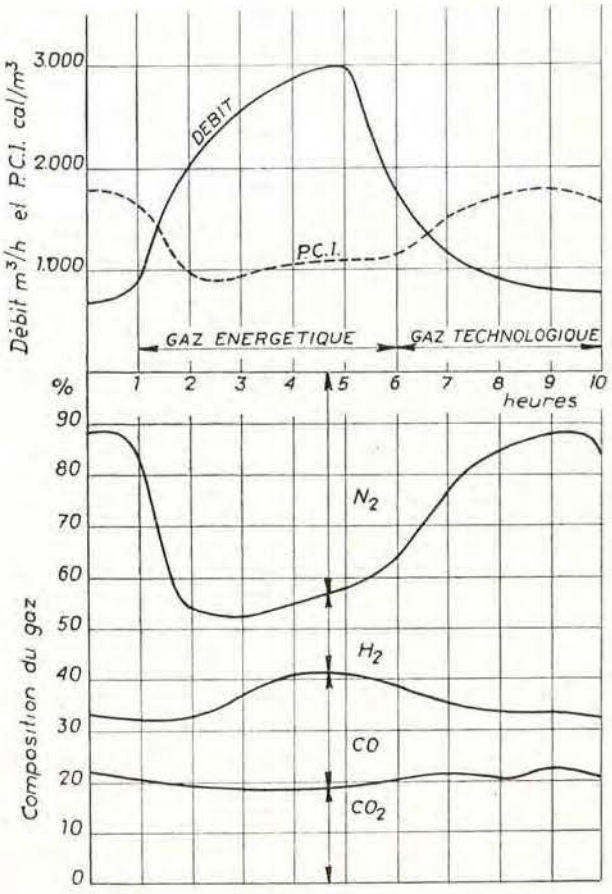

Fig. 16.

Ce panneau a débité du gaz régulièrement pendant dix-huit mois à partir du 5 février 1935, sauf une interruption de trois mois, nécessitée par des travaux.

Le comburant était soufflé dans la mine par deux compresseurs pouvant livrer sous 6 atmosphères 3.500 m³/h d'air, produisant 4.000 à 5.500 m³/h de gaz. Avec un comburant à 40 % de O_2, le débit de gaz variait entre 5.500 et 7.000 m³/h. On a ainsi produit, de février à mai, deux millions de m³ de gaz.

Différents régimes ont été réalisés. En faisant varier le degré de suroxygénation de l'air, on a obtenu :

% O comburant	Gaz % CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI kcal/Nm³	Gaz sans azote CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4
21	8	0,2	12	14	2,5	63,3	937	21,8	0,5	32,7	38,2	6,8
30	12	0,2	20	19	5,5	45,3	1.591	21,9	0,4	36,5	34,7	6,7
50	15	0,2	25	25	8,0	28,8	2.031	21,1	0,3	35,1	32,3	11,2
70	20	0,2	28	30	10,0	11,8	2.472	22,7	0,2	31,8	34,0	11,3

Le fonctionnement optimum correspondrait à 27-30 % de O_2 dans le comburant, avec une pression de soufflage de 3,5 atm.

Les pourcentages calculés sans tenir compte de l'azote semblent indiquer que celui-ci ne fait que diluer les gaz produits, sans exercer d'influence sensible sur les réactions, mais cette conclusion est contradictoire avec d'autres essais.

A la suite d'un arrêt accidentel, on découvrit que, si on arrête brusquement le soufflage, il se dégage de la mine un gaz riche en hydrogène (40 à 50 %) et pauvre en azote (15 %). En interrompant périodiquement le soufflage (périodes de 4 à 6 heures), on réussit ainsi à produire alternativement du gaz pauvre, ou gaz énergétique, à 1.000 kcal/m³ environ, utilisable dans les centrales, et du gaz riche, ou gaz technologique, à 2.000 cal/m³, destiné aux industries chimiques de synthèse. On obtient de 66 à 80 % de gaz pauvre et de 20 à 33 % de gaz riche (voir graphiques), soit par exemple 25.000 m³ de gaz pauvre et 12.500 m³ de gaz riche par jour (fig. 16).

On trouvera dans le tableau ci-dessous quelques compositions caractéristiques pour le gaz produit :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI	PCS
Gaz technol. produit après soufflage à l'air	20,3	—	11,7	44,7	—	23,3	1.400	1.610
Gaz technol. produit après soufflage à 37 % de O_2	18,0	—	15,0	49,0	4,0	14,0	2.055	2.325
Gaz énergét. produit avec soufflage à 37 % de O_2	18,0	—	15,0	20,0	3,0	44,0	1.225	1.350
Gaz technol. après soufflage à 25-48 % de O_2	17-25	0,2	11-19	45-55	3,0	5-13	2.150	2.450
Gaz énergétique avec soufflage à 25-48 % de O_2	16-24	0,2	16-22	13-18	2,2	32-50	1.150	1.250

Voici les compositions moyennes du gaz énergétique obtenu de juin à septembre 1935 :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Juin	14,35	0,19	15,85	18,6	4,3	46,71	1.326
Juillet	19,0	0,18	18,1	17,6	2,71	42,41	1.225
Août	18,3	0,18	17,1	15,85	2,57	46,0	1.146
Septembre	18,81	0,17	15,51	16,78	2,48	46,8	1.115

et le détail, pour le mois de juillet, de la production en gaz pauvre et en gaz riche :

	Comburant m³	% O_2	Gaz m³	%	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Gaz pauvre	806.260	40,6	1.005.500	79,5	19,0	0,2	18,1	17,6	2,7	42,4	1.225
Gaz riche	—	—	260.000	20,5	21,3	0,2	12,5	46,8	5,8	15,4	1.915
Mélange	806.260	40,6	1.265.500	100,0	19,4	0,2	17,0	23,5	2,9	37,0	1.370

Les teneurs en oxygène du comburant ont varié de 21 à 60 %, avec un débit de 2.000 à 4.000 m³/h.

Le bilan, établi à partir de la composition du mélange gaz riche + gaz pauvre, donne :

Eléments du bilan par Nm^3 de gaz					
Entrées	Combustible c = 0,570 kg Comburant a = 0.606 Nm^3 H_2O réduit h = 0,038 Nm^3	Distillation 784 cal Gaz à l'air 450 cal Gaz à l'eau 136 cal Combustion — cal	PCI du gaz 1.370 cal 30,5 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = Nm^3 Imbrûlés k = 0,275 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,275 = 2.225 cal 49,5 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 43,3 % η_{th} = 60 %	Chaleur potentielle totale 3.595 cal 80 %		Chaleur sensible totale 895 cal 20 %	PCI du combustible 0,570 × 7.870 = 4.490 cal 100 %

Le gaz peut être représenté par le résultat de trois phénomènes :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Distillation	1,1	—	1,0	19,7	2,9	1,1	784
Gaz à l'air	17,0	—	14,8	—	—	35,9	450
Gaz à l'eau	1,3	0,2	1,2	3,8	—	—	136
Total	19,4	0,2	17,0	23,5	2,9	37,0	1.370

Le pouvoir calorifique se répartit donc comme suit :

Gaz de distillation	57 %	Gaz technologique	28,5 %
Gaz à l'air	33 %	Gaz énergétique	71,5 %
Gaz à l'eau	10 %		
Mélange	100 %	Mélange	100 %

A la consommation de 806.260 m^3 de comburant devrait correspondre une production de gaz de :

$$\frac{806.260}{0,606} = 1.330.000 \text{ m}^3.$$

Il y a donc eu 64.500 m^3 de fuites, soit moins de 5 %, malgré les hautes pressions employées.

La consommation de charbon s'élève, pour le mois de juillet, à 1.330.000 × 0,570 = 760 tonnes de charbon net, dont 327 ont été intégralement gazéifiées et 433 cokéfiées. Ceci correspond, avec une teneur en cendres de 29,6 %, à 1.080 tonnes de charbon en place, avec un avancement de 8 m sur un front de 50 mètres. On a gazéifié intégralement 6 kg de charbon net par heure et par mètre carré de surface exposée au feu. Ceci est un chiffre moyen, correspondant à un soufflage de 1.100 m^3/h à 40 % de O_2. Avec les débits de 3.500 m^3/h réalisés pendant certaines périodes avec épuisement total de l'oxygène du comburant, la gazéification du charbon devait atteindre 19 kg/m^2-h.

2) *Travaux à échelle industrielle.*

Les résultats acquis lors des essais ci-dessus au panneau 1 (et probablement lors d'essais subséquents dans les panneaux 2 et 3 non décrits) permirent d'envisager, dès 1937, des essais à grande échelle dans les couches Zolotarka (panneau 4) et Dérézovka (panneaux 5 et 6).

La disposition des installations resta à peu près la même. La tranche de charbon utilisée était toujours prise entre les niveaux 40 et 110 mètres.

Panneau 4 (fig. 17).

Le panneau était limité en bas par la galerie de feu horizontale, d'où partaient vers le haut les deux montages inclinés 1 et 3. Les montages n'étaient pas tubés. Leur extrémité était reliée à la surface par des sondages verticaux de 40 mètres revêtus d'un tubage en acier de 250 ou 280 mm de diamètre. L'extrémité inférieure de ce tubage était libre afin de permettre le libre jeu des dilatations thermiques.

Un montage supplémentaire (2) revêtu d'un tubage perforé, était prévu comme réserve en cas d'éboulement du retour du gaz (3) et permettrait

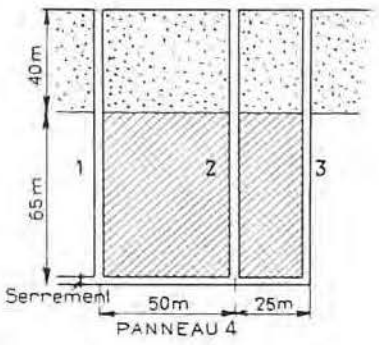

Fig. 17.

éventuellement de modifier la longueur du front de feu.

Le chantier était fermé par un serrement de briques et d'argile, équipé d'un tuyau de purge. Les gaz sortants étaient refroidis à 130-150° par une injection d'eau dans le montage de retour des gaz, à 20 ou 30 mètres au-dessus de la taille de feu.

Panneaux 5 et 6 (fig. 18).

Ces deux panneaux, pris dans la courbe Dérézovka, étaient séparés par un stot de protection de 40 mètres. Chacun d'eux était divisé en deux tailles de 50 mètres par un sondage central. Chaque panneau mesurait ainsi 60 mètres de hauteur sur 100 mètres de largeur et contenait 1.200 tonnes de charbon. Les sondages en couche étaient tubés en tuyaux perforés de 300 mm de diamètre. Les sondages verticaux de 40 mètres aboutissant à l'extrémité des précédents étaient revêtus de tuyaux d'acier de 400 mm de diamètre. La liberté de dilatation était réalisée par des joints télescopiques à bourrage d'amiante.

Les conduites de surface, en tôle soudée, étaient reliées aux sondages par des sas et des systèmes de vannes permettant l'inversion du sens du soufflage, tout en évitant un mélange du gaz et du comburant pendant les manœuvres. Les conduites d'air, de vapeur et d'eau étaient enterrées (calorifugeage) tandis que celle de gaz était portée par des massifs de maçonnerie de 0,50 m.

L'installation se complétait de deux compresseurs débitant 1.200 m³/h sous 2,5 atm et d'un générateur de O_2 produisant 25 à 30 m³/h, de chaudières à vapeur (300°, 5-6 atm) et de réfrigérants pour les gaz.

Avant l'allumage, on purgea chaque chantier en y envoyant un courant d'air (1.800 m³/h) pour en chasser le CH_4 et le CO_2, puis on le remplit d'oxygène (60-90 %) et on le mit en pression pour faciliter l'allumage.

Nous n'avons pas d'indications sur le fonctionnement du panneau 4.

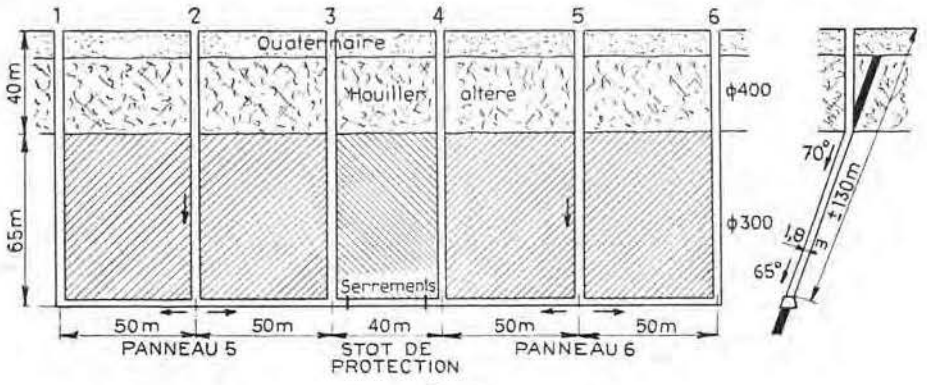

Fig. 18.

Le panneau 5 fut rempli d'oxygène sous 0,4 atm, le 1ᵉʳ décembre 1937, puis mis à feu au moyen d'un mélange de 65 % de soufre et 35 % de $KClO_3$, entouré de papier, de poudre, de pétrole et placé dans un bûcher en bois.

Avant l'allumage, on avait déjà constaté un pourcentage de 6 % de CO_2 dû à l'oxydation à basse température du charbon dans une atmosphère à 80 % d'oxygène.

Au moment de l'allumage, on a envoyé dans le circuit formé par les sondages 3 (soufflage) et 1 (sortie des gaz) un débit de 650 m³/ h porté bientôt à 1.700 m³/ h (pression portée à 0,7 atm).

Pendant 9 heures, on réalisa une simple combustion destinée à réchauffer le panneau (20 % de CO_2). La gazéification proprement dite commença ensuite avec production d'un gaz contenant principalement du CO et du H_2 (dans une proportion dépendant de la quantité d'oxygène injectée). A partir de ce moment le trou 2 fut mis en service, servant de retour des gaz en parallèle avec le n° 1.

Contrairement aux essais de 1935, le soufflage fut continu, sans alternances de repos et de soufflage.

Piézométrie du chantier.

Après six semaines de fonctionnement, la résistance du panneau 5 (soufflage par le sondage 3, sortie des gaz par le sondage 2) s'établissait entre 2 et 2,5 atm pour un débit de 1.700 m³/h, le circuit comprenant environ 200 mètres de sondages et 50 mètres de « taille de feu ».

A plusieurs reprises, on constata des variations soudaines et importantes de la résistance du panneau au courant gazeux, pouvant même provoquer

la chute du débit à zéro. Le pouvoir calorifique du gaz semblait d'ailleurs augmenter avec la résistance du chantier.

Ces irrégularités pouvaient être attribuées, soit au bouchage des sondages d'entrée et de sortie, soit à des éboulements dans la taille.

Dans le premier cas (effectivement constaté au sondage n° 1), l'interruption brusque du soufflage par suite de la fermeture d'un sondage produisait des effets analogues à ceux que l'on avait constatés au panneau 1 lors de l'élaboration de « gaz technologique » : dégagement de gaz à l'eau et de distillation. A la reprise du soufflage, le PC tombait brusquement, par suite du refroidissement de la mine et de la combustion des gaz de distillation dans l'air frais.

Dans le second cas, les éboulements dans la taille avaient pour effet d'améliorer le contact entre comburant et combustible. Dans ce cas, la résistance du circuit, après être montée rapidement, diminuait peu à peu à mesure que le bouchon brûlait.

Par suite du volume de la mine et de l'importance des fuites (15 %), le chantier opposait une certaine inertie aux variations de pression. Le serrage d'une vanne sur la sortie des gaz n'influençait la pression entrée qu'après un certain intervalle de temps (de l'ordre d'une demi-heure).

Voici les compositions de gaz relevées lors de certaines obstructions du chantier, montrant clairement leur effet sur le pouvoir calorifique du gaz obtenu.

		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
14-2	9 h : avant	7,0	0,2	19,3	14,0	1,4	58,1	1.065
	13 h : après	10,6	0,2	18,6	28,2	2,8	39,6	1.530
18-2	2 h : avant	8,3	0,2	19,0	11,5	2,1	58,9	1.050
	4 h : après	14,2	0,2	24,8	32,8	3,6	24,4	1.900
27-2	11 h : avant	9,4	0,2	17,2	12,6	1,4	59,2	965
	13 h : après	12,6	0,2	14,0	21,2	2,8	49,2	1.200

Les bouchages complets ont causé parfois des explosions dans les sondages d'entrée d'air où les gaz du chantier refluaient.

Bilan.

Un essai effectué au panneau 5 avec un comburant à 38,8 % de O_2 a donné un gaz de composition :

CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
17,0	0,2	19,3	27,5	3,0	33,0	1.547

Le bilan calculé à partir de ces chiffres donne :

Éléments du bilan par Nm^3 de gaz						
Entrées	Combustible c = 0,517 kg Comburant a = 0,523 Nm^3 H_2O réduit h = 0,103 Nm^3	Distillation 730 cal Gaz à l'air 440 cal Gaz à l'eau 377 cal Combustion — cal	PCI du gaz 1547 cal 38 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = Nm^3 Imbrûlés k = 0,230 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,230 = 1.860 cal 45,6 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 48 % η_{th} = 70 %	Chaleur potentielle totale 3.407 cal 83,6 %		Chaleur sensible totale 663 cal 16,4 %	PCI du combustible 0,517 × 7.870 = 4.070 cal 100 %

En décomposant le gaz en gaz de distillation, gaz à l'air et gaz à l'eau, on obtient :

	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI	% vol	% cal
Distillation	0,9	—	1,0	17,2	3,0	1,0	730	23,1	47,2
Gaz à l'air	12,8	0,2	14,6	—	—	52,0	440	59,6	28,4
Gaz à l'eau	3,3	—	3,7	10,3	—	—	377	17,3	24,4
Total	17,0	0,2	19,3	27,5	3,0	33,0	1.547	100,0	100,0

On voit quel rôle ont joué la distillation et l'humidité de gisement dans cet exemple, caractérisé par un bon rendement.

Les résultats globaux du fonctionnement de ce panneau seront donnés avec ceux du panneau 6.

Le panneau 6, de disposition identique à celle du panneau 5, était alimenté par deux compresseurs volumogènes (à piston), l'un pour l'air, l'autre pour l'oxygène, capables de réaliser un débit de 12.500 m^3/h d'air à 24-27 % d'oxygène sous une pression de 2 à 2,4 atm.

Il fut mis à feu sous débit réduit, le 1er février 1938, et les compresseurs démarrèrent le 2, à 2 h, fournissant leur débit maximum de 12.500 m^3/h à 24-27 % de O_2 au sondage n° 5. Ce débit se répartissait entre les deux tailles à raison de 3.750 m^3/h dans la taille ouest (sondage 4) et 8.750 m^3/h dans la taille est (sondage 6).

Dès cette première journée, la marche fut interrompue par divers incidents. A 17 heures, par suite de l'étranglement de la taille, le débit total passant sous la pression maximum de 2,5...2,5 atm était tombé à 7.000-8.500 m^3/h. Le PC se maintenait à 1.100-1.200 cal/m^3.

Le 4 février, après un nouvel arrêt, le débit se stabilisa définitivement à 4.000...4.500 m^3/h. Le pouvoir calorifique du gaz, fonction de la teneur en oxygène du comburant (de 21 à 25 %), variait entre 1.000 et 1.300 cal/m^3.

Le 10 février, après une explosion au sondage n° 5 (entrée d'air), on mit hors service la taille est, le circuit se réduisant ainsi aux sondages n° 5 (entrée d'air) et n° 4 (sortie des gaz) reliés par la taille ouest.

Ce régime fut maintenu pendant deux mois produisant d'une façon régulière un gaz à 1.000-1.300 cal/m^3, malgré une douzaine d'arrêts dus pour la plupart à des pannes de courant où à des avaries aux compresseurs. Ces arrêts, qui duraient ordinairement quelques heures, permirent de faire les mêmes constatations qu'au panneau 5. A une production régulière de gaz à 1.100 cal succède, lors de l'arrêt, une bouffée de gaz riche à 1.500...1.900 cal, mais le pouvoir calorifique tombe à 700 cal au moment où le soufflage recommence, pour reprendre peu à peu sa valeur de régime.

Deux explosions se produisirent au sondage 5, qui servait d'entrée d'air, immobilisant l'installation le 9 février (33 heures) et le 10 mars (3 jours). Pendant le mois de mars, on n'injecta pratiquement plus d'oxygène. Le pouvoir calorifique du gaz tomba à 800-900 cal/m^3.

Le 28 mars, le sondage n° 4 servant de sortie au gaz s'étant bouché, on arrêta l'expérience.

Conclusions des essais sur le panneau 6.

1) Ici encore, malgré le dimensionnement du panneau, prévu pour permettre un débit de 12.000 m^3/h sous 2,5 atm, la résistance du circuit augmenta rapidement et le débit se stabilisa vers 4.500 m^3/h après deux jours de marche. Ce phénomène d'étranglement progressif suivi de l'établissement d'un régime semble donc bien général. Ici, l'orifice équivalent s'établit à 0,4 dm^2, tandis qu'au panneau 5 il n'était que de 0,15 dm^2.

2) Si l'on veut caractériser l'activité de la surface exposée du combustible au point de vue gazéification, on est amené à remplacer la surface réelle impossible à déterminer par une « surface équivalente » représentée par le produit de la longueur du front de feu par la puissance « nette » de la couche. Dans le cas actuel, la puissance de la couche, en excluant les bancs stériles, vaut 1 m 50, ce qui donne une surface équivalente :

$$50 \times 1{,}50 = 75 \text{ m}^2.$$

Si l'on prend les résultats globaux du panneau 6 au mois de février 1938, on aboutit à une consommation moyenne de 20 kg de charbon net par m^2 et par heure, dont 10,4 kg. ont été intégralement gazéifiés, avec un débit d'air moyen de 3.600 m^3/h. Au panneau 1, on avait réalisé des chiffres variant de 6 à 20 kg/m^2-h.

A une température déterminée, il doit exister une valeur limite pour la quantité de charbon pouvant entrer en réaction en 1 heure sur 1 mètre carré de surface équivalente. Cette limite ne semble pas atteinte ici, et on aurait avantage à augmenter le débit de soufflage.

* * *

Pendant les mois de février-mars 1938, la production des panneaux 5 et 6 fut dirigée vers une cokerie voisine. Le tableau ci-contre résume les résultats obtenus (Tableau II).

On n'a plus fait usage, pendant les essais postérieurs à 1936, de la méthode par alternances. Par contre, on a fait des essais avec des mélanges d'air suroxygéné et de vapeur injectés d'une façon continue, donnant du gaz à 2.600 cal/m^3 pouvant être amélioré à 3.000 cal par absorption de CO_2.

On a réalisé des productions stables de gaz, les principales difficultés provenant des éboulements ou de la formation de foyers parasites dans les sondages.

En 1939, on mit en service les panneaux 7 et 8 établis suivant le même schéma, mais longs de 175 m chacun, et descendant jusqu'à une profondeur de 260 m. On espérait réaliser un débit de 20.000 à 30.000 m^3/h pour les deux panneaux réunis (fig. 19).

TABLEAU II

		Panneau 5				Panneau 6		Livré à la cokerie (*)	
		Décembre 37	Janvier 38	Février	Mars	Février	Mars	Février	Mars
Soufflage	Nm^3	1.135.000	1.222.500	491.000	920.000	2.592.000	2.534.000	—	—
	% O_2	30,22	25,80	24,6	32,7	22,6	21,0	—	—
H_2O décomposé Nm^3		14.700	102.000	2.400	62.200	69.200	165.000	—	—
Charbon (en t)	Gazéifié	280	270	66	168	560	490	—	—
	Cokéfié	440	134	77	52	530	210	—	—
	Total	720	404	143	220	1.090	700	—	—
Gaz	Nm^3	1.337.000	1.335.000	398.000	733.000	3.145.000	2.960.000	1.910.000	1.166.000
	CO_2	13,0	13,8	17,3	19,1	10,8	13,7	10,7	14,8
	O_2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	CO	17,5	16,2	6,8	15,3	15,5	11,1	16,3	12,6
	H_2	19,3	17,0	12,1	17,7	13,7	13,0	13,8	14,2
	CH_4	3,0	2,1	2,3	2,1	2,0	1,6	1,9	1,6
	N_2	47,0	50,7	61,2	45,6	57,8	60,4	57,1	56,6
	PCI	1.280	1.107	713	1.095	992	807	1.010	885
Volume	Distillation ..... %	24,5	13,1	15,6	12,9	15,5	10,3	—	—
	Gaz à l'air ..... %	75,9	74,0	83,4	73,1	80,7	80,5	—	—
	Gaz à l'eau ..... %	1,8	12,9	1,0	14,0	3,8	9,2	—	—
Calories	Distillation ..... %	59,3	39,7	70,5	39,3	49,5	41,7	—	—
	Gaz à l'air ..... %	37,6	34,7	27,0	34,1	42,0	34,3	—	—
	Gaz à l'eau ..... %	3,1	25,6	2,5	26,6	8,5	24,0	—	—
Rendement carbone		38,2 %	67 %	46	76,5	51,5	70,0	—	—
Rendement thermique		64 %	65,5 %	48,6	58,5	63,5	59,0	—	—

(*) Arrêts dans la fourniture :

9-2-38 : 100 heures — Explosion au sondage 5 (panneau 6);
24-2-38 : 15 heures — Explosion au sondage 2 (panneau 5);
6-3-38 : 380 heures — Avarie à la cokerie;
29-3-38 : 72 heures — Bouchage du sondage 4 (panneau 6).

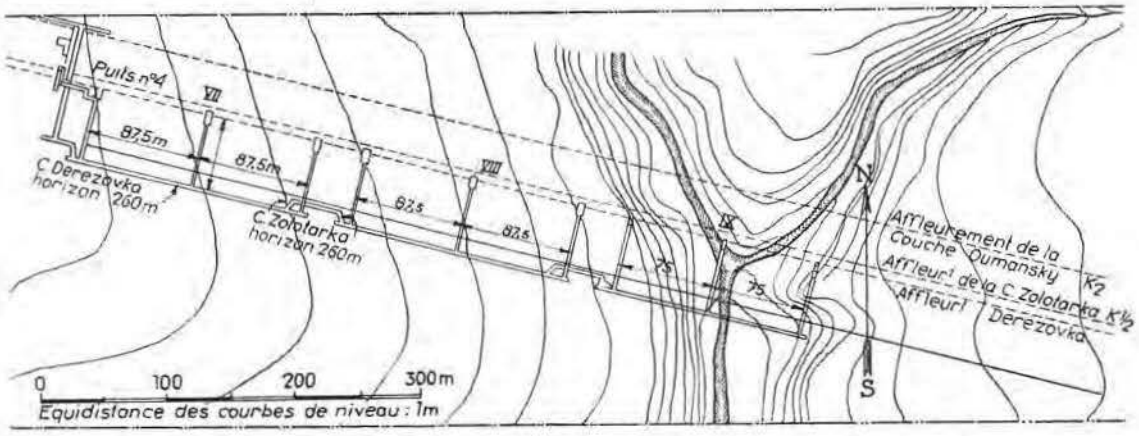

Fig. 19.

A cette époque, un générateur de O_2 de 140 m³/h à 97 % était en projet, mais sa construction a été interrompue par la guerre.

L'installation de Gorlovka resta en service jusqu'au moment de l'invasion allemande. Elle avait à ce moment produit 75 millions de m³ de gaz à 930 calories. Elle fut rétablie, du moins partiellement, après la guerre.

E. — **Station de Leninsk** (Kuznetzk).

La station de Leninsk, dans le Kuznetzk (Sibérie), servit dès 1934 à des essais de gazéification souterraine. Le charbon qui s'y trouve à faible profondeur et en couches épaisses est une houille à longue flamme, à 45 % de matières volatiles, sujette à combustion spontanée : ces deux caractéristiques permettent de prévoir un allumage et un entretien de la combustion faciles dans le chantier de gazéification, et un enrichissement probable du gaz par d'abondants produits de distillation.

Pendant le deuxième semestre de 1934, on tenta par la méthode du courant la gazéification d'un premier panneau massif de 20 m × 6,50 m, pris dans la couche Zhurinsk (5 m de puissance) et contenant 1.000 t de charbon à 45 % de matières volatiles. Ce panneau était entouré sur trois côtés par d'anciennes exploitations souterraines et sur le quatrième par une exploitation par découverte remblayée. Il était relié à la surface par deux puits (nos 1 et 2 sur le plan) (fig. 20). La pression de soufflage était fournie par un ventilateur de 3.000 m³/h. Un simple tuyau servait pour le captage du gaz formé. L'équipement de mesure était rudimentaire.

Le panneau fut mis à feu le 3-6-34 au moyen de trois bûchers placés dans des niches creusées dans la couche. L'inflammation se propagea lentement, le débit de 1.700 à 3.000 m³/h étant insuffisant pour la forte puissance de la couche. Le gaz (2.200 à 3.100 m³/h) contenait beaucoup de CO_2, mais s'améliorait d'une façon irrégulière. Des venues d'eau dans le chantier empêchèrent la température de monter très haut, ce qui explique la faible teneur en CO et les fortes quantités de CO_2 et de gaz de distillation constatées.

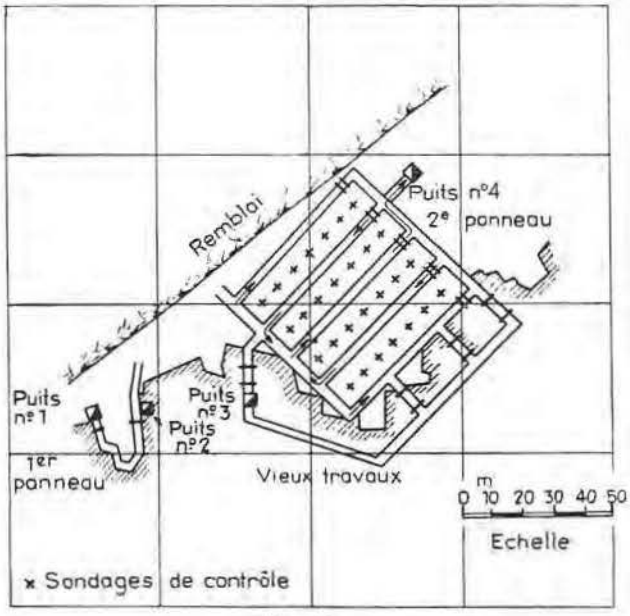

Fig. 20.

En arrêtant le soufflage et en aspirant au moyen d'un exhauseur, on obtient jusqu'à 1.000 m³/h de gaz technologique :

CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
25	0,2	6	30-45	5-8	17-33	1.500-2.200

Le 2 juillet, après la combustion de 200 t environ, un éboulement se produisit, obstruant la taille. L'essai se poursuivit néanmoins et fournit de grandes quantités de gaz de distillation.

Au début d'août, un régime s'était établi :

	CO_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
16/22-8	10-15	5-10	10-55	13-35	40-10	2.300-4.316

Dates : Août 1934		16	17	18	20	21	22	Moy.
Pouv. calorifiques en cal/Nm^3	de	2.330	2.215	2.335	2.970	2.155	2.155	2.300
	à	4.110	4.650	3.750	4.640	5.050	3.695	4.316

Les analyses étaient fort variables d'après les points de prélèvement, le gaz prélevé dans des trous de sonde atteignant directement le chantier étant en général meilleur que celui que l'on recueillait à la sortie.

Le chantier resta en activité pendant six mois, jusqu'à l'épuisement du panneau. Malgré la qualité du gaz obtenu, les résultats de l'essai sont plutôt négatifs au point de vue de la gazéification puisque l'on a à peu près uniquement recueilli des produits de distillation, tandis que 85 % du coke restaient dans le sol. On a cependant démontré la possibilité d'obtenir du gaz sans fragmentation préliminaire du charbon.

Un second panneau beaucoup plus vaste (60 m × 60 m) fut mis à feu fin avril 1935. Il était divisé par des galeries voûtées en quatre tranches de 58 × 9 m, dont les deux médianes formaient le panneau à gazéifier proprement dit. Vingt-huit trous de sonde, disposés régulièrement, permettaient de faire des prises de gaz (fig. 20).

Deux ventilateurs soufflaient dans des collecteurs aboutissant aux côtés extérieurs du carré. Dès l'allumage, des gaz combustibles de composition très variable se dégagèrent. Il fallut attendre un mois pour voir le régime se stabiliser. A partir de ce moment (début juin), le réglage s'avèra aisé. Les moyens de soufflage disponibles ne permirent malheureusement pas de dépasser le débit de 4.000 m^3/h, insuffisant pour une telle ouverture de couche :

Dates	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
6-6	12,6	0,8	9,8	9,7	5,8	61,3	1.049
7-6	15,0	0,6	9,8	14,2	5,1	55,3	1.099
8-6	14,3	1,0	8,2	10,5	6,0	60,0	1.020
9-6	13,2	0,8	7,6	11,4	4,4	62,6	900
10-6	13,2	1,2	6,9	12,3	5,1	61,3	1.000
11-6	13,4	1,4	9,2	9,3	5,3	61,4	972
Moyenne	13,6	1,0	8,6	11,2	5,3	60,3	1.000

Le bilan, établi à partir de cette composition moyenne, donne :

Eléments du bilan par Nm^3 de gaz						
Entrées	Combustible c = 0,322 kg Comburant a = 0,756 Nm^3 H_2O réduit h = 0,005 Nm^3	Distillation 765 cal Gaz à l'air 215 cal Gaz à l'eau 20 cal Combustion — cal	PCI du gaz 1.000 cal 40,6 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = Nm^3 Imbrûlés k = 0,108 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,108 = 875 cal 35,6 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 57,6 % η_{th} = 63 %	Chaleur potentielle totale 1.875 cal 76,2 %		Chaleur sensible totale 585 cal 23,8 %	PCI du combustible 0,322 × 7.630 = 2.460 cal 100 %

Le pouvoir calorifique du gaz (1.000 cal/m³) peut être attribué pour 76,5 % à la distillation, 21,5 % au gaz à l'air et 2 % au gaz à l'eau.

Au cours d'une seconde période de soufflage, on aurait obtenu les résultats suivants :

Débits m³/h		CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	PCI
Air	Gaz							
1.700	2.000	12,6	0,3	11,3	15,4	4,0	56,4	1.096
2.000	2.500	12,4	0,2	12,0	16,5	4,5	54,4	1.189
1.900	2.400	11,8	0,2	14,0	15,2	4,2	54,6	1.177
Moyenne		12,3	0,2	12,4	15,7	4,2	55,2	1.158

auxquels correspond le bilan :

Eléments du bilan par Nm³ de gaz					
Entrées	Combustible c = 0,321 kg Comburant a = 0,690 Nm³ H_2O réduit h = 0,029 Nm³	Distillation 740 cal Gaz à l'air 296 cal Gaz à l'eau 102 cal Combustion — cal	PCI du gaz 1.138 cal 46,6 %	Chaleur sensible du gaz cal %	Chaleur totale extraite cal %
Sorties	H_2O formé — h = Nm³ Imbrûlés k = 0,099 kg	Imbrûlés 8.100 × 0,099 = 802 cal 32,8 %		Pertes au terrain cal %	Chaleur restée dans la mine cal %
Rendements	η_c = 61 % η_{th} = 70 %	Chaleur potentielle totale 1.940 cal 79,4 cal		Chaleur sensible totale 505 cal 20,6 %	PCI du combustible 0,321 × 7.630 = 2.445 cal 100 %

Le pouvoir calorifique du gaz (1.138 cal/m³) provient pour 65 % de la distillation, 9 % du gaz à l'eau et 26 % du gaz à l'air.

CONCLUSIONS

D'autres essais, sur lesquels nous ne possédons guère de données, ont été effectués à Tchéliabinsk (Donetz) (1935), dans le gisement de Prokopev et en d'autres stations encore.

Peu avant la guerre, plusieurs stations à échelle industrielle étaient en projet pour :

Lissitchansk (Donetz ..... 65.000 m³/h
Novo Kuznetzk (Sibérie) ... 250.000 m³/h
Kurachovka (Ukraine) ..... 400.000 m³/h

ainsi qu'à Kizelorsk, Tcheliabinsk, Egorsinski, Grischinov (Donetz), Schakhtinsk (Rostov) et d'autres encore en Moscovie, dans le Donetz, l'Oural, la Sibérie orientale, l'Asie Centrale, l'Extrême-Orient. Les chiffres cités (400.000 m³/h) semblent énormes, mais concordent bien avec l'ordre de grandeur indiqué pour ces stations de gazéification, destinées à assurer une production équivalente en calories au charbon extrait par 2.000 mineurs d'après les méthodes classiques.

La guerre a sans doute différé la réalisation de ces projets : les stations de Gorlovka et Lissitchansk ont été détruites. Elles ont été remises en état et peut-être agrandies après la défaite allemande, mais nous ne possédons que des indications très vagues sur tout ce qui a été fait après la guerre.

Résultats expérimentaux.

Les données dont nous disposons sont fragmentaires et il est impossible de reconstituer complètement aucun des essais effectués. Il semble cependant, en comparant les résultats connus des différentes stations, que l'on puisse tirer les conclusions suivantes :

1) La méthode par chambres souterraines et celles où le combustible est fragmenté au moyen d'explosifs sont abandonnées, vu l'importance du travail souterrain qu'elles exigent et l'irrégularité des résultats, irrégularités dues à la formation de « cheminées » dans le combustible et au by-passage d'air dans les fissures, amenant une recombustion partielle du gaz formé.

2) La méthode par percolation, utilisant la porosité naturelle d'un combustible à cendres peu fusibles, semble avoir donné lieu à des réalisations industrielles. Nous manquons cependant totalement de détails sur les applications réalisées effectivement au moyen de cette méthode. Elle exige un équipement puissant et des pressions de soufflage de plusieurs atmosphères.

3) La méthode par trous est indiscutablement celle qui assure le meilleur contact comburant-combustible, la marche la plus régulière et le meilleur contrôle du feu. A l'échelle expérimentale, c'est cette méthode qui a donné les meilleurs résultats. Malheureusement, elle exige un travail souterrain important et ne se prête guère à un travail à grande échelle.

On constate que le feu se maintient facilement à l'intérieur du trou et en érode les parois en forme de cigare, le diamètre s'élargit jusqu'à atteindre deux fois l'épaisseur de la veine dans sa plus grande largeur, et même plus (essai 5 à Lissitchansk).

Le gaz produit ne reste bon (1.000 cal) que si la vitesse du courant est suffisante, de l'ordre de quelques mètres par seconde. Le débit doit donc augmenter avec le diamètre du trou (le tirage naturel dans un trou vertical est insuffisant pour réaliser la vitesse de courant d'air nécessaire). En interrompant complètement l'arrivée d'air (et, à fortiori, en injectant de la vapeur), on peut obtenir un gaz relativement riche (2.500 cal), mais pendant peu de temps seulement, l'inertie du système étant assez faible. En cas d'alternances, le rythme de celles-ci sera donc rapide (20 minutes par exemple).

Les pertes thermiques semblent s'établir vers 30 % (essais de Lissitchansk).

On éprouve une certaine difficulté à faire marcher plusieurs trous en parallèle d'une façon stable. En effet, si dans un trou la combustion n'est pas complète, l'air by-passé ira détériorer la production de tous les autres. Aussi, le fonctionnement régulier des nombreux systèmes imaginés pour forer à l'avance un grand nombre de trous et mettre ceux-ci automatiquement en service les uns après les autres semble-t-il très douteux.

4) La méthode par courant a le grand avantage de pouvoir être appliquée facilement à grande échelle, sans dépense exagérée de travail souterrain. Elle a été appliquée à l'échelle industrielle en Russie dès 1938. Les détails donnés dans ce rapport au sujet de Gorlovka donnent une idée de l'état de la question vers cette époque. On ignore si les difficultés rencontrées dans cette installation ont été résolues par la suite.

Les points les plus délicats à résoudre étaient les suivants :

a) Le revêtement des sondages et galeries en couche amenant le comburant ou évacuant les gaz. Ces conduits sont sujets à obstruction et à éboulement. Ils doivent être munis d'un revêtement. D'autre part, pour un fonctionnement correct, il faut que ce revêtement brûle au fur et à mesure de l'avancement du front de feu, tout en restant étanche à quelques mètres de celui-ci. L'abondance de la littérature consacrée à ce sujet indique qu'aucune solution définitive n'a été trouvée pour ce problème.

b) La résistance de la taille au passage du courant gazeux est très variable. Des éboulements peuvent causer des arrêts passagers. Un régime semble cependant s'établir après quelques jours de marche. Il est nécessaire, pour maintenir un débit constant et suffisant, de travailler avec des compresseurs volumogènes, capables de développer de fortes pressions (plusieurs atmosphères). Ceci pose des problèmes difficiles d'étanchéité.

c) Les épontes doivent avoir une constitution telle que l'espace laissé libre par la combustion du charbon se colmate complètement, tout en maintenant un passage ouvert contre la couche en feu. Il ne semble guère facile de réaliser cette double condition : à Lissitchansk (couche K8), le toit (calcaire) ne s'éboulait pas, causant des by-passages d'air dans l'arrière-taille et une recombustion du gaz. A Gorlovka au contraire, la taille avait tendance à s'obstruer complètement. Ce dernier cas est cependant moins défavorable que le précédent : à l'endroit du resserrement en effet, la vitesse des gaz augmente et la combustion devient plus vive, brûlant le bouchon et rétablissant automatiquement le passage.

d) Il peut se faire (Leninsk — peut être aussi Gorlovka) que le charbon distille au lieu de brûler et qu'une proportion importante de coke reste dans le sol. Ceci se produit entre autres quand la température reste trop basse (débit insuffisant — mine trop humide).

e) Le problème de la localisation du feu n'a pas reçu de solution satisfaisante.

Les chantiers appliquant la méthode par courant possèdent, grâce à leurs grandes dimensions, un volant thermique important, permettant la production de quantités importantes de gaz technologique (20 à 30 % de la production totale) lors des arrêts de soufflage.

Les inversions constituent une manœuvre délicate dans des chantiers aussi grands; il faut en effet purger de grands volumes de l'oxygène qu'ils contiennent afin d'éviter les explosions.

L'emploi d'air suroxygéné offre plusieurs avantages. D'une part, le PC du gaz s'améliore à cause de l'absence du ballast d'azote et l'importance relative des calories emmenées sous forme de chaleur sensible du gaz diminue fortement, relevant le rendement thermique.

D'autre part, l'addition d'oxygène ayant tendance à relever les températures, il est possible d'envoyer dans le chantier de la vapeur, soit en mélange, soit en alternances, et de produire de plus grandes quantités de gaz technologique. Le procédé revient cependant très cher. Même à Gorlovka, où l'on disposait cependant d'une source d'oxygène bon marché (sous-produit de la fabrication d'engrais synthétiques), la suroxygénation de l'air triplait le prix du gaz produit.

D'une façon générale, les essais russes ont démontré que :

la gazéification in situ d'une couche de charbon

est possible sans fragmentation préalable du combustible;

l'emploi d'air froid permet d'obtenir d'une façon stable du gaz à 800 cal/m³, à condition que la vitesse du courant gazeux soit suffisante (de l'ordre de quelques mètres par seconde). Le fonctionnement continu a pu être maintenu régulièrement pendant des périodes de plusieurs semaines.

En régime établi, et à condition que la surface de charbon exposée soit suffisante pour permettre l'épuisement de tout l'oxygène, le pouvoir calorifique augmente avec le débit de comburant et la température du chantier.

On a réalisé la gazéification de 10 à 20 kg de charbon par m² de « surface équivalente » (produit de la longueur du front de feu par la puissance nette de la couche) et par heure.

L'interruption du soufflage permet d'obtenir d'une façon transitoire, avec ou sans injection de vapeur, un gaz technologique à 2.000...2.500 calories. Le dégagement de matières volatiles de parties non gazéifiées de la couche peut améliorer fortement le gaz produit. Par contre, des quantités importantes de coke peuvent rester sur place.

Les pertes de chaleur dans le terrain semblent être de l'ordre de 25 à 35 % de la quantité de chaleur totale soustraite à la mine. Si la mine est très humide, les pertes sont plus grandes encore. La visite des chantiers, après extinction, montre que la zone influencée par les hautes températures, n'a pas plus d'un mètre ou deux d'épaisseur. La chaleur sensible du gaz, d'autre part, représente 10 % environ et dépend fort de la quantité de vapeur entraînée.

L'emploi d'oxygène relève des températures et agit doublement sur le pouvoir calorifique du gaz (élimination de l'azote, plus grandes proportions de CO_2 et de H_2O réduites). Son emploi économique ne pourra cependant être envisagé qu'après la mise au point d'installations de production à grande échelle et bon rendement (turbine Kapitza). Cette mise au point, à laquelle on travaille depuis des années, semble assez laborieuse.

NOTES

Des problèmes connexes à la gazéification souterraine font l'objet d'une littérature abondante mais pauvre en indications précises. Citons :

— La production d'oxygène à bon marché (turbine Kapitza). Le procédé Kapitza consiste à liquéfier l'air en le détendant après compression, non plus dans un cylindre comme dans les procédés classiques, mais dans une turbine permettant de travailler sur des débits beaucoup plus élevés. D'autre part, à la différence des procédés classiques, tout le cycle serait réalisé à des pressions relativement basses (quelques atmosphères seulement). Une installation pilote aurait été mise en marche en 1943.

— L'utilisation du gaz pauvre produit dans des turbines à gaz (une turbine de 1.000 kW était à l'étude pendant la guerre).

— La commande et le contrôle à distance de panneaux de gazéification multiples.

— La préparation de chantiers de gazéification (méthode par courant avec taille montante), sans main-d'œuvre souterraine, au moyen de sondages dirigés. L'exécution de sondages inclinés, en couche, rencontre déjà de sérieuses difficultés quand la couche présente des ondulations. La réalisation de la jonction entre deux sondages par abatage hydraulique ou par combustion dans un jet d'oxygène est encore bien plus délicate. On aurait cependant réussi, à Gorlovka, à relier, par abatage hydraulique, deux trous distants de vingt mètres.