

# La gazéification souterraine dans les divers pays

(Suite)

## SAMENVATTING

### VI. — EXPERIMENTEN TE DJERADA (Marocco)

De proeven te Djerada werden in 1947 ontworpen en van November 1949 tot Januari 1951 doorgevoerd onder de leiding van het Onderzoek-Centrum der Franse Kolenmijnen : Cerchar.

Het schema van de inrichting vertoonde veel gelijkenis met dat van Gorlovka : 77° hellende anthraciet-laag, horizontale vuurpijler, 100 m lang en 50 m diep, onwisseling van de gasstromingsrichting en benutting van de voelbare warmte bij middel van ingegraven warmterecuperatoren.

Na een eerste mislukte poging werkte de inrichting onafgebroken gedurende vijf maanden. Gas met meer dan 600 cal/m<sup>3</sup> werd gedurende 223 h (6 % van de totale duur) voortgebracht, en gas met meer dan 400 cal/m<sup>3</sup> gedurende 850 h (23 %). Het algemeen gemiddelde bedraagt ongeveer 350 cal/m<sup>3</sup>. Men zou echter een veel betere waarde hebben kunnen bekomen door het gas slechts gedurende de gunstigste phase van iedere afwisseling op te vangen.

Gezien het gering gehalte aan V.B. van dit anthraciet (5,9 % op rein kolen) is de invloed van de distillatie onaanzienlijk. Hier is hoofdzakelijk watergas ontwikkeld geweest, tengevolge van grondwaterinzijpeling, overvloedige stortregens of vrijwillige waterinjecties in de pijler.

De grootste moeilijkheden werden veroorzaakt door de ondichtheid van de ondergrondse gasgenerator. De lekken werden nog opgedreven door de aanzienlijke weerstand van het stelsel ten opzichte van de gasstroming. Deze weerstand is te wijten aan instortingen in de pijlerruimte zelf. Het hangende van de laag is gesmolten en tegen het liggende komen rusten. De verplaatsing van het vuurfront gedurende de proef bedraagt een tiental meter. Waarschijnlijk zijn er weinig onverbrande steenkolendeeltjes achtergebleven.

Van de bekomen uitslagen valt af te leiden dat een gelijkaardige pijler, op afdoende wijze gasdichtge maakt, en met sterkere blaasmiddelen uitgerust, veel gunstigere resultaten zou opleveren.

### VI. — ESSAI FRANÇAIS DE GAZEIFICATION SOUTERRAINE A DJERADA (Maroc)

par M. LOISON,

Ingénieur en Chef au Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France.

#### AVANT-PROPOS

Une expérience de gazéification souterraine a été entreprise en 1947 à Djerada sur l'initiative de la Résidence du Maroc. Elle a été poursuivie en 1950 et 1951 par le Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France. La réalisation a été confiée à la Société des Charbonnages Nord-Africains (Directeur du chantier : M. Marteau), sous la direction technique d'un Comité de Gazéification. Les essais ont été constamment animés par M. Doumenc, d'abord rapporteur du Comité de Gazéification, puis Directeur de l'exploitation de Djerada.

La Note Technique 7/51 (septembre 1951), des Charbonnages de France, rédigée par M. Loison, Ingénieur en Chef au Cerchar, rend compte des résultats obtenus depuis le début de l'essai jusqu'en juin 1951.

Le texte intégral de cette note est repris ci-dessous. Il devient le chapitre VI de l'étude sur la gazéification souterraine dans les divers pays (1).

Le mode d'interprétation des résultats adopté par M. Loison est, dans son principe, identique à celui qui a été exposé dans l'introduction de cette étude (voir « Annales des Mines de Belgique », janvier 1951). Les notations utilisées sont cependant différentes. On trouvera en annexe à ce chapitre la corrélation entre les deux systèmes de notations.

(1) Le rapport de l'essai II de Bois-la-Dame (chapitre V. B) paraîtra dans la prochaine livraison des « Annales des Mines de Belgique ».

## CARACTERES GENERAUX DE L'ESSAI

Les caractéristiques essentielles de l'expérience de gazéification souterraine de Djerada sont les suivantes :

1°) La méthode adoptée est la méthode « par courant », encore appelée méthode « par taille de feu rabattante », dans laquelle un panneau de charbon est léché par le courant gazeux sur l'une de ses faces. La combustion et la gazéification se développent le long de cette face qui progresse en rabattant entre deux voies parallèles.

Cette méthode a été appliquée à un dressant, la taille de feu horizontale rabattant en montant entre deux descenderies orientées suivant la plus grande pente.

2°) L'air soufflé n'est jamais enrichi en oxygène; il est additionné de vapeur d'eau pendant certaines phases de l'essai.

3°) Le courant gazeux peut être renversé périodiquement. Des régénérateurs placés au sommet de chaque descenderie sont parcourus alternativement par les gaz sortant du chantier et par l'air froid y pénétrant. Ces dispositions ont pour but d'une part de récupérer une partie de la chaleur sensible du gaz, d'autre part, en préchauffant l'air pénétrant au chantier, d'accroître la température de celui-ci, ce qui doit faciliter les réactions endothermiques de gazéification.

4°) L'allumage du chantier est précédé d'un préchauffage important destiné à établir, dès les premières heures de l'essai, une température suffisamment élevée.

5°) Le charbon est un anthracite à 5 % de matières volatiles; c'est une circonstance éminemment défavorable à l'obtention d'un gaz de pouvoir calorifique élevé.

\* \* \*

Le schéma de l'essai a été arrêté dès le mois de mai 1947 et les travaux préparatoires commencés en octobre 1947. A partir de juin 1949 quelques essais préliminaires ont permis de vérifier et de mettre au point certains éléments de l'installation.

Un premier essai, tenté en novembre 1949, a été interrompu prématurément après 160 heures de marche. Malgré sa durée extrêmement courte, il a été fertile en enseignements et a conduit à améliorer l'installation en plusieurs points.

Un second essai, commencé le 22 août 1950, a été arrêté volontairement le 25 janvier 1951, après 5 mois de marche continue. Des travaux miniers ont été entrepris par la suite pour essayer d'atteindre le chantier et déterminer sa configuration après l'essai. Ils sont encore en cours.

Nous décrirons d'abord l'installation telle qu'elle était au début du premier essai.

### 1. — DESCRIPTION DU CHANTIER

#### a) Le gisement.

Le chantier de gazéification est situé à quelques kilomètres de l'exploitation de Djerada dans un dressant affleurant suivant une ligne ouest-est et

présentant un pendage nord de 77° et une puissance comprise entre 1 m et 1,20 m.

La composition du charbon est donnée par le tableau I :

TABLEAU I

Analyse immédiate		Analyse élémentaire	
Humidité .....	2,0 %	Hydrogène .....	2,5 % sur sec
M.V. ....	5,6 % sur sec	Azote + oxygène .....	2,09 % sur sec
Carbone fixe .....	89,0 % sur sec	Soufre .....	3,96 % sur sec
Cendres .....	5,4 % sur sec	Carbone .....	86,07 % sur sec
		Cendres .....	5,38 % sur sec

P.C.S. du charbon brut sec : 7.925 cal/kg (mesuré à la bombe)

La composition des MV (distillation à 1.050° au four électrique) est donnée au Tableau II en pourcent volumétriques.

TABLEAU II.

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
3,0 %	2,2 %	0,1 %	1,8 %	84,4 %	5,4 %	3,1 %
P.C.S. des M.V. : 690 cal par kg de charbon (calculé)						

La couche est comprise entre un banc de grès épais au mur et une alternance de bancs de grès et de schiste au toit. Les épontes sont constituées au toit et au mur par des schistes relativement com-

pacts à température de ramollissement élevée. Le banc du toit renferme de petites veines de charbon. La composition des épontes est donnée au tableau III.

TABLEAU III.

Schistes du toit		Schistes du mur	
Perte au feu en creuset fermé ...	10,2 %	Perte au feu en creuset fermé ...	8,1 %
Cendres .....	89,8 %	Cendres .....	91,9 %
SiO <sub>2</sub> .....	63,9 %	SiO <sub>2</sub> .....	68,3 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	11,7 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	10,7 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	21,5 %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	19,1 %
CaO .....	1,8 %	CaO .....	1,1 %
MgO .....	0,5 %	MgO .....	0,3 %

b) Schéma minier (Fig. 1).

Le panneau d'expérience est limité par deux descenderies de 50 m de longueur, foncées suivant le pendage, espacées de 100 m, et reliées à leur base par la galerie de feu. Les travaux ont été conduits à partir d'un puits vertical au toit du gisement et relié à la galerie de feu par un travers-bancs. Les descenderies, foncées sur 2,20 m de largeur, ont

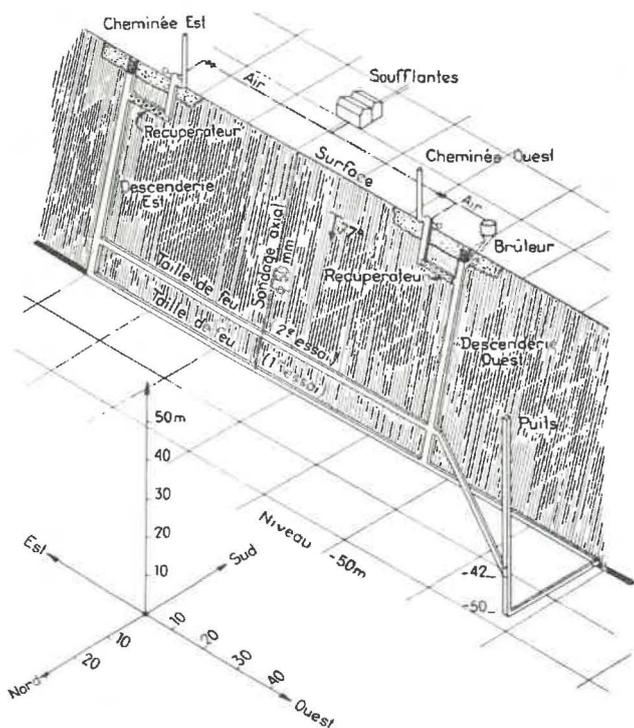


Fig. 1. — Schéma du chantier de Djerada.

été partiellement remblayées de façon à réduire leur ouverture à 0,80 m. Le remblayage est constitué par des schistes du côté interne et du béton du côté externe. Des dalles de béton horizontales, espacées de 2,50 m et armées par des rails encastrés dans les épontes, ont pour but de s'opposer à la chute du remblai dans son ensemble; n'étant pas

elles-mêmes encastrées dans les épontes, mais seulement dans le charbon, elles doivent basculer dès qu'elles sont atteintes par la zone de feu, et permettre ainsi le contact direct du courant gazeux avec le charbon.

Un sondage a été foré en couche dans l'axe du chantier, et tubé à 2 pouces.

c) Préchauffage et inversion.

Au sommet de chaque descenderie se trouvent :

- un régénérateur constitué par un empilage de 50 tonnes de briques logées dans une chambre creusée en couche. Ce régénérateur communique directement avec la cheminée. Celle-ci est obturée à sa partie supérieure par un clapet;
- un brûleur permettant d'envoyer des fumées chaudes dans le chantier. Chaque brûleur (figure 2) est en fait un four cylindrique vertical dont le couvercle, en forme de voûte, porte 4 brûleurs à fuel (brûleurs basse pression, utilisant de l'air sous 150 à 200 g/cm<sup>2</sup> et du mazout sous 1 kg/cm<sup>2</sup> de pression).

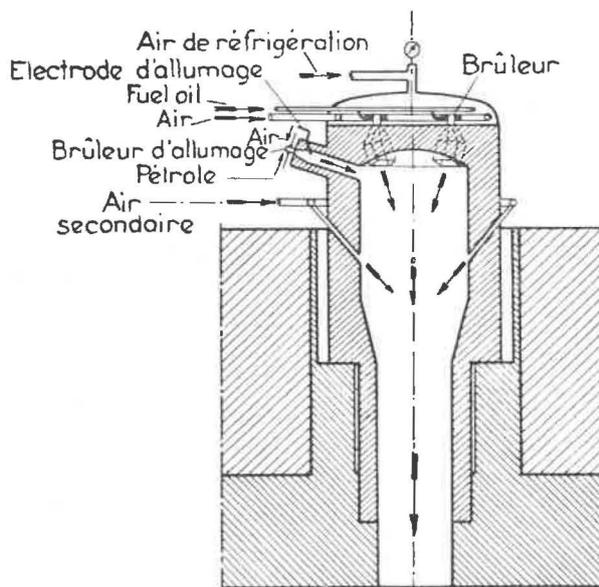


Fig. 2. — Brûleur.

Au cours d'essais préliminaires, des fuites de gaz chauds sous pression ont entraîné une détérioration rapide des brûleurs et de la voûte. On a remédié à cette difficulté en enveloppant la partie supérieure de la chambre de combustion dans une coupole étanche maintenue en surpression.

Trois soufflantes volumétriques d'une puissance totale de 175 CV peuvent débiter 8.000 m<sup>3</sup> par heure sous une pression de 700 g/cm<sup>2</sup>. Le réglage du débit s'effectue au moyen d'un by-pass recyclant une partie de l'air après passage dans un réfrigérant. Les soufflantes fonctionnent toujours au refoulement, et un jeu de vannes permet de les mettre soit en série, soit en parallèle, et de les relier au sommet de la descenderie ouest ou de la descenderie est.

On avait prévu initialement d'envoyer avant chaque inversion un tampon de fumées neutres dans le chantier, afin d'éviter la formation d'un mélange gazeux explosif. L'un des brûleurs (brûleur est) devait être spécialisé dans cette fonction, l'autre brûleur (brûleur ouest) étant réservé au préchauffage du chantier. En fait, dès le début de l'essai, on a effectué les inversions sans envoyer de fumées neutres dans le chantier, et aucun incident n'en est résulté.

En dehors de la période d'allumage les brûleurs ne sont donc pas utilisés, et le trajet des gaz est le suivant :

- sens ouest-est : l'air pénètre dans le régénérateur ouest; la cheminée ouest étant fermée, le gaz sort par le régénérateur est et la cheminée est;
- sens est-ouest : l'air pénètre par le régénérateur est; la cheminée est étant fermée, le gaz sort par le régénérateur ouest et la cheminée ouest.

La manœuvre d'inversion est la suivante : on réduit le débit des soufflantes, on ouvre la cheminée du côté air; l'air soufflé s'échappe en grande partie par cette cheminée; on ferme ensuite progressivement le débit d'air. La manœuvre dure environ 10 minutes.

#### d) Mesures et dépouillement.

1) *Mesures dans le chantier.* — Les mesures destinées à suivre la progression du feu dans le chantier ont été extrêmement réduites. Elles comportent : la mesure des températures en trois points échelonnés le long de chaque descenderie (à 30, 35 et 40 m de profondeur), la mesure de la température à l'entrée et à la sortie des régénérateurs, et la mesure de la pression dans le sondage axial. Les couples utilisés sont des couples chromel-alumel dont les fils sont séparés par des perles de séatite et protégés par une canne en acier inoxydable. Leur fonctionnement a donné lieu à de multiples incidents : rupture des cannes non étanches, tubes protecteurs percés ou cassés, etc... Les indications de la plupart des couples sont devenues rapidement douteuses et il a été difficile et parfois impossible de vérifier l'état des couples en cours d'essai.

2) *Mesures en surface.* — Ce sont les plus importantes, car elles doivent permettre l'établissement du bilan thermique. Les mesures suivantes ont été effectuées régulièrement :

- débit d'air à l'entrée, par un diaphragme placé sur le collecteur d'aspiration des surpresseurs;

- débit de gaz à la sortie, par un diaphragme sur les cheminées;
- débit de mazout (en période de préchauffage) par un compteur volumétrique;
- température du gaz sortant à la cheminée;
- pression en tête des deux descenderies et au sondage axial;
- composition du gaz : analyse continue du CO<sub>2</sub> au moyen d'un appareil Otic, et analyses manuelles périodiques à l'appareil d'Orsat;
- pouvoir calorifique du gaz par un calorimètre enregistreur et un calorimètre manuel. En fait, le calorimètre enregistreur n'a jamais fonctionné de façon satisfaisante.

La mesure de la teneur en eau du gaz n'a pas été effectuée de façon très régulière; cette teneur ayant été presque toujours très importante, il n'est pas possible d'évaluer le débit du gaz sortant; il peut être calculé à partir du débit d'air entrant et de la composition du gaz (en faisant le bilan de l'azote), mais les fuites ayant été importantes, ce calcul est très approximatif.

3) *Etablissement du bilan-matière.* — Le courant gazeux entrant dans le chantier est constitué par de l'air sec et de la vapeur (humidité naturelle de l'air soufflé et vapeur d'eau éventuellement injectée). Les réactions entre le courant et le charbon ont pour effet de mettre sous forme gazeuse une certaine quantité de charbon. En outre, de l'eau provenant des terrains encaissants peut être introduite dans le courant gazeux soit directement sous forme de vapeur d'eau, soit après réaction sur le charbon. Tous ces éléments se retrouvent dans le courant de gaz sortant du chantier. Le bilan-matière peut s'écrire en prenant pour base 1.000 molécules d'air entrant :

$$\begin{aligned}
 & 1.000 \text{ molécules d'air sec} \\
 & + h_1 \text{ molécules d'eau (vapeur d'eau du courant} \\
 & \quad \text{d'air entrant)} \\
 & + h_2 \text{ molécules d'eau (eau provenant des terrains)} \\
 & + C \text{ kg de charbon gazéifié} \\
 & = N \text{ molécules de gaz sec} \\
 & + h_3 \text{ molécules d'eau (vapeur d'eau dans le gaz)}.
 \end{aligned}$$

L'application de cette équation pose une difficulté : le charbon ne se transforme pas en gaz suivant une réaction unique et bien définie; il subit d'abord une distillation progressive, puis une gazéification plus ou moins complète, pour donner naissance à un résidu solide pouvant renfermer, outre le stérile, une certaine proportion de carbone. On peut estimer que tout se passe à peu près comme si un poids  $g$  de charbon avait été entièrement distillé et gazéifié, et un poids  $(d - g)$  distillé complètement mais non gazéifié,  $d$  représentant la totalité de charbon transformé par distillation ou gazéification. On peut alors écrire l'équation du bilan de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 & 1.000 \text{ molécules d'air sec} \\
 & + h_1 \text{ molécules d'eau (vapeur du courant d'air} \\
 & \quad \text{entrant)} \\
 & + h_2 \text{ molécules d'eau (eau provenant des terrains)} \\
 & + \text{matières volatiles provenant de la distillation} \\
 & \quad \text{de } (d - g) \text{ kg de charbon}
 \end{aligned}$$

+ g kg de charbon  
 = N molécules de gaz sec  
 +  $h_3$  molécules d'eau (vapeur d'eau dans le gaz)

Cette équation n'est pas rigoureuse, les grandeurs d et g ne sont que des grandeurs équivalentes et non des grandeurs physiques réelles: les matières volatiles libérées par le charbon et pénétrant dans le courant gazeux ne proviennent pas réellement de la distillation *complète* de d kg charbon, mais de la distillation *partielle* d'un tonnage beaucoup plus important; or la composition des matières volatiles dépend de la température à laquelle elle se produit. Nous admettrons toutefois que leur composition élémentaire est la même en moyenne que celle que l'on obtient lors de la détermination du « taux de matières volatiles » au laboratoire.

En écrivant la conservation des quatre éléments: oxygène, carbone, hydrogène, azote, on obtient quatre équations qui permettent de calculer N, g, d et  $e = h_3 - (h_1 + h_2)$ .

Si on considère une période très longue et si on suppose qu'il ne subsiste en arrière du front de feu aucun imbrûlé solide constitué par du charbon distillé non brûlé, la quantité de charbon distillé d est évidemment égale à la quantité de charbon gazéifié g; mais il peut se faire que pendant une période limitée ces deux grandeurs soient très différentes. C'est ce qui se produit notamment aussitôt après l'allumage: le chantier s'entoure rapidement d'une zone de charbon partiellement distillé; d est donc très supérieur à g. Si de même, une masse importante de charbon s'éboule dans le chantier, elle distille d'abord rapidement et se gazéifie ultérieurement plus lentement. L'éboulement est donc marqué par un rapport d/g supérieur à 1; si, par la suite, l'éboulement étant distillé, sa gazéi-

fication est totale, d devient inférieur à g; si, pendant une longue période d reste en moyenne supérieur à g, il faut en conclure qu'une partie du charbon distillé n'a pas été gazéifié.

La signification de e est la suivante: la quantité d'eau  $h_3$  présente dans le gaz peut être différente de celle  $h_1 + h_2$  introduite par le courant d'air et par les terrains pour deux raisons opposées:

- soit qu'une partie de l'eau introduite dans le chantier réagisse sur le charbon pour donner CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> (formation de gaz à l'eau);
- soit qu'au contraire une partie de l'hydrogène du charbon brûle en donnant H<sub>2</sub>O. Ces deux phénomènes peuvent d'ailleurs se produire simultanément, mais les équations du bilan ne permettent de déterminer que la somme algébrique de leurs effets.

Si, par exemple, e est négatif, on peut dire que la quantité d'eau consommée par les réactions de gaz à l'eau est plus importante que la quantité d'eau produite par la combustion des matières volatiles.

Les grandeurs d, g et e ont été calculées à partir de toutes les analyses de gaz effectuées au cours de l'essai. L'erreur, lors du calcul de g, est assez faible, de l'ordre de quelques pour-cent; par contre, la précision avec laquelle peut être évalué d est très petite à cause de la faible teneur en matières volatiles du charbon: l'erreur peut atteindre 100%. Les valeurs du rapport d/g indiquées plus loin dans ce rapport sont toujours évaluées par excès, toutes les causes d'erreurs systématiques que nous avons décelées tendant à surestimer d. Ces valeurs ne présentent qu'un intérêt qualitatif: elles permettent de suivre l'évolution des phénomènes.

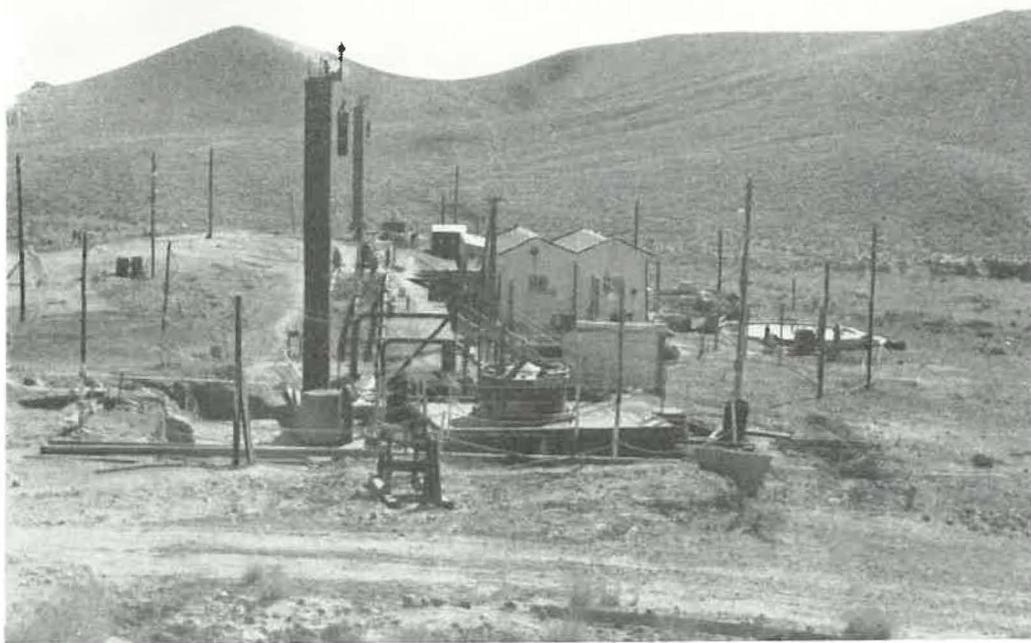


Fig. 5. — Vue d'ensemble du chantier.

Les déterminations de  $e$  sont plus précises, mais il est prudent, là encore, de ne leur attacher qu'une valeur qualitative.

\* \* \*

## 2. — JOURNAL DE L'ESSAI

### A. — Premier essai.

L'allumage est obtenu en envoyant des fumées chaudes dans la descenderie ouest. Un débit de  $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$  sous  $180 \text{ g}/\text{cm}^2$  est préchauffé à  $800^\circ$  et soufflé pendant trois jours à partir du 17 novembre à 22 heures.

A partir du 20 novembre à midi, la pression nécessaire pour assurer ce débit monte de façon constante. Le débit doit être réduit; au bout de 5 jours il n'excède pas  $3.300 \text{ m}^3/\text{h}$ , malgré une pression de  $500 \text{ g}/\text{cm}^2$ . Pendant ce temps la température du chantier s'élève régulièrement et la combustion s'amorce. Tout l'oxygène du gaz disparaît.

Le 25 au matin, on suspend le préchauffage et on souffle de l'air pur, toujours dans le sens ouest-est. Le gaz conserve une forte teneur en  $\text{CO}_2$ , la teneur en oxygène reste nulle, la teneur en  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$ , d'abord très faible, va en croissant, mais d'importantes fuites se déclarent tout autour de la cheminée ouest et un feu violent apparaît dans les remblais qui l'entourent, constitués par des schistes charbonneux. Il n'est plus possible d'obtenir une pression suffisante pour assurer un débit de soufflage appréciable. L'essai est stoppé le 26 au matin. L'essai proprement dit (en dehors du préchauffage) n'a donc duré que quelques heures.

Son échec est dû essentiellement à deux causes :

1) De petits fragments des épontes se sont décollés dans la descenderie est au fur et à mesure que sa température s'élevait. Ils se sont accumulés au pied de la descenderie est et l'ont obstruée. L'accroissement de résistance qui en est résulté a obligé à augmenter de plus en plus la pression de soufflage.

2) Les fumées produites par le brûleur, fumées chaudes, oxydantes, sulfureuses et sous pression, ont pu s'échapper en partie par la cheminée ouest grâce au défaut d'étanchéité du clapet de fermeture. Elles ont attaqué et percé la tôle de la cheminée dans sa partie enterrée dans le remblai, puis enflammé les schistes charbonneux constituant ce remblai.

Pour remettre le chantier en état, on s'est proposé d'abord d'atteindre l'extrémité ouest du chantier par le puits et le travers-banc, et de débayer et recadrer la galerie de feu, mais on a trouvé celle-ci fortement éboulée et colmatée, tant à cause du feu dont elle avait été le siège que par suite du noyade du chantier consécutif à l'arrêt de l'essai. On a donc dû renoncer à ce projet.

Une nouvelle galerie de feu a été forée 8 mètres au-dessus de l'ancienne (soit à 42 m de profondeur) à partir d'un nouveau travers-banc perçant la couche à 2 m à l'ouest de la descenderie ouest. Pour

La figure 3 donne une vue d'ensemble du chantier. On aperçoit au premier plan la cheminée ouest et la coupole du brûleur ouest; au deuxième plan les bâtiments où sont groupés les appareils de mesure; au troisième plan enfin, la cheminée et le brûleur est.

éviter l'obstruction des descenderies, celles-ci ont été remplies jusqu'au niveau des régénérateurs par des anneaux de réfractaire disposés en vrac (25 tonnes dans chacune des descenderies, soit un coefficient de remplissage d'environ 50 %).

Diverses modifications du brûleur et des cheminées ont en outre été apportées pour tenir compte des observations faites au cours du premier essai, en particulier les clapets fermant les cheminées ont été remplacés par des vannes autoclaves internes, dont l'étanchéité s'est révélée par la suite très satisfaisante.

### B. — Deuxième essai.

a) **Première période. - Préchauffage et allumage.**  
— 22 août, 10 h, au 25 août, 12 h, soit 74 heures.

Ainsi qu'au premier essai, l'allumage a été obtenu par l'insufflation de fumées chaudes produites par le brûleur de la descenderie ouest. Dans les premières heures on brûle en moyenne  $100 \text{ l}/\text{h}$  de mazout, le débit d'air soufflé atteignant  $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Par la suite le débit de mazout est réduit et le débit d'air porté progressivement à  $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , de façon à limiter à  $800^\circ$  la température des fumées entrant dans la descenderie ouest.

Le feu se déclare au pied de la descenderie ouest après 30 heures de préchauffage. Les gaz sortant du chantier, qui n'étaient jusqu'à présent constitués que par les fumées très diluées résultant de la combustion du mazout avec un grand excès d'air, se modifient rapidement : l'oxygène disparaît tandis que le  $\text{CO}_2$  atteint 15 %. Plus tard  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$  croissent. A partir de la 62<sup>me</sup> heure le gaz brûle ( $\text{CO} + \text{H}_2 = 13 \%$ ). A la 74<sup>me</sup> heure le préchauffage au mazout est suspendu définitivement.

b) **Deuxième période.**

— 25 août au 11 septembre.

On procède à une série d'inversions sans cadence régulière, en fonction des constatations faites. La plupart des observations effectuées pendant cette période ont été confirmées par la suite.

Les principales sont les suivantes :

1) La résistance du chantier est allée en augmentant dès le début de l'essai. La pression nécessaire pour assurer un débit de  $7.000 \text{ m}^3/\text{h}$  passe d'abord de  $200 \text{ g}/\text{cm}^2$  à  $400 \text{ g}/\text{cm}^2$  au bout de 3 jours, puis la pression de  $500 \text{ g}/\text{cm}^2$  ne pouvant être dépassée de façon continue par les soufflantes, le débit doit être réduit progressivement à  $5.300 \text{ m}^3/\text{h}$  après 4 jours,  $4.300 \text{ m}^3/\text{h}$  après 7 jours et  $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$  après 18 jours. Par la suite il oscille entre  $3.000$  et  $3.500 \text{ m}^3/\text{h}$ .

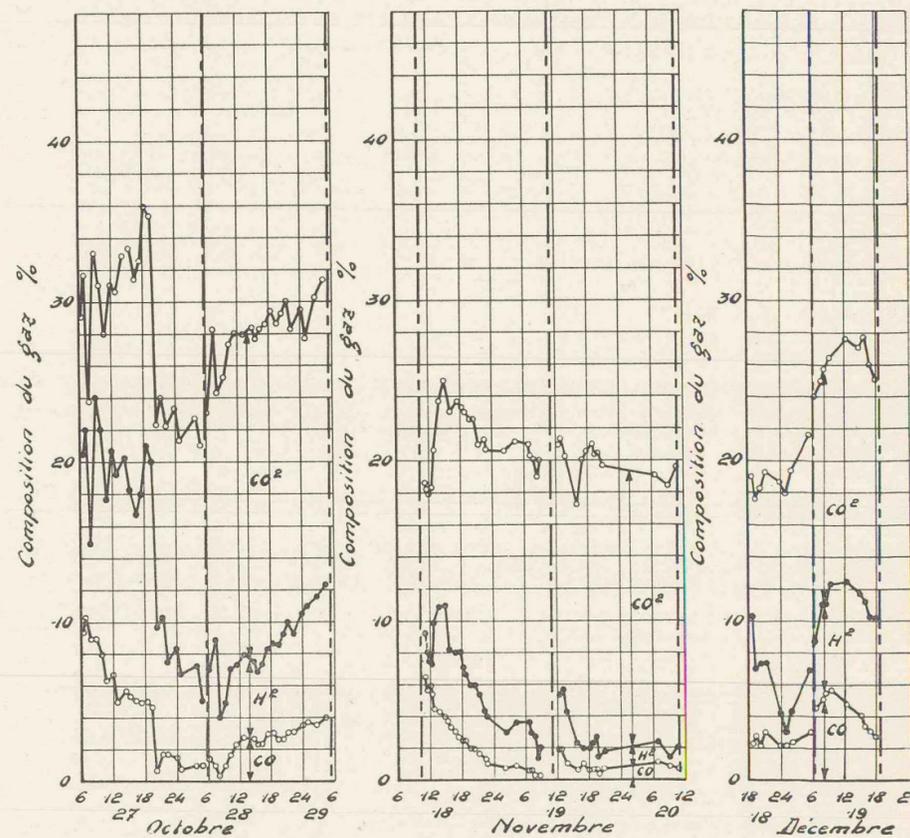
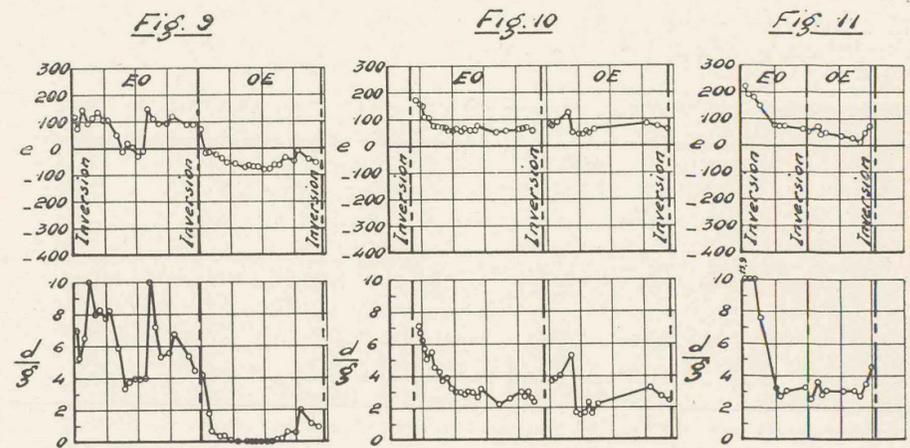
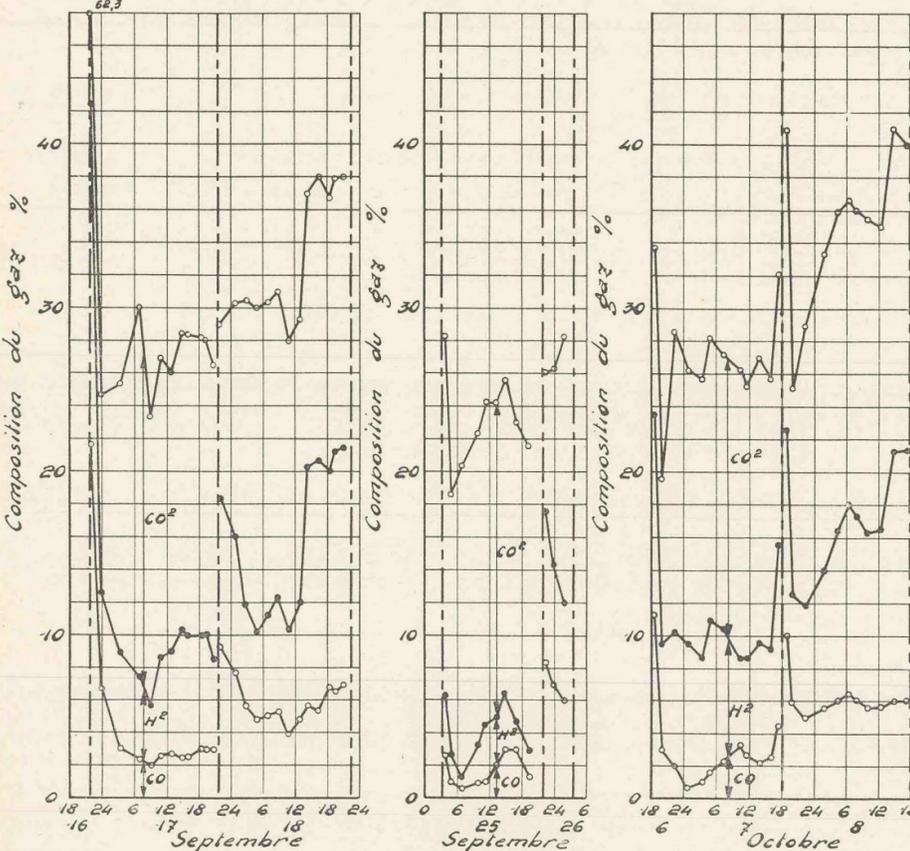
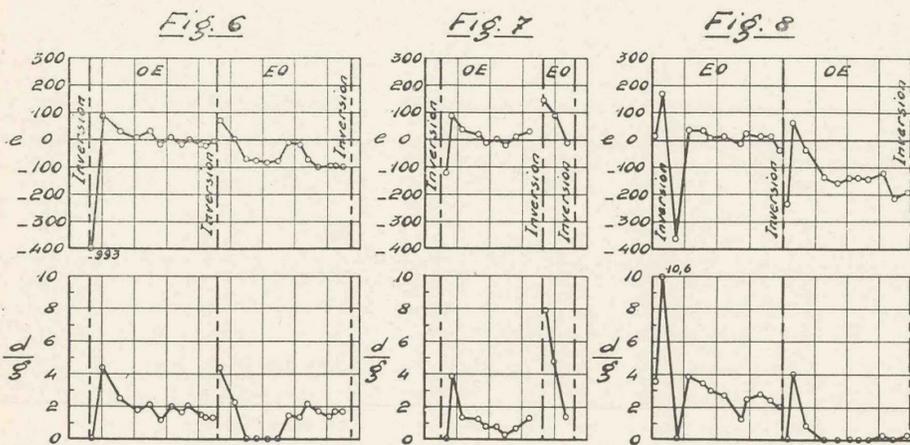
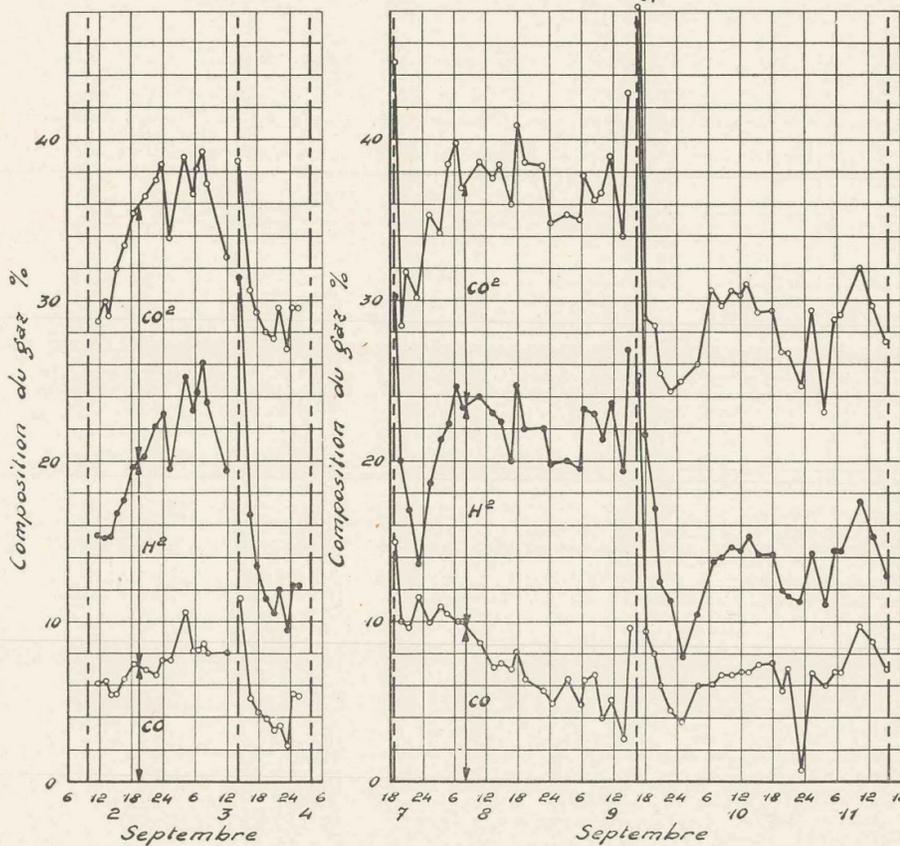
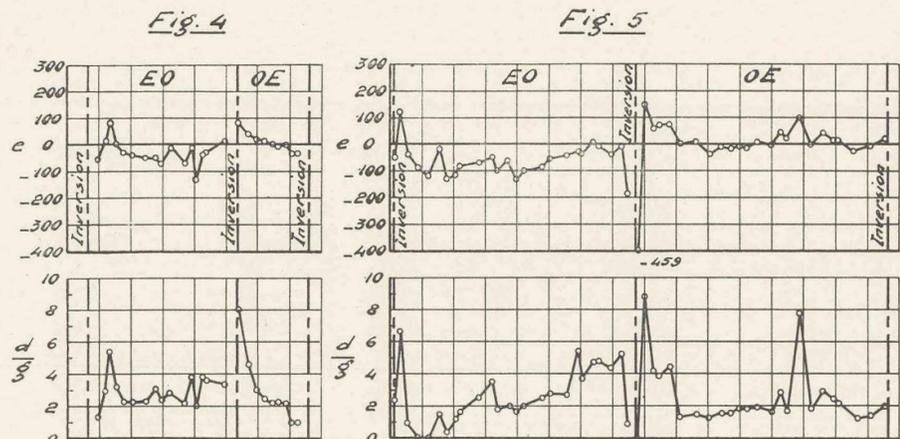


Fig. 9

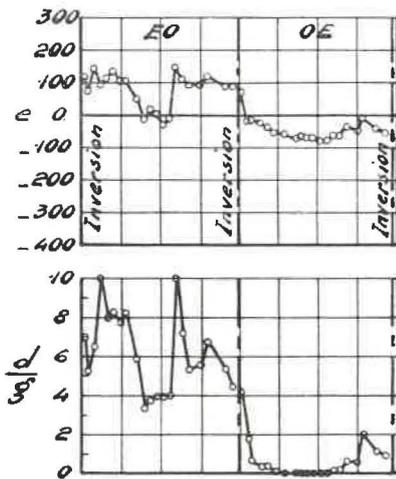


Fig. 10

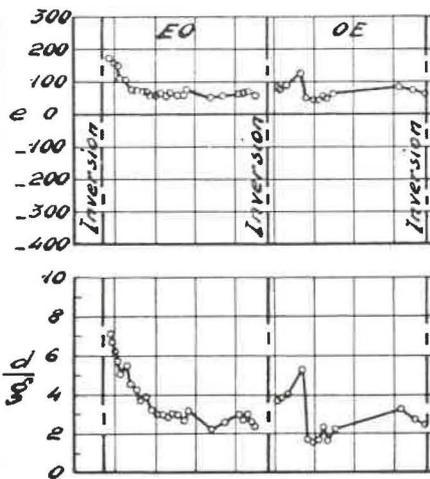
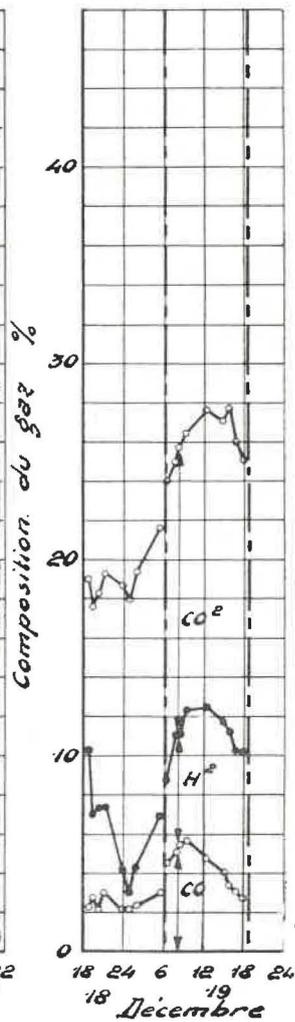
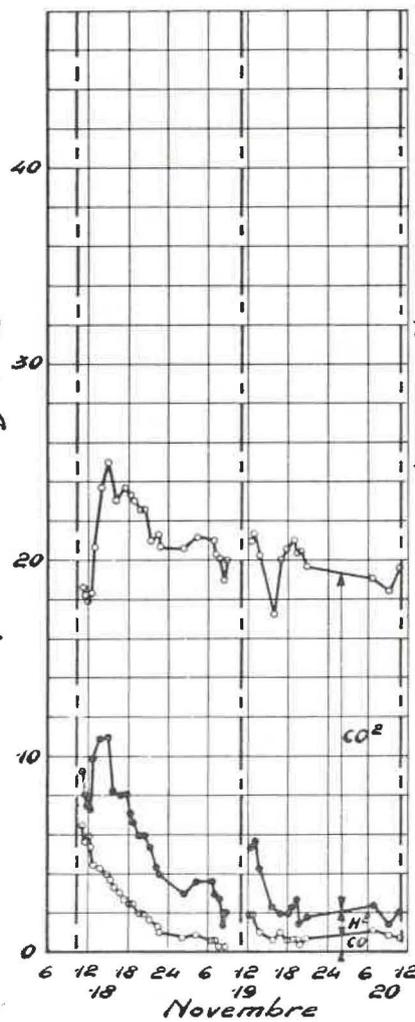
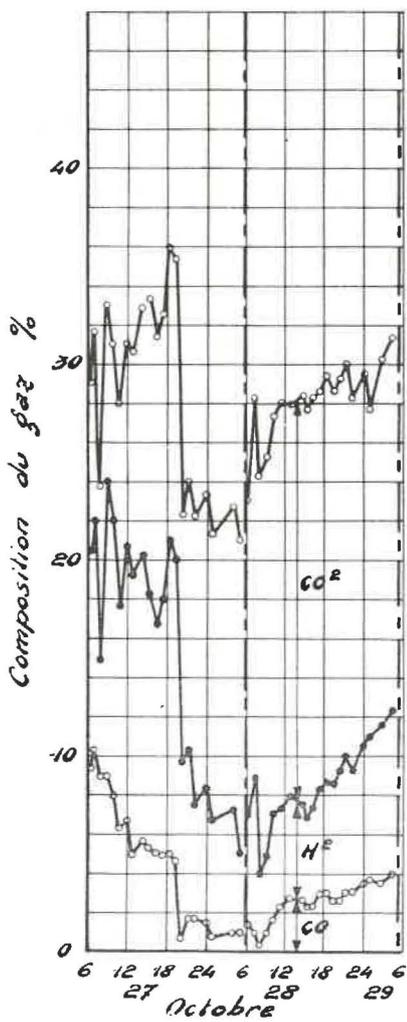
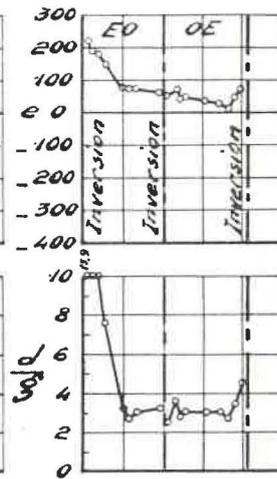


Fig. 11





La pression au sondage axial montre que la résistance est surtout localisée dans la moitié ouest du chantier, mais on ignore s'il s'agit d'un éboulement dans le chantier (épontes ou charbon) ou d'une obstruction de la base de la descenderie ouest (ramollissement des poteries consécutif au préchauffage ou effondrement prématuré des remblais bordant la descenderie).

Quoi qu'il en soit, la présence de cette résistance a obligé à maintenir durant tout l'essai une pression élevée (400 à 500 g/cm<sup>2</sup>) sans que le débit excède 3.000 à 3.500 m<sup>3</sup>/h.

2) Dès le début de l'essai la teneur du gaz en oxygène est nulle. Il en sera ainsi d'une manière continue pendant toute la durée de l'essai.

3) Pendant les 10 premiers jours le feu semble s'être localisé dans la moitié ouest de la taille. La teneur en CO + H<sub>2</sub> reste voisine de 15 à 16 % dans le sens ouest-est; elle est plus variable dans le sens est-ouest. La moitié est est sans doute encore trop froide pour que, lorsqu'on souffle dans le sens est-ouest, le feu puisse s'y développer. On souffle d'ailleurs surtout dans le sens ouest-est afin de réchauffer la moitié est.

Le 2 septembre, le feu se déclare franchement à la base de la descenderie est dès que l'on souffle dans le sens est-ouest. A partir de ce moment la qualité du gaz obtenu dans le sens est-ouest s'améliore très sensiblement et elle devient très supérieure à celle du gaz recueilli dans le sens ouest-est (figure 4). Un gaz combustible dont le pouvoir calorifique moyen est de 750 calories (20 à 24 % de CO + H<sub>2</sub>, 1 % de CH<sub>4</sub>) est obtenu pendant 15 heures le 4 septembre, 15 heures le 6 septembre, et 42 heures les 8 et 9 septembre. Toutes ces périodes comportent le soufflage dans le sens est-ouest. Dans le sens ouest-est la qualité du gaz est beaucoup moins bonne. CO + H<sub>2</sub> est voisin de 10 à 12 %. Cette dissymétrie dans le fonctionnement du chantier résulte de la dissymétrie de l'allumage. Elle subsistera pendant tout l'essai.

La figure 5 donne un exemple de la variation de la composition en fonction du temps au cours de deux cycles d'inversion consécutifs.

4) Au cours d'un cycle d'inversion la composition du gaz évolue généralement de la manière suivante (voir par exemple figure 5) :

α) Aussitôt après l'inversion on recueille pendant une durée très courte (15 à 20 minutes), un gaz à pouvoir calorifique élevé (1.000 à 1.200 calories) caractérisé par une faible teneur en azote et une teneur élevée en CO, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>. CO + H<sub>2</sub> est souvent compris entre 30 à 40 % et peut atteindre exceptionnellement 50 %.

Le bilan-matière conduit à un excès d'eau  $e$  négatif et très important en valeur absolue. Ce gaz résulte vraisemblablement d'une introduction d'eau importante dans une partie du chantier portée à une température élevée;

β) Dans une seconde phase, le gaz est caractérisé par une teneur très faible en CO<sub>2</sub> (6 à 9 %). Le bilan-matière conduit à un excès d'eau positif et un rapport  $d/g$  élevé, ce qui indique qu'une grande quantité de matières volatiles se dégage, dont une fraction importante brûle. La quantité d'eau résultant

de cette combustion est plus importante que celle ayant réagi sur le charbon; la teneur résultante en CO et H<sub>2</sub> varie d'une période à l'autre. Au cours de ces deux premières phases le gaz renferme une grande proportion de vapeur d'eau.

En dehors de ces deux phases bien caractérisées, l'évolution du gaz au cours d'un cycle n'obéit pas à des lois simples, valables pour tout l'essai. On constate seulement que le CO<sub>2</sub> reprend une valeur normale (15 à 20 %), l'excès d'eau  $e$  diminue et se rapproche de 0, mais il reste tantôt négatif, tantôt positif; de même le rapport  $d/g$  diminue et se rapproche de 1, mais peut ultérieurement subir d'importantes variations.

Si on observe par exemple la figure 5, relative à deux cycles de 48 heures consécutifs, on constate qu'après les deux phases caractéristiques du début le CO<sub>2</sub> reste à peu près constant et voisin de 15 à 16 %, tandis que H<sub>2</sub> et CO subissent des variations importantes : dans le sens est-ouest H<sub>2</sub> croît tandis que CO décroît constamment; il en résulte que  $e$  est toujours négatif et que  $d$  va en croissant. Cela signifie que la part de la distillation augmente, tandis que se maintient un pourcentage sensible de gaz à l'eau. La gazéification à l'air va par contre en diminuant. Dans le sens ouest-est CO et H<sub>2</sub> restent à peu près constants, sauf une pointe de H<sub>2</sub> ( $d/g$  élevé et  $e$  positif) qui correspond à une distillation importante résultant vraisemblablement d'un éboulement.

Pendant toute cette période du 4 au 11 septembre l'excès d'eau  $e$  est presque toujours négatif et important en valeur absolue dans le sens est-ouest, alors qu'il est positif ou tout au plus très voisin de 0 dans le sens ouest-est. C'est là un fait général qu'on vérifiera tout au long de l'essai : pendant les périodes où le gaz présente un pouvoir calorifique élevé la fraction d'eau décomposée est importante.

5) Des fuites sont apparues dès les premiers jours de l'essai autour des têtes de descenderies. Leur effet s'est trouvé accentué par la pression élevée à laquelle on a été obligé de se maintenir. Elles sont surtout dues soit au décollement des dalles de béton obturant les têtes de descenderies et insuffisamment encastrées dans les épontes, soit à la rupture de ces dalles sous l'effet de la pression s'exerçant sur leur surface inférieure. Ces dalles sont insuffisamment épaisses (une pression de 500 g/cm<sup>2</sup> est équivalente à la charge d'une dalle de 2 m d'épaisseur).

On s'est efforcé, au cours de cette période, de réduire les fuites d'abord par un embouage des têtes de descenderies, qui s'est révélé inefficace, puis en coulant de nouvelles dalles de béton.

### c) Troisième période.

— 11 septembre au 25 septembre.

Le débit restant toujours égal au débit maximum permis par l'installation, soit 3.000 à 3.500 m<sup>3</sup>/h, on a fait varier systématiquement la durée du cycle d'inversion.

α) du 11 septembre au 19 septembre on a effectué successivement 5 inversions espacées de 6 heures, 4 inversions espacées de 12 heures et 6 inversions espacées de 24 heures.

Dans les périodes à cycle d'inversion court, le pouvoir calorifique moyen du gaz va en diminuant. Après 6 inversions espacées de 6 heures  $\text{CO} + \text{H}_2$  est tombé de 20 % à 12 % dans le sens est-ouest, et de 14 à 16 % dans le sens ouest-est. La température de sortie du gaz en fin de cycle décroît d'abord rapidement puis croît progressivement. Elle atteint  $440^\circ$  en ouest et  $350^\circ$  en est.

Dans la période à cycle d'inversion de 24 heures, la température de sortie des gaz en fin de cycle reste à peu près stationnaire; la température du chantier reste donc en moyenne constante. La qualité des gaz est nettement améliorée. La figure 6 donne un exemple du résultat obtenu. Comme dans la période précédente, le sens est-ouest est le plus favorable. L'excès d'eau  $e$  est toujours négatif dans le sens est-ouest, et voisin de 0 dans le sens ouest-est.

$\beta$ ) du 19 au 21 septembre on expérimente un régime de pulsations défini comme suit : 3.000  $\text{m}^3/\text{h}$  pendant 3 heures, 1.200  $\text{m}^3/\text{h}$  pendant 3 heures, inversions espacées de 6 heures.

La variation du débit se traduit surtout par une variation importante des teneurs en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2$ , celle-ci atteignant des valeurs élevées pendant les périodes à faible débit.  $\text{CO}$ , par contre, ne subit pas de variation systématique.

La réduction du débit d'air s'accompagne donc d'un taux de steaming élevé ( $e$  négatif). Un exemple caractéristique des variations de la composition du gaz est donné par le tableau IV :

TABLEAU IV

Débit	CO	$\text{H}_2$	$\text{CO}_2$
1.200	5	11	24
3.000	4,5	5	19

En moyenne la qualité du gaz diminue, tandis que s'abaisse la température de sortie. L'activité des réactions de gazéification et de combustion va donc en diminuant. Il semble que tout se passe comme si le débit était égal en permanence au débit moyen. Il n'y a donc pas intérêt à envoyer un débit pulsé.

$\gamma$ ) du 21 au 25 septembre on tente de rétablir la symétrie du chantier par un régime d'inversions dissymétriques; soufflage pendant 6 heures dans le sens est-ouest, soufflage pendant 18 heures dans le sens ouest-est. On réussit à inverser les valeurs de la température des gaz à l'est et à l'ouest. La température de sortie à l'est croît de  $300$  à  $360^\circ$ , tandis que la température de sortie à l'ouest décroît de  $450$  à  $210^\circ$ , mais la perte de charge du chantier reste localisée vers la partie ouest du panneau. Le rapport des pertes de charge entre descenderie ouest et sondage axial d'une part, et entre descenderie est et sondage axial d'autre part, reste compris entre 3,5 et 4. En outre, le pouvoir calorifique du gaz reste toujours plus élevé dans le sens est-ouest; il va d'ailleurs en décroissant au cours de cette période, comme l'atteste la figure 7 relative aux deux derniers cycles de cette période.

#### d) Quatrième période.

— 25 septembre au 7 novembre.

La fin de la période précédente est perturbée par de violents orages accompagnés de fortes pluies, qui se prolongent pendant presque tout le mois d'octobre. Il en résulte une introduction massive d'eau dans le chantier. En outre divers incidents, provoqués ou non par les orages : déclenchement électrique, avaries mécaniques aux soufflantes, fissure à la chemise métallique de la chandelle est, obligent à plusieurs reprises à réduire le débit soufflé. Enfin des fuites aux têtes de descenderies, qu'on s'efforce de colmater dès leur apparition par de nouvelles coulées de béton, diminuent encore le débit d'air circulant effectivement dans le chantier. Tous ces incidents concourent à refroidir le chantier.

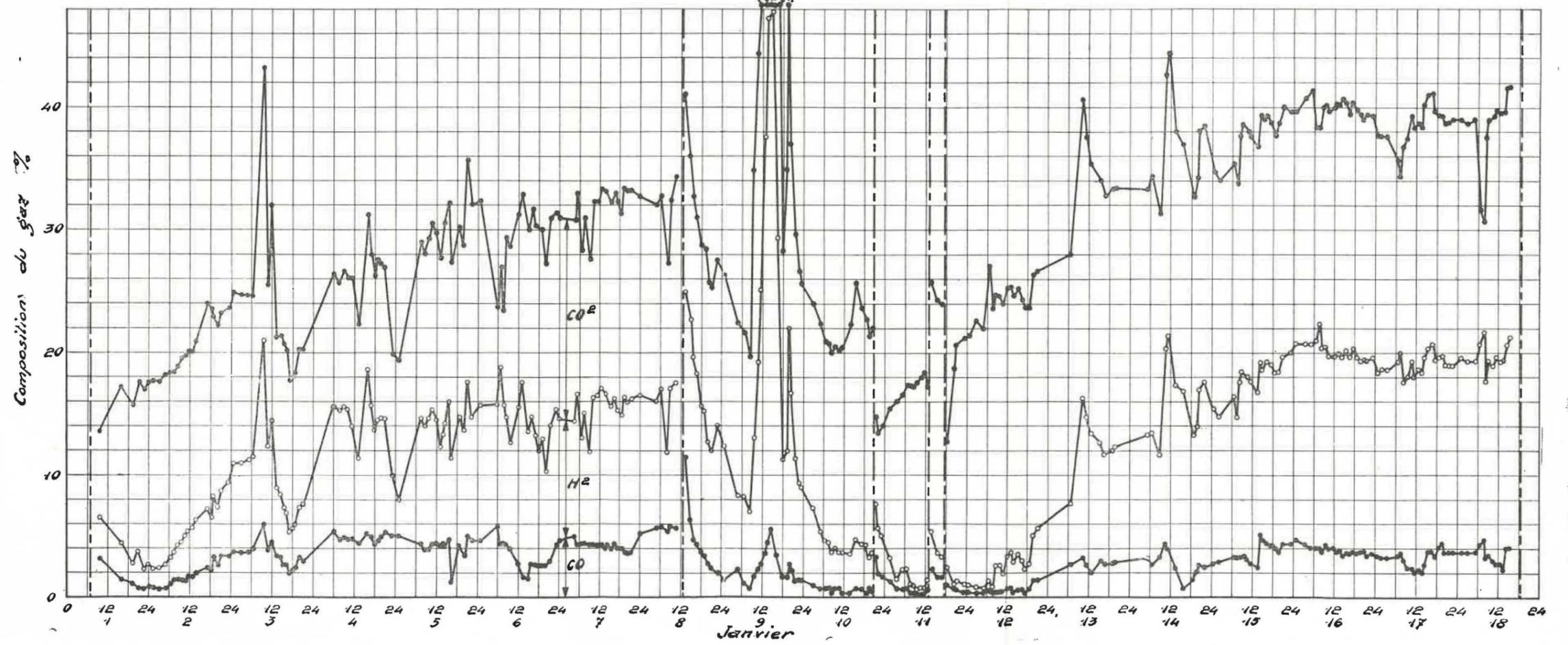
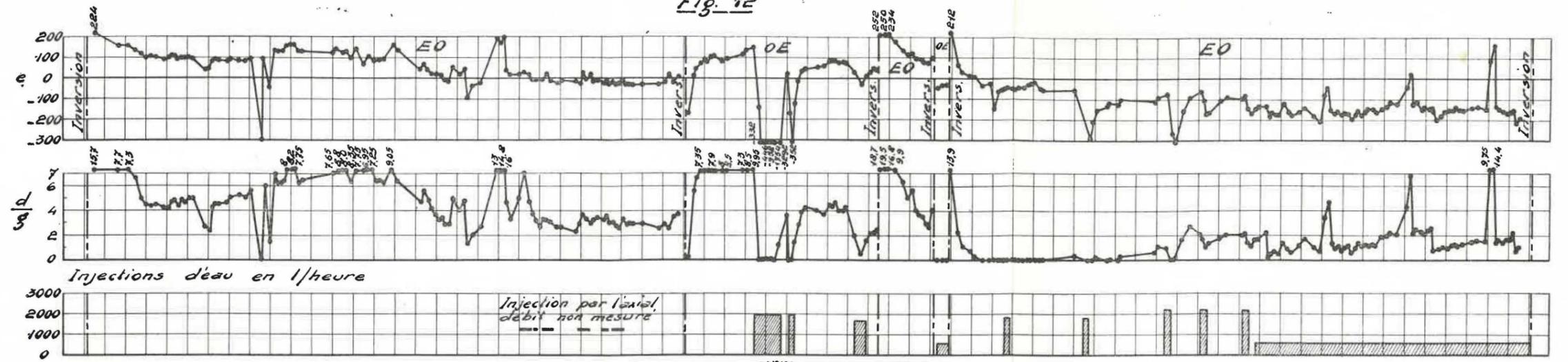
L'introduction d'eau s'accompagne parfois de la production d'une quantité importante de gaz à l'eau; en particulier le 9 octobre, après une période d'orages et de pluies très violentes, des fuites importantes en est obligent à réduire la pression de l'air soufflé. Le débit des soufflantes tombe à 1.400  $\text{m}^3/\text{h}$ ; le débit circulant dans le chantier est certainement encore plus faible. A 9 heures, la teneur en hydrogène monte brusquement à 30 % et la teneur en  $\text{CO}$  à 6 %.  $\text{CO}_2$  atteint 32 %; le gaz est donc constitué en grande partie par du gaz à l'eau fabriqué à une température relativement basse. Par la suite  $\text{CO}$  décroît rapidement et  $\text{H}_2$  beaucoup plus lentement; il atteint encore 12 % au bout de 62 heures.

De tels phénomènes ne peuvent être que passagers, car ils exigent que le massif cède une partie de la chaleur qu'il a emmagasinée. Pour lutter contre le refroidissement du chantier et essayer de produire du gaz combustible, on a adopté la méthode suivante (dans la mesure où le permettait l'état de l'installation).

Lorsqu'un ou plusieurs incidents successifs ont refroidi le chantier, on s'efforce de le réchauffer en multipliant les inversions. Lorsque la température de sortie du gaz est jugée suffisante ( $350$  à  $400^\circ$ ) on reprend un cycle d'inversion de 24 heures pour essayer de produire du gaz. Par exemple, après 5 jours de marche à faible débit, du 26 au 30 septembre, au cours desquels la période d'inversion est restée égale à 8 heures, on maintient pendant 4 jours ce régime d'inversion avec le débit maximum (3.500  $\text{m}^3/\text{h}$ ). A partir du 5 octobre le retour à une période d'inversion de 24 heures conduit à un gaz à 400-450 calories ( $\text{CO} + \text{H}_2 = 14$  à 17 %) dans le sens ouest-est, et un gaz à 300-350 calories ( $\text{CO} + \text{H}_2 = 9$  à 10 %) dans le sens est-ouest (Fig. 6).

Contrairement aux périodes précédentes, le sens ouest-est est le plus favorable. Parallèlement le taux de steaming devient plus important dans le sens ouest-est. Cette permutation dans le comportement relatif du sens de soufflage est-ouest et ouest-est doit être rapprochée du fait suivant : le 3 octobre, alors qu'on souffle dans le sens est-ouest on obtient un gaz à très faible teneur en  $\text{CO}_2$  (5 à 10 %).  $\text{H}_2$  et  $\text{CO}$  sont également très faibles (3 à 4 %) (d'où  $e$  positif très grand et  $d/g$  élevé). Après un cycle ouest-est normal, le même phénomène se reproduit au cycle est-ouest suivant. C'est à partir

Fig. 12



de ce moment que le sens ouest-est s'avère le plus favorable.

Le gaz obtenu le 3 octobre dans le sens ouest-est provient d'une distillation très importante suivie de la combustion d'une fraction importante des matières volatiles dégagées. Il traduit sans doute un éboulement engendrant une distillation, ce qui confirme l'accroissement par sauts brusques de la résistance du chantier; l'éboulement s'est vraisemblablement produit du côté de l'entrée d'air, c'est-à-dire vers l'Est, puisque la plus grande partie de l'oxygène a été consommée par la combustion de l'hydrogène et non du carbone.

De même une marche de 7 jours avec une période d'inversion de 8 heures, du 21 au 26 octobre, permet de réaliser ensuite une marche pendant une période de 24 heures que l'on peut caractériser par la figure 9.

Le sens est-ouest est de nouveau le plus favorable. Pendant la première moitié de chaque période de soufflage dans le sens est-ouest le pouvoir calorifique du gaz est de l'ordre de 600 à 650 calories. Dans le sens ouest-est il n'excède pas 400 calories.

#### e) Cinquième période.

— 7 novembre au 5 décembre.

La période d'inversion est maintenue égale à 24 heures et le débit à sa valeur maximum. En fait, le débit circulant effectivement dans le chantier est réduit, car, d'une part, on a presque toujours fonctionné avec une seule soufflante par suite d'incidents mécaniques, d'autre part, les fuites aux têtes de descenderies sont restées importantes. Malgré de nombreux travaux on n'a pu que s'opposer à l'extension exagérée des fuites sans pouvoir les réduire complètement.

Les dalles de béton coulées successivement au-dessus des têtes de descenderies se sont rompues ou décollées au fur et à mesure. Dès qu'une d'elles est fissurée la pression s'établit sous la dalle supérieure, qui est alors la seule à opposer une résistance.

Le pouvoir calorifique du gaz reste faible pendant toute cette période et tend à décroître légèrement. L'évolution de la composition du gaz au cours d'un cycle garde constamment l'allure de la figure 10. Dans le sens est-ouest  $\text{CO} + \text{H}_2$  va en décroissant de 10 à 15 % au début de la période, à 2 à 5 % à la fin de la période. Dans le sens ouest-est  $\text{CO} + \text{H}_2$  reste faible. Il est le plus souvent compris entre 2 et 5 %.

La pointe de gaz à fort pouvoir calorifique (taux de steaming très élevé) qu'on observait jusque là au début de chaque cycle tend à disparaître. Par contre, on observe presque toujours la phase suivante de distillation accompagnée de la combustion des matières volatiles.

L'excès d'eau est constamment positif. Le taux de réaction de l'eau sur le charbon est donc négligeable et masqué par la combustion des matières volatiles. Pendant cette période aucune pluie n'est tombée, cependant le gaz renferme toujours une proportion de vapeur d'eau importante, surtout après les inversions. Cette proportion peut rester voi-

sine de 50 % pendant plusieurs heures (surtout dans le sens est-ouest). Cette eau réagit très peu, soit parce que le chantier est dans son ensemble trop froid, soit plutôt parce qu'elle s'introduit dans le chantier dans une zone où le charbon est trop froid.

#### f) Sixième période.

— 7 décembre au 28 décembre.

Le débit circulant effectivement dans le chantier est amélioré :

- d'une part en remettant en marche la troisième soufflante, ce qui permet d'atteindre 7 à 8.000  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- d'autre part en coulant une nouvelle dalle de béton au sommet de la descenderie est.

En fait les fuites sont demeurées importantes. La dalle de béton paraît résister à la pression, mais elle est insuffisamment encastrée dans le terrain. En outre des fuites apparaissent à travers les terrains eux-mêmes. A la fin de la période on constate qu'avec un débit de 7.300  $\text{m}^3/\text{h}$  aux soufflantes, le débit circulant réellement dans le chantier n'est que de 1.000  $\text{m}^3/\text{h}$  dans le sens ouest-est, et de 2.700  $\text{m}^3/\text{h}$  dans le sens est-ouest.

On s'est efforcé, en outre, de réchauffer le chantier en maintenant les cycles d'inversion de 8 h. La température de sortie des gaz en fin de cycle atteint effectivement 500° en ouest, de 350 à 375° en est.

La qualité du gaz s'améliore, comme l'indique la figure 11 caractéristique de cette période. On constate que dans le sens ouest-est :

- 1) le pouvoir calorifique du gaz est plus élevé;
- 2) le taux de steaming est plus grand.

Enfin des analyses de gaz provenant du sondage axial montrent que le feu est surtout localisé dans la moitié ouest, ce qui est en accord avec le fait que la température du gaz est sensiblement plus élevée en ouest qu'en est.

#### g) Septième période.

— 29 décembre au 25 janvier.

Les périodes précédentes ayant montré une amélioration nette de la qualité du gaz lors des venues d'eau accidentelles, on a expérimenté l'injection d'eau dans le chantier. On a profité également de la température élevée atteinte au cours de la période précédente pour procéder à des cycles de longue durée. Les résultats essentiels sont condensés dans la figure 12 illustrant la marche de l'essai du 1<sup>er</sup> au 17 janvier.

Dès le début du cycle est-ouest, du 1<sup>er</sup> au 8 janvier, le pouvoir calorifique du gaz s'améliore sans que l'on fasse aucune injection d'eau, sans doute par suite des pluies très abondantes qui sont tombées entre le 28 et le 30 décembre.

La composition du gaz tend vers :

$\text{CO}$  4 à 5 %  
 $\text{H}_2$  10 à 11 %  
PCS 450 calories.

A partir du 6 janvier quelques injections d'eau sont faites par le sondage axial, échelonnées sur 36 heures. La teneur en  $\text{H}_2$  monte sensiblement à

chaque injection. En moyenne, toutefois, le gaz n'est pas sensiblement amélioré : en fin de cycle CO + H<sub>2</sub> atteint 16 %, et la température du gaz a baissé de 490 à 460°.

Au cours du cycle ouest-est du 8 au 10 janvier, plusieurs injections d'eau sont faites dans la descenderie ouest. La première injection (2.000 l/h pendant 8 heures) conduit à un accroissement rapide de la teneur en hydrogène, qui atteint à la fin de l'injection 49 %, CO restant très faible. CO<sub>2</sub> atteint 30 %. Le gaz est donc constitué presque uniquement par du gaz à l'eau élaboré à basse température.

Les autres injections sont moins prolongées et conduisent à des teneurs beaucoup moins élevées. Lorsqu'on cesse l'injection, la teneur en hydrogène diminue d'abord rapidement puis beaucoup plus lentement.

Au cours du cycle est-ouest du 11 au 18 janvier, des injections discontinues (1.500 à 2.000 l/h pen-

dant 2 à 3 heures) produisent un effet analogue, mais moins marqué, que celui observé dans les cycles précédents. Par contre une injection continue de 600 l/h, prolongée pendant 75 heures, conduit à un gaz à peu près constant, défini par :

CO 4 %  
H<sub>2</sub> 15 %  
PCS 570 calories.

Au cours de ces 75 heures, la température du gaz baisse très lentement de 418 à 385°.

Entre temps une panne des soufflantes a obligé à réduire le débit, tandis que les fuites continuent à s'amplifier. Il paraît difficile de les réduire sans apporter aux têtes de descenderies des modifications importantes. Par ailleurs, l'incertitude dans laquelle on se trouve concernant le déplacement du feu, laisse craindre que celui-ci ne s'approche de la surface en certains points. Estimant que la poursuite de l'essai ne peut plus fournir d'enseignements intéressants, on le suspend le 25 janvier.

### 3. — RESULTATS ET INTERPRETATION

Bien des observations effectuées au cours de l'essai restent d'une interprétation délicate. L'exploration du chantier après l'essai permettra certainement d'expliquer quelques-unes d'entre elles. Les travaux d'exploration étant encore peu avancés, l'interprétation que nous donnons ci-dessous doit être considérée comme provisoire et méritera sans doute d'être révisée.

#### a) Pouvoir calorifique du gaz.

Le graphique de la figure 13 donne la valeur moyenne, pour chaque cycle d'inversion, du pouvoir calorifique du gaz sec. Elle a été calculée d'après les teneurs du gaz en CO et H<sub>2</sub> mesurées à l'appareil d'Orsat; elle est donc estimée par défaut, le gaz renfermant presque toujours une faible proportion de méthane (de l'ordre de 0,5 à 1 %). (1 % de méthane correspond à 90 cal/m<sup>3</sup>).

La valeur moyenne du pouvoir calorifique pour l'ensemble de l'essai, déduite de ce graphique en supposant le débit constant, est égale à 270 cal/m<sup>3</sup>. La valeur moyenne réelle pour l'ensemble de l'essai est notablement supérieure à ce chiffre, car le pouvoir calorifique a varié dans le même sens que le débit. On peut l'estimer à 350 cal/m<sup>3</sup>.

Ce dernier chiffre ne suffit pas à caractériser le résultat de l'essai.

En effet, le pouvoir calorifique a varié au cours de chaque cycle. Il eut été possible de produire un gaz nettement plus riche si on n'avait retenu que le gaz recueilli pendant une fraction de chaque cycle; par exemple au cours d'un cycle de 24 h, tel que celui du 18 septembre, pour lequel le pouvoir calorifique moyen a été de 450 calories, un gaz de 650 calories a été obtenu pendant 8 heures consécutives. De même au cours du cycle de 24 h du 18 novembre, pour lequel le pouvoir calorifique moyen était beaucoup plus faible et égal à 180 calories, un gaz à 500 calories a été recueilli pendant 8 heures consécutives.

Au total le pouvoir calorifique a été :

supérieur à 600 calories pendant 223 h, soit 6 % de la durée de l'essai;  
supérieur à 500 calories pendant 471 h, soit 13 % de la durée de l'essai;  
supérieur à 400 calories pendant 850 h, soit 23 % de la durée de l'essai;  
supérieur à 300 calories pendant 1.320 h, soit 36 % de la durée de l'essai.

D'autre part le pouvoir calorifique du gaz a varié beaucoup pendant l'essai. Parmi les causes de ces variations, les plus importantes sont certainement :

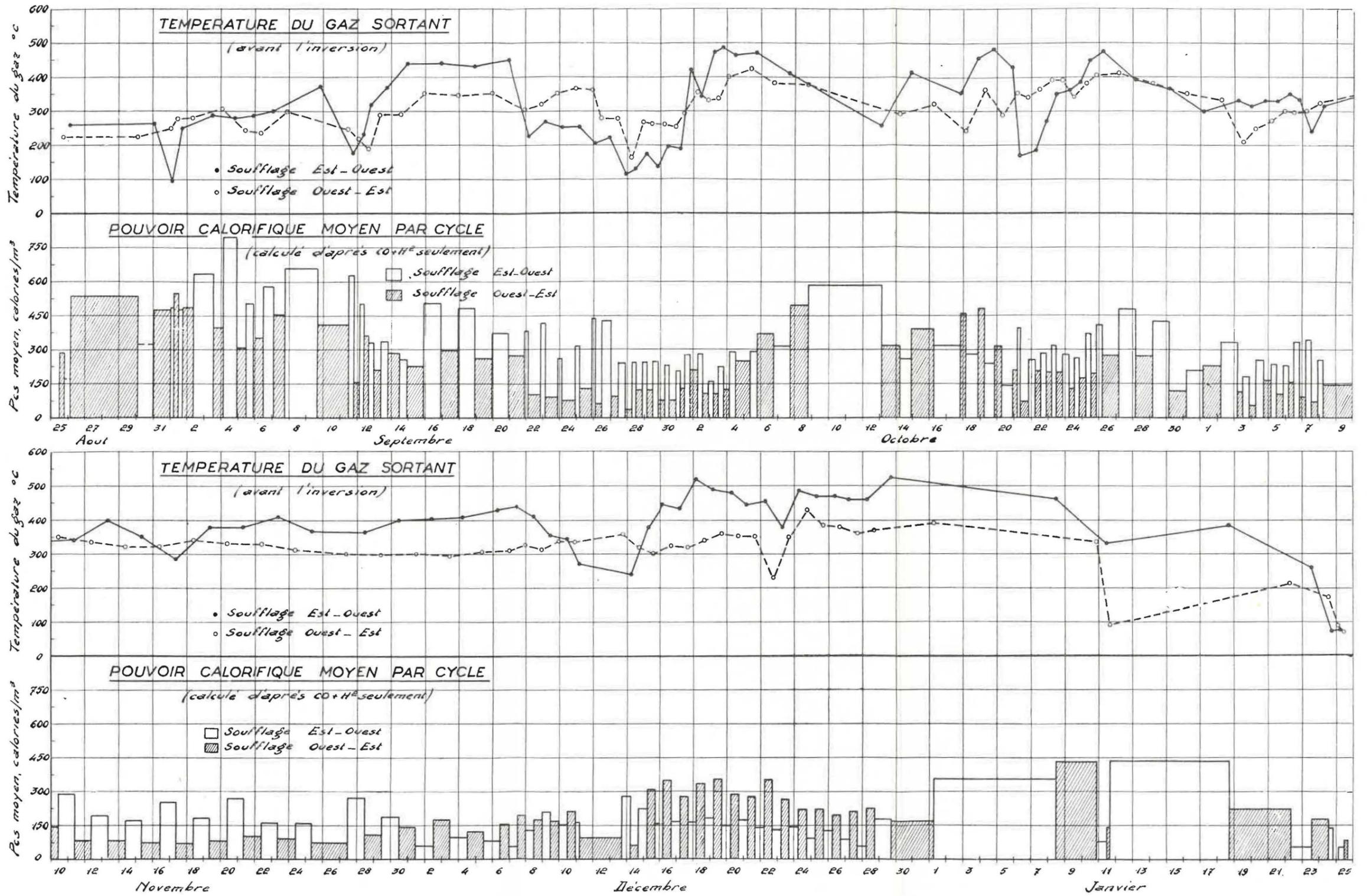
- 1) l'évolution de la structure du chantier et notamment de la répartition du courant gazeux entre le front et l'arrière-taille;
- 2) la diminution du débit circulant effectivement dans le chantier par suite de l'extension des fuites et des divers incidents de ventilateurs.

Si la première cause paraît inévitable et fait véritablement partie des données du problème, la seconde résulte surtout des caractéristiques de l'installation, et celles-ci pourraient être, grâce à l'expérience acquise, grandement améliorées au cours d'un nouvel essai. Il conviendrait notamment de choisir des ventilateurs plus puissants, de creuser les têtes de descenderies au rocher, de les encastrer plus profondément dans les terrains, et de leur donner des dimensions telles qu'elles puissent résister à une pression de l'ordre de 1 kg/cm<sup>2</sup>.

Il est difficile de distinguer exactement les effets de ces deux causes. Cependant, malgré qu'une étude systématique de l'influence du débit n'ait pu être effectuée, il ne nous paraît pas douteux que la qualité du gaz croisse avec le débit. Cela ressort de nombreuses observations peu précises mais convergentes. Le même fait a d'ailleurs été observé également dans la plupart des expériences de gazéification souterraine.

On ne peut évidemment conclure de façon certaine que l'absence de fuites aurait permis de maintenir

Fig. 13



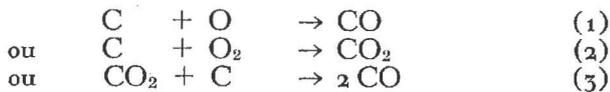
pendant tout l'essai un pouvoir calorifique voisin de celui observé au cours des quinze premiers jours, soit 500 calories, mais cela paraît assez vraisemblable.

## b) Elaboration du gaz. - Rôle de l'eau introduite dans le chantier.

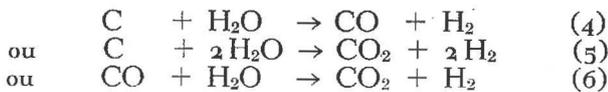
### a) Nature du gaz.

Le gaz combustible élaboré peut provenir :

- soit de la distillation du charbon;
- soit des réactions du gaz à l'air :



- soit enfin des réactions du gaz à l'eau :



La distillation des matières volatiles accompagnée de la combustion complète en  $\text{CO}_2$  de tout le carbone fixe, produirait un gaz ayant à peu près la composition suivante (tableau V) :

TABLEAU V.

$\text{H}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
3 %	19,5 %	77,5 %

dont le pouvoir calorifique serait voisin de 90 cal/ $\text{m}^3$ .

Les réactions du gaz à l'air associées à la distillation des matières volatiles, conduiraient à un gaz renfermant de l'oxyde de carbone en proportion d'autant plus élevée qu'elles sont plus poussées mais dont la teneur en  $\text{H}_2$  resterait de l'ordre de 3 à 4 %.

Or les gaz combustibles obtenus renferment toujours une teneur en hydrogène importante, presque toujours supérieure et souvent très nettement supérieure à la teneur en oxyde de carbone. Il faut en conclure que les réactions du gaz à l'eau ont joué le rôle prédominant, et parmi elles la réaction (5) conduisant à la production simultanée de  $\text{H}_2$  et de  $\text{CO}_2$  sans  $\text{CO}$  (ou la combinaison (4) + (6) qui lui est équivalente); la faible teneur en oxyde de carbone montre que le gaz a été élaboré à une température relativement basse.

Les réactions du gaz à l'air semblent avoir été négligeables, à l'exception de quelques cycles au début de l'essai. Enfin, le gaz de distillation a fourni un apport constant mais toujours très limité à cause de la faible teneur en matières volatiles du charbon. On peut donc conclure que le gaz produit est surtout constitué par du gaz à l'eau.

### β) Importance de l'eau introduite dans le chantier.

La quantité d'eau introduite dans le chantier ne peut être évaluée avec précision, car on n'a pas mesuré la teneur en vapeur d'eau du gaz. On a pu

toutefois l'apprécier à divers instants de l'essai par une des deux méthodes suivantes :

1) On détermine directement la valeur des fuites en fonction de la pression de soufflage. Pour ce faire, on obture les deux cheminées et on mesure les débits qui sont nécessaires pour maintenir chacune des têtes de descenderies sous une certaine pression. Mesurant le débit total de gaz humide et calculant le débit de gaz sec par le bilan-matière (corrigé pour tenir compte des fuites), on en déduit par différence la teneur en vapeur d'eau du gaz.

De telles mesures de fuites n'ont été effectuées que rarement, car elles obligent à interrompre l'essai.

2) Après chaque inversion, la variation de la température du gaz en fonction du temps a l'allure suivante (Fig. 14) : elle présente un palier terminé par un point anguleux et suivi d'une croissance rapide. L'ordonnée du point anguleux est égale à la température du point de rosée de la vapeur d'eau du gaz. Il est facile d'en déduire la teneur en vapeur d'eau.

Cette seconde méthode ne nous renseigne pas sur la teneur en vapeur d'eau moyenne, car la teneur en vapeur d'eau varie au cours d'un cycle; elle est en particulier notablement plus élevée pendant les premiers instants de chaque cycle. Si, cependant, le palier de la courbe de température est assez long (il dure parfois 4 à 6 heures), la valeur ainsi obtenue est assez significative.

La teneur en vapeur d'eau du gaz est généralement très élevée; elle est estimée en moyenne à 50 % entre le 15 et le 22 décembre. Elle a certainement dépassé cette valeur au cours des périodes à débit plus faible et succédant à des pluies abondantes. Elle était par contre moins élevée pendant le début de l'essai, lorsque le débit était encore important. Le chiffre de 40 % peut donc être considéré comme assez représentatif de l'ensemble de l'essai. La teneur de 50 % relevée entre le 15 et le 22 décembre correspond à l'introduction, dans le chantier, de 1,5  $\text{m}^3$  d'eau par heure, soit 36  $\text{m}^3$ /jour, et à un taux d'injection de 6 à 7 kg d'eau par kg de charbon brûlé. La teneur de 40 % correspond à un taux d'injection de vapeur de 4 kg d'eau par kg de charbon brûlé.

### γ) Origine de l'eau.

Si l'on excepte les quelques injections d'eau volontaires effectuées vers la fin de l'essai, la vapeur d'eau entraînée par le gaz provient évidemment des terrains. Il semble qu'on puisse assigner à cette eau deux origines distinctes :

1) L'eau de pluie tombant au voisinage immédiat du chantier s'infiltré dans le sol et pénètre directement dans le chantier; son introduction est irrégulière et reflète le régime des pluies avec un certain décalage dans le temps, de l'ordre de quelques jours.

2) En l'absence de pluies, le chantier reçoit une venue d'eau régulière que l'on a observée tant au cours des travaux préparatoires (où on l'a estimée à 10  $\text{m}^3$  par jour) qu'au cours des travaux d'exploration. Pendant tout l'essai, le niveau piézométrique mesuré dans le puits s'est établi un peu au-dessus

du niveau de la galerie de base. Cette eau provient vraisemblablement du banc de grès perméable situé au toit de la couche et alimenté lui-même par des infiltrations lointaines. La fraction perméable des terrains est donc restée saturée d'eau jusqu'à un certain niveau, peu inférieur à celui du chantier; cette eau a été portée à une température suffisante pour qu'une fraction importante s'évapore de façon continue et pénètre dans le chantier. La venue d'eau devrait donc diminuer au fur et à mesure que le chantier s'élève. Remarquons que ce niveau dépend certainement de la pression régnant dans le chantier et que celle-ci est de l'ordre de  $500 \text{ g/cm}^2$ , soit 5 m d'eau. On conçoit que les variations de pression accompagnant les inversions puissent engendrer des mouvements importants de migration de l'eau dans les terrains.

#### δ) Action de l'eau sur le chantier.

Il est évident que l'eau doit réagir plus ou moins sur le charbon suivant l'endroit du chantier où elle est introduite, les réactions du gaz à l'eau ne pouvant se développer qu'aux endroits où la température est suffisamment élevée. Les principales observations faites à ce sujet sont les suivantes :

1) Au cours de la longue période s'étendant du 7 novembre au 7 décembre, et caractérisée par un débit d'air faible limité par les fuites, la teneur en vapeur d'eau du gaz est demeurée importante mais le pouvoir calorifique est resté très bas. La vapeur d'eau introduite dans le gaz provenait uniquement de la venue d'eaux profondes, sa teneur était élevée par suite du faible débit d'air. Elle n'a à peu près pas réagi sur le charbon.

On peut, pour l'expliquer, supposer :

- soit que la température du chantier était trop faible par suite de la réduction du débit; mais la teneur en oxygène du gaz étant restée toujours nulle, même pendant cette période, il existait tout de même une zone de combustion où la température devait être élevée;
- soit, plus vraisemblablement, que la vapeur débouchait dans le chantier dans une zone relativement froide. Il est probable qu'elle pénétrait vers la sortie du chantier, là où la pression était la plus faible, alors que la zone de combustion se trouvait vers l'entrée du chantier.

Quoi qu'il en soit de cette interprétation, il est bien établi que la vapeur d'eau provenant de la venue d'eaux profondes n'a pas pratiquement réagi sur le charbon, du moins durant cette période. Il est vraisemblable, au contraire, qu'au début de l'essai il en a été autrement, peut-être parce que le niveau de l'eau se trouvait alors plus près du chantier;

2) Les pluies violentes ont été toujours suivies d'une amélioration du gaz par formation de gaz à l'eau. Il s'est écoulé généralement entre les deux phénomènes un délai de 3 à 4 jours; cette amélioration n'est d'ailleurs que passagère; si les pluies se prolongent, le chantier se refroidit et le pouvoir calorifique du gaz tombe à une valeur inférieure à celle qu'il avait avant les pluies. Cela tient vraisemblablement à ce que seule une faible partie de l'eau introduite réagit en donnant du gaz combustible, mais que la plus grosse fraction se vaporise

sans réagir; elle consomme donc une partie importante de la chaleur emmagasinée dans le massif sans produire d'effet utile;

3) Immédiatement après chaque inversion on a observé, pendant presque tout l'essai, une courte période de production de gaz à l'eau très riche. Le mécanisme de sa formation nous paraît être le suivant: supposons, pour faciliter le langage, qu'il s'agisse d'une inversion faisant passer le courant gazeux du sens ouest-est au sens est-ouest. Immédiatement avant l'inversion la pression dans le chantier est voisine de  $400$  à  $500 \text{ g/cm}^2$  à l'extrémité ouest et voisine de 0 à l'extrémité est. Aussitôt après l'inversion la répartition des pressions est inversée. Il en résulte vraisemblablement un afflux d'eau ou de vapeur d'eau vers l'extrémité ouest du chantier. Or cette région qui se trouvait sur l'entrée d'air avant l'inversion est encore très chaude si, comme nous le supposons au § d), la combustion s'amorce dès l'entrée d'air, quel que soit le sens du soufflage. L'eau qui y pénètre peut donc réagir, mais le phénomène n'est que passager car la combustion s'est, après l'inversion, déplacée vers l'est, et l'ouest se refroidit. Le fait que le feu ait été presque toujours plus actif dans l'ouest du chantier explique que ce phénomène ait été plus marqué dans le sens est-ouest.

Un phénomène analogue a été observé, d'ailleurs, lors des essais de régime pulsatoire (19-21 septembre): pendant la phase de faible débit la proportion de gaz à l'eau est en moyenne plus importante ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2$  plus élevés) que pendant la phase à fort débit, sans doute parce que la proportion de vapeur d'eau introduite dans le chantier est plus élevée (venues d'eau constantes, débit d'air réduit). En outre (Fig. 15) au début de la phase de faible débit on observe une pointe de production de gaz à l'eau plus riche, qui s'explique sans doute également par une introduction rapide d'eau dans le chantier résultant de la modification de pression dans le chantier;

4) La réaction sur le charbon de l'eau injectée volontairement semble avoir été importante. En particulier, l'injection continue de  $600 \text{ l/h}$  maintenue pendant 75 h, du 15 au 18 janvier, a conduit à un taux de réaction de la vapeur d'eau égal à 0,3 à 0,4 (si l'on néglige la réaction des autres venues d'eau). Cela est dû, sans doute, à ce que l'eau injectée par l'entrée d'air parcourt tout le chantier et peut venir ainsi au contact des zones les plus chaudes.

La perte par chaleur totale de la vapeur non décomposée est peu supérieure à celle qu'on peut rencontrer dans un gazogène classique. L'injection d'eau paraît donc capable de transformer une partie de la chaleur sensible du gaz en chaleur latente sans introduire de pertes supplémentaires considérables. Elle ne peut évidemment être pratiquée de façon continue que si les autres pertes (pertes par le massif et pertes par vaporisation de l'eau introduite involontairement dans le chantier) ne sont pas telles que la chaleur sensible du gaz reste faible, même sans injection, ce qui a été généralement le cas au cours de l'essai.

## c) Bilan thermique.

Les mesures effectuées durant l'essai permettent d'établir le bilan thermique de l'ensemble constitué par le chantier proprement dit, les descenderies et les régénérateurs.

Avec les approximations et les notations adoptées pour l'établissement du bilan matière, le bilan thermique s'établit comme suit : (en prenant toujours pour base 1.000 molécules d'air sec à l'entrée).

## Entrées :

$Q_1$  : pouvoir calorifique supérieur de  $g$  kg de charbon;

$Q_2$  : pouvoir calorifique supérieur des matières volatiles provenant de  $(d-g)$  kg de charbon.

## Sorties :

$q_1$  : pouvoir calorifique supérieur du gaz sec;

$q_2$  : chaleur sensible du gaz sec à la température de la cheminée;

$q_3$  : chaleur totale de la vapeur d'eau entraînée par le gaz à la température de la cheminée;

$q_4$  : chaleur cédée aux terrains.

Le calcul de  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ , n'offre aucune difficulté à partir du bilan-matière. La quantité  $q_3 + q_4$  s'obtient par différence. La teneur en vapeur d'eau du gaz n'ayant pas été évaluée régulièrement, il n'est pas possible d'apprécier le terme  $q_3$  ni, par conséquent, le terme  $q_4$  avec précision; on ne possède à leur sujet que des ordres de grandeur très approximatifs.

On peut définir, comme pour un gazogène classique :

— soit le rendement à chaud :

$$r_1 = \frac{q_1 + q_2}{Q_1 + Q_2}$$

si la chaleur sensible du gaz peut-être considérée comme utilisable;

— soit le rendement à froid :

$$r_2 = \frac{q_1}{Q_1 + Q_2}$$

dans le cas contraire.

La somme  $q_3 + q_4$  représente dans tous les cas une perte. Ce bilan ne tient pas compte de la perte par imbrûlés solides résultant de la combustion incomplète du charbon restant dans l'arrière-taille.

\* \* \*

Dans le tableau VI figurent les bilans thermiques établis pour 5 périodes caractéristiques de l'essai.

Il appelle les commentaires suivants :

## Période 1 (7 sept.-11 sept.) (Fig. 5).

Cette période caractérise le début de l'essai. Les fuites sont déjà sensibles mais encore limitées.

Le rendement à chaud est égal à 53 %. La teneur en vapeur d'eau du gaz, évaluée d'après son point de rosée, serait égale à 44 %, ce qui conduirait à partager la perte totale, égale à 47 %, en :

13 % cédés au massif;

34 % consommés par la vaporisation de l'eau apportée par les terrains.

Cette teneur de 44 % est certainement évaluée par excès; le chiffre de 13 % représente donc une limite inférieure de la perte au massif.

## Période 2 (6 oct.-8 oct.) (Fig. 8).

C'est l'une des périodes où, après divers incidents ayant contribué à refroidir le chantier, il a été possible d'obtenir un gaz de pouvoir calorifique appréciable en multipliant les inversions. Le rende-

TABLEAU VI.

Période	1	2	3	4	5
Date	7 sept., 19 h au 11 sept., 21 h	6 oct., 18 h au 8 oct., 17 h 30	9 oct., 8 h 30 au 13 oct., 5 h	18 nov., 10 h au 20 nov., 11 h	12 janv., 6 h au 18 janv., 18 h
$Q_1$	20.400	27.730	34.900	19.800	30.900
$Q_2$	3.520	970	— 2.340	4.210	— 210
$Q = Q_1 + Q_2$	52.920	28.700	32.560	24.010	30.690
$q_1$	15.464	10.670	16.600	2.680	13.750
$q_2$	2.030	2.742	2.480	1.630	2.770
$q_3 + q_4$	15.426	15.288	13.480	4.310	14.170
$r_2 = \frac{q_1}{Q}$	47 %	37 %	51 %	11 %	45 %
$\frac{q_2}{Q}$	6 %	10 %	8 %	7 %	9 %
$\frac{q_3 + q_4}{Q}$	47 %	53 %	41 %	82 %	46 %
$\frac{Q}{q_1 + q_2}$	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
$r_1 = \frac{Q}{q_1 + q_2}$	53	47	59	18	54

ment à chaud est peu inférieur à celui obtenu dans la période 1, mais la chaleur sensible du gaz représente une fraction plus grande (20 %) de sa chaleur totale.

#### Période 3 (9 oct.-13 oct.).

Cette période, très particulière, est caractérisée à la fois par une réduction très marquée du débit d'air et une introduction importante d'eau de pluie dans le chantier. La différence ( $d - g$ ) est négative. Cela signifie que la combustion et la gazéification portent en partie sur du charbon préalablement distillé. Les réactions de gaz à l'eau sont en outre très importantes.

Il est vraisemblable que la teneur en eau du gaz excédait alors 50 %. Il en résulte que  $q_4$  est négatif (une teneur en eau de 40 % conduirait déjà à  $q_4 = 0$ ). Le terrain cède donc de la chaleur au gaz; la température du chantier décroît. La température du gaz décroît d'ailleurs au cours du cycle.

#### Période 4 (18 nov.-20 nov.) (Fig. 10).

Elle caractérise la marche prolongée à faible débit du mois de novembre. La qualité du gaz est très médiocre. La teneur en vapeur d'eau du gaz reste voisine de 50 %. La perte totale se monte à 80 % et se décompose à peu près en :

- 30 % cédés au massif;
- 50 % correspondant à la chaleur totale de la valeur d'eau du gaz.

#### Période 5 (12 janv.-18 janv.) (Fig. 12).

Cette période est marquée par les essais d'injection d'eau. Comme pour la période 3, ( $d - g$ ) est négatif et les réactions du gaz à l'eau sont importantes. Il est vraisemblable que la totalité des pertes est constituée, là encore, par la chaleur totale de la vapeur d'eau et que le massif cède un peu de chaleur au gaz; d'ailleurs la température de celui-ci baisse légèrement.

\* \* \*

L'examen de ces exemples caractéristiques conduit aux observations suivantes :

1) Lorsque le débit est relativement important, le rendement est de l'ordre de 50 %, la chaleur sensible du gaz représentant 15 à 20 % de la chaleur totale. Les pertes représentent au total 50 % et se partagent vraisemblablement en :

- 20 % cédés au massif et
- 30 % consommés par la vaporisation et l'échauffement de l'eau introduite dans le chantier.

2) Lorsque le débit est réduit, les pertes atteignent 80 %, dont environ 30 % absorbés par le massif et 50 % par la vaporisation de l'eau.

3) Avec un débit réduit, il est possible d'atteindre un rendement dépassant 50 % par introduction d'eau dans le chantier, soit volontairement (période 5), soit involontairement (période 3), mais un tel régime ne peut être entretenu de façon permanente, car il nécessite la récupération de chaleur précédemment emmagasinée dans le massif.

\* \* \*

La variation des pertes en fonction du débit d'air peut s'expliquer de la manière suivante :

L'oxygène de l'air étant toujours complètement consommé, la quantité de charbon brûlé, et par conséquent la quantité de chaleur utilisable ( $Q_1 + Q_2$ ) est, en gros, proportionnelle au débit d'air  $D$ . Si l'on admet que la venue d'eau est indépendante du débit (il semble qu'il en soit bien ainsi des venues d'eaux profondes), la quantité d'eau vaporisée par kg de charbon brûlé varie en raison inverse du débit  $D$ .

En ce qui concerne la chaleur cédée au massif, le résultat est moins évident. On peut approximativement faire le raisonnement suivant :

Lorsque le débit d'air  $D$  augmente, la quantité de chaleur  $q_1 + q_2$  dégagée croît proportionnellement au débit, la température du chantier  $\theta$  s'élève, la température du gaz, et probablement son pouvoir calorifique, vont en croissant; en tout cas le pouvoir calorifique n'est pas décroissant. La somme  $q_1 + q_2$  est le produit d'une fonction croissante de  $\theta$  par le débit  $D$ , le rendement :

$$\frac{q_1 + q_2}{Q_1 + Q_2}$$

est donc une fonction croissante de  $\theta$  donc de  $D$ .

On peut encore raisonner comme suit :

La vitesse moyenne avec laquelle le chantier progresse dans la direction perpendiculaire à la galerie de feu est proportionnelle à la quantité de charbon consommée, donc au débit d'air  $D$ . Une certaine masse de terrain, de part et d'autre de la couche, s'échauffe au passage du chantier. Si la vitesse croît, la chaleur n'a pas le temps de se propager aussi loin; l'épaisseur des terrains échauffés est donc moins grande ou, plus précisément, à une distance donnée de la couche la température est moins élevée. La quantité de chaleur emmagasinée dans les terrains au droit d'une surface dépilée donnée (correspondant à une quantité de chaleur dégagée donnée) est donc moins grande.

\* \* \*

Quoi qu'il en soit de cette interprétation, il résulte des résultats observés que le faible rendement thermique de l'essai est dû essentiellement à deux causes :

- 1) Faiblesse du débit qui joue à la fois sur les pertes au massif et les pertes par vaporisation d'eau.
- 2) Importance des venues d'eau.

Du fait que les pertes par vaporisation d'eau représentent 60 à 70 % de la perte totale on ne peut pas conclure que l'absence de venues d'eau aurait permis d'atteindre un rendement de 75 à 80 %, car la chaleur cédée au massif eût été dans ce cas plus grande. D'une part la température du chantier aurait sans doute été plus élevée, d'autre part l'isotherme 100°, que la présence des venues d'eau a fixée sans doute à faible distance du chantier (du moins vers le bas) se serait déplacée plus loin. Au total la masse des terrains échauffés aurait été plus

étendue et portée à une température plus élevée. Il est certain, toutefois, que le rendement eut été nettement supérieur à ce qu'il a été.

#### d) Extension et déplacement du feu.

Les mesures de températures dans le chantier ont été peu nombreuses et souvent incertaines. Il est possible, toutefois, de tirer quelques enseignements d'une part des variations de la température du gaz à la cheminée, mesurée avec précision pendant tout l'essai, d'autre part des indications, au début de l'essai seulement, des pyromètres placés dans chaque descenderie.

Les conclusions auxquelles on aboutit sont les suivantes :

1) Le feu s'est déclaré d'abord à l'extrémité ouest du chantier. Le brûleur servant au préchauffage était placé, rappelons-le, en tête de la descenderie ouest.

2) Le feu s'est maintenu dans la moitié ouest du chantier pendant une dizaine de jours puis, le 2 septembre, *alors qu'on soufflait dans le sens est-ouest*, il s'est amorcé à l'extrémité est du chantier. L'apparition du feu à cet endroit résulte non pas d'un déplacement vers l'est de la zone de feu primitive, mais bien d'un nouvel allumage à l'entrée du chantier dans des conditions analogues à celles du premier allumage à l'extrémité ouest. La descenderie et le régénérateur est se sont progressivement échauffés lors des premiers cycles ouest-est et ont atteint, le 2 septembre, une température suffisante pour que l'introduction d'air par l'est déclenche l'inflammation à l'entrée du chantier.

3) Il est vraisemblable que dans la plupart des cas, immédiatement après chaque inversion, la tête de la zone de feu s'est fixée à l'entrée du chantier. Cela résulte des deux observations suivantes :

a) Le premier allumage en est s'est produit le 2 septembre, alors que la température de sortie du gaz avait atteint 300° immédiatement avant l'inversion. Le même phénomène a dû se reproduire chaque fois que la température de sortie du gaz dépassait 300° avant l'inversion, ce qui a été le cas général.

β) Au début de l'essai, l'un au moins des pyromètres situés à la base de la descenderie d'entrée d'air accuse aussitôt après l'inversion une élévation rapide. Or, le renversement du sens du courant d'air tendrait à les faire décroître s'il n'y avait en ce point un dégagement de chaleur dû à une combustion. Ce phénomène se manifeste successivement sur les pyromètres situés à la cote — 40, puis — 35, puis — 30, ce qui montre que la tête de la zone de feu remonte progressivement dans la descenderie d'entrée d'air au cours de l'essai.

4) Sur le déplacement ou l'extension de la zone de feu au cours d'un cycle, nous savons peu de choses. Il semblerait qu'au bout d'un certain temps la zone de feu se déplace vers l'aval, c'est-à-dire dans le sens du courant gazeux. C'est du moins ce que laisse supposer la décroissance, succédant à l'élévation brusque, de la température indiquée par les couples situés à la base de la descenderie d'entrée d'air. Ce déplacement vers l'aval ne se produirait d'ailleurs pas dans tous les cas; il serait dû

au refroidissement au cours du cycle du courant d'air atteignant le chantier.

Les conclusions précédentes permettent d'interpréter comme suit le fait qu'au début de chaque cycle on observe, après une très courte période de gaz à l'eau, une période assez courte de gaz riche en produits de distillation, d'ailleurs en grande partie brûlés (CO<sub>2</sub> faible, d/g élevé, e positif).

Après l'inversion, le feu s'établit brusquement à l'entrée du chantier dans une zone refroidie au cours du cycle précédent par la venue d'eau et où avait disparu toute combustion. Il tend en outre à remonter dans la descenderie d'entrée d'air dans une zone de charbon vierge non distillé. L'établissement de cette combustion provoque la distillation du massif sur une certaine profondeur. Il se dégage donc une quantité de matières volatiles supérieure à celle correspondant à la teneur en matières volatiles du charbon brûlé. La plus grande partie de ces matières volatiles est d'ailleurs libérée vers l'entrée du chantier où la teneur en oxygène est élevée; elle est donc en grande partie brûlée.

Ce phénomène ne se manifeste pas immédiatement après l'inversion car il exige que la chaleur ait eu le temps de se transmettre en profondeur dans le massif. En outre, il est masqué aussitôt après l'inversion par la production de gaz à l'eau à l'extrémité opposée du chantier, qui a des effets contraires sur la qualité du gaz (CO<sub>2</sub> élevé, e négatif) (voir § b, 8, 3).

#### e) Etendue de la zone dépilée. - Quantité de charbon consommée.

L'établissement du bilan matière permet de calculer la quantité de charbon g gazéifiée par 1.000 molécules d'air soufflé. On en déduirait la quantité totale de charbon gazéifié si les fuites avaient pu être mesurées, puisque celles-ci se sont produites à peu près uniquement en amont du chantier. Malheureusement nous ne les connaissons pas avec précision. Pour l'ensemble de l'essai le calcul conduit, en négligeant les fuites, à 1.950 tonnes; les fuites ayant été comprises entre 30 et 50 %, la masse de charbon gazéifié doit se situer entre 1.000 et 1.350 tonnes, soit une moyenne de 6 à 8 t/j. Si la progression du feu a été uniforme sur toute l'épaisseur de la couche, et si les imbrûlés demeurés en arrière du front sont négligeables, la surface dépilée est de l'ordre de 700 à 1.000 m<sup>2</sup>, soit une hauteur moyenne de 7 à 10 mètres et une progression moyenne de 4,6 à 6,6 cm par jour.

Des sondages effectués jusqu'à ce jour, il résulte que la hauteur de la zone dépilée est comprise entre 8 et 12 m dans la partie ouest du panneau. Il est probable qu'elle est encore plus faible dans la partie est. On peut donc en conclure que la quantité de charbon incomplètement brûlé demeuré en arrière du front est peu importante.

#### f) Comportement des terrains.

Les travaux d'exploration entrepris après l'essai sont trop peu avancés pour qu'on puisse avoir, sur le comportement des terrains, des idées précises. On dispose actuellement des éléments suivants :

1) La perte de charge à travers le chantier s'est élevée rapidement dès le début de l'essai; elle est restée de l'ordre de 500 g/cm<sup>2</sup> pour un débit de 2.000 à 3.000 m<sup>3</sup>/h (compte tenu des fuites) tout en subissant des variations brusques très importantes atteignant, par exemple, 750 g/cm<sup>2</sup> pour un débit de 500 m<sup>3</sup>/h. Les augmentations brusques sont certainement dues à des éboulements de charbon ou des épontes; les diminutions brusques proviennent, plus vraisemblablement, d'un accroissement des fuites. Un dépouillement précis de ces variations serait illusoire à cause de l'incertitude sur les fuites. On peut seulement noter que la perte de charge est toujours restée nettement plus élevée dans la moitié ouest du panneau que dans la moitié est.

2) Le volume libre du chantier a été évalué vers la fin de l'essai en le mettant sous pression et en suivant la variation de pression, les orifices des descenderies étant obstrués, et le gaz s'échappant uniquement par les fuites. Il était de l'ordre de 70 m<sup>3</sup>, soit une section moyenne de 0,70 m<sup>2</sup>.

3) La base de la descenderie ouest a pu être atteinte après l'essai par le puits et le petit travers-bancs accédant au chantier. Les drains qui la remplissent sont obstrués par des mâchefers et des schistes fondus. Le banc inférieur du toit est franchement fondu; il s'est affaissé contre le mur et a été suivi par des bancs supérieurs partiellement fondus.

\* \* \*

De ces diverses observations on peut conclure que l'arrière-taille a été constamment obstruée par des éboulis du toit et peut-être, à certains moments, par des éboulis de charbon. Il n'en résulte pas nécessairement que le courant gazeux n'a pu s'égarer au milieu des éboulis stériles et qu'il a circulé uniquement au contact du charbon. Il faudrait encore, pour qu'il en soit ainsi, que le voisinage du front ait été suffisamment dégagé de façon à être plus perméable au courant gazeux que l'arrière-taille. Le fait que l'oxygène ait été constamment absent du gaz sortant du chantier incite à penser que cette condition a bien été réalisée, mais on ne saurait l'affirmer. L'accroissement rapide de la résistance du panneau ouest dès le début de l'essai peut être imputé soit à l'obstruction des drains occupant la base de la descenderie ouest, soit à l'affaissement rapide du toit par fusion dans ce panneau où le feu était localisé au début de l'essai. Ceci ne suffit pas à expliquer la localisation de la résistance dans la moitié ouest pendant tout l'essai. La rencontre d'une serrée au cours du fonçage de la descenderie ouest laisse supposer que la puissance de la couche pouvait être localement réduite à l'ouest du chantier, ce qui aurait permis aux épontes de se rejoindre rapidement derrière le front de feu.

Le fait que le gaz produit en soufflant dans le sens est-ouest a été presque toujours d'une qualité supérieure à celui obtenu dans le sens ouest-est nous paraît résulter de ce que le contact du charbon et du courant gazeux était mieux réalisé dans la partie ouest que dans la partie est. Lorsque, exceptionnellement, le sens ouest-est s'est avéré le plus favorable, diverses observations laissent pen-

ser, que des éboulements améliorant le contact du gaz et du charbon s'étaient précisément produits à l'est du chantier. Des constatations analogues ont d'ailleurs été recueillies au cours du deuxième essai de Gorgas.

#### g) Influence de la fréquence des inversions.

Nous avons signalé, dans le journal de l'essai, que l'augmentation de la fréquence des inversions avait été utilisée à diverses reprises pour réchauffer le chantier, ce réchauffage devant permettre ensuite d'obtenir, avec une période d'inversion plus longue, un gaz de meilleure qualité. Ce fait mérite quelques commentaires :

Si on considère la courbe représentant la « température du gaz avant inversion » en fonction du temps (Fig. 13), on constate deux choses :

1) Lorsque la fréquence des inversions vient à être augmentée, la température du gaz avant l'inversion décroît brusquement, puis croît régulièrement à chaque nouvelle inversion pour tendre vers une limite.

2) le nouveau palier de température ainsi atteint est supérieur à celui dont on est parti.

On observerait un résultat analogue en considérant la « température moyenne du gaz pendant chaque cycle ».

Le premier phénomène résulte simplement du mécanisme de récupération de la chaleur dans les descenderies et les régénérateurs. On observerait un phénomène analogue dans un four quelconque muni de deux régénérateurs balayés alternativement par l'air et par le gaz. Si on suppose, en effet, que les phénomènes thermiques se déroulant à l'intérieur du four demeurent constants, la température du gaz à la sortie est, en régime périodique établi, indépendante de la période d'inversion  $T$ , mais si l'on modifie la durée de celle-ci il s'établit d'abord un régime transitoire au cours duquel la température du gaz varie pour reprendre progressivement sa valeur initiale.

Le second phénomène, par contre, est plus complexe et paraît difficile à expliquer. Il exige que les phénomènes se déroulant à l'intérieur du chantier varient avec la durée de la période d'inversion. En fait on constate que le pouvoir calorifique du gaz obtenu pendant les périodes d'inversion courtes est plus faible. Il en résulte que la chaleur emmagasinée dans le chantier doit croître, et on s'explique que la température de sortie du gaz aille en s'élevant, mais nous ne savons pas pourquoi précisément le pouvoir calorifique du gaz paraît d'autant plus faible que la période d'inversion est plus courte.

#### h) Réactions accessoires dans les régénérateurs.

Les deux observations suivantes montrent que les régénérateurs sont le siège de réactions chimiques.

1) En l'absence de toute réaction chimique dans les régénérateurs, la température de l'air sortant du régénérateur situé sur l'entrée d'air devrait, au cours d'un cycle, aller en décroissant uniformément. En réalité, on a presque toujours observé une

Fig. 14

Courbe de montée en température du gaz à la cheminée.

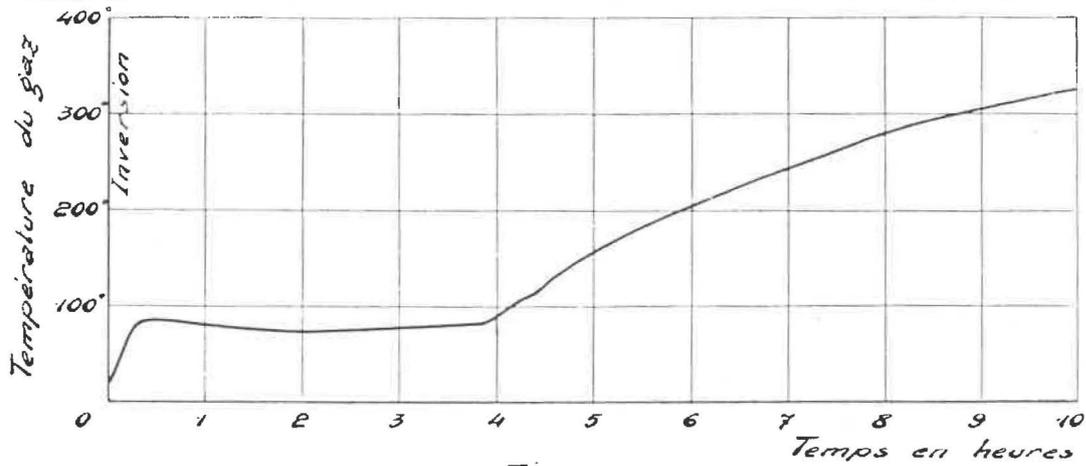


Fig. 15

Essais de régime pulsatoire  
Variations de la teneur en CO<sub>2</sub>

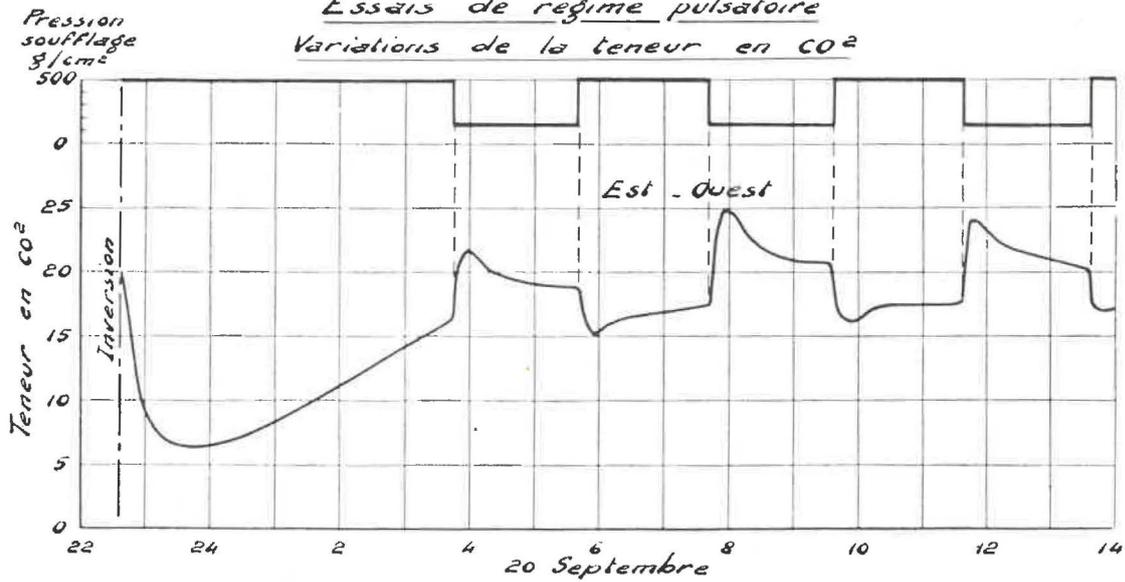
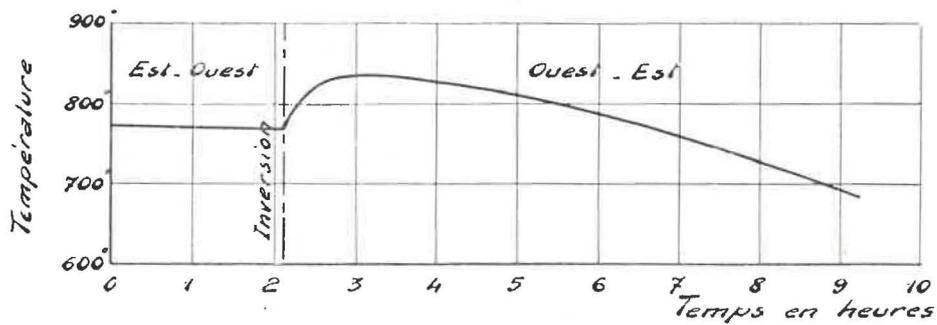


Fig. 16

Température du gaz entre régénérateur Ouest et descenderie Ouest



courbe ayant l'allure de la figure 16 et présentant, aussitôt après l'inversion, une croissance brusque suivie d'une décroissance progressive. Cette forme de courbe montre qu'une certaine quantité de chaleur est dégagée dans les régénérateurs immédiatement après l'inversion.

2) L'air sortant des régénérateurs renferme, aussitôt après l'inversion, une certaine teneur en  $\text{CO}_2$  (environ 1 %) et en  $\text{SO}_2$  (environ 2 %), et une teneur en oxygène inférieure à 21 %. Ce  $\text{CO}_2$  et ce  $\text{SO}_2$  tendent ensuite à disparaître. Des traces de  $\text{CO}_2$  ont été parfois perçues durant tout un cycle.

Il est vraisemblable que du carbone et du soufre se déposent dans le régénérateur placé sur la sortie du gaz. Ce carbone et ce soufre brûlent ensuite, lorsque, le sens du courant gazeux étant inversé, le régénérateur est parcouru par un courant d'air pur.

Nous ignorons le mécanisme qui donne naissance à ces dépôts. Le carbone peut provenir soit des suies

ou de poussières de charbon entraînées par le gaz et arrêtées par les empilages des régénérateurs, soit de réactions de dissociation de l'oxyde de carbone. Le soufre peut résulter de la condensation de vapeurs de soufre entraînées par le gaz, ou de réactions de dissociation de  $\text{H}_2\text{S}$ .

Quelques mesures ont été faites en vue de comparer la composition du gaz à l'entrée et à la sortie du régénérateur placé sur la sortie du gaz. Des variations de composition ont été effectivement observées, mais elles ne sont pas constantes; il s'agit tantôt de réactions d'oxydation, tantôt de réactions de réduction, produisant soit un accroissement soit une diminution de la teneur en  $\text{H}_2$  et  $\text{CO}$ .

Il est très vraisemblable que des phénomènes analogues se sont produits également dans les descenderies dont le remplissage par des empilages de réfractaires jouait un rôle analogue à celui des régénérateurs.

#### 4. — CONCLUSION

Le pouvoir calorifique du gaz s'est maintenu entre 500 et 600 calories pendant des périodes assez longues et répétées, sans qu'à aucun moment apparaissent des traces d'oxygène, mais il n'est pas en moyenne supérieur à 550 calories.

Ce résultat peut sembler, à première vue, médiocre; il nous paraît cependant très encourageant pour les raisons suivantes :

1) La cause essentielle de la faiblesse du rendement thermique (50 à 60 % dans les périodes les plus favorables, 20 % dans les périodes les plus défavorables) est certainement l'insuffisance du débit d'air circulant effectivement dans le chantier. Or cette insuffisance résulte elle-même de trois causes :

- résistance élevée du chantier;
- moyens de ventilation trop peu puissants;
- fuites importantes aux têtes de descenderies.

Il ne paraît pas possible d'agir sur la première cause. D'ailleurs la présence d'une résistance élevée dans le chantier semble nécessaire au développement des réactions de gazéification.

Par contre, il est facile d'accroître la puissance des ventilateurs, et il paraît possible, compte tenu de l'expérience acquise tant à Djerada qu'au cours des autres essais de gazéification souterraine effectués à l'étranger, d'améliorer considérablement l'étanchéité du chantier.

Il nous paraît bien établi qu'un accroissement du débit d'air doit entraîner une amélioration sensible du rendement. Un rendement moyen de 50 % nous paraît relativement facile à maintenir. On peut espérer atteindre 70 à 75 % (chaleur sensible comprise).

2) Le rendement thermique ayant atteint une valeur convenable, il paraît possible de transformer la plus grande partie (disons 80 à 90 %) de la chaleur totale du gaz en chaleur latente, en utilisant l'injection d'eau. Les quelques essais d'injection d'eau pratiqués à Djerada nous paraissent suffisamment démonstratifs à cet égard. A un rendement total de 50 % correspondrait donc un pouvoir calorifique de 550 à 600 calories, à un rendement

total de 70 % un pouvoir calorifique de 850 à 900 calories. L'utilisation du gaz produit ne semble donc pas poser de problèmes nouveaux. Des brûleurs à gaz classiques pourraient certainement s'en accommoder.

Le problème de la gazéification souterraine paraît donc justiciable d'une solution technique, du moins dans un gisement analogue à celui de Djerada. Il serait prématuré de porter un jugement, même approximatif, sur l'aspect économique du problème. Il est toutefois intéressant de considérer quelques chiffres. Les frais d'exploitation de l'essai proprement dit (à l'exclusion des travaux préparatoires et des essais préliminaires) se sont montés à 7 millions 500.000 francs français, dont 50 % en dépenses de personnel et 50 % en dépenses d'énergie. Cela représente environ 2 francs pour 1.000 calories de gaz extrait du chantier. Si l'on compare ce prix à celui du charbon extrait à Djerada et qui correspond à environ 0,60 fr pour 1.000 calories, l'écart peut paraître important, d'autant plus qu'il conviendrait d'ajouter aux frais d'exploitation l'amortissement des travaux préparatoires et du matériel; mais il faut tenir compte des conditions de l'essai, très différentes de celles d'une exploitation industrielle : personnel ingénieur et de maîtrise très important (représentant les 3/4 des dépenses de personnel), dépenses d'énergie considérablement majorées par les fuites (au moins multipliées par deux), extension très limitée de l'installation, ne comportant qu'un seul chantier fonctionnant à faible débit.

Ces considérations, jointes à celles développées plus haut concernant les possibilités techniques, montrent que le prix de la calorie pourrait être assez facilement ramené à une valeur comparable au prix de la calorie dans une exploitation classique.

En conclusion, si l'essai de Djerada ne fournit, en valeur absolue que des résultats assez médiocres comparés aux méthodes classiques d'exploitation, il nous a permis, par ailleurs, de dégager les causes

essentiellles de cette médiocrité et d'avoir une idée sur les possibilités de la gazéification souterraine. Les chances de réussite d'une nouvelle expérience

sont ainsi largement suffisantes pour qu'elle mérite d'être exécutée.

### Mode d'interprétation des résultats.

Le mode d'interprétation utilisé dans le dépouillement des essais de Djerada repose, comme celui dont nous avons fait usage pour les autres essais, sur les quatre équations exprimant la conservation du carbone, de l'oxygène et de l'azote.

Pour permettre une comparaison entre les chiffres cités, signalons ici les quelques différences accessoires qu'il y a dans la représentation des résultats.

Dans la note sur Djerada, on ne tient pas compte des teneurs (peu importantes) du charbon en oxygène et azote, et du gaz en  $O_2$  et  $CH_4$ .

Les quantités de charbon y sont exprimées en charbon sec, à 5,4 % de cendres et non pas en charbon net (sec et sans cendres). Réduite en charbon net, pour permettre la comparaison avec les analyses citées dans les autres chapitres, la composition de l'antracite de Djerada correspond au tableau VII.

TABLEAU VII.

Analyse immédiate				Analyse élémentaire					Pouvoir calorifique		
$H_2O$	Cendres	$C_f$	MV	C	H	O	N	S	Sup	Inf	
sur brut	sur sec				sur charbon net						
2,0	5,4	94,08	5,92	90,97	2,64	1,131	0,90	4,18	8.425	8.285	

Le « carbone fixe »  $C_f$  contient un peu d'hydrogène et assez bien de soufre (0,73 et 3,49 % respectivement du charbon net total). Les matières volatiles représentent 730 calories sur le total de 8.425 cal par kg de charbon net.

Les résultats des bilans sont rapportés au volume d'air entrant, et non au volume de gaz sortant.

La notation  $e$  (excès d'eau en molécules par 1.000 molécules d'air entrant) correspond au paramètre  $h$  ( $H_2O$  décomposé en  $Nm^3$  par  $Nm^3$  de gaz sortant) changé de signe et multiplié par le rapport des volumes d'air et de gaz. On a donc la formule de conversion :

$$h = - \frac{1}{1.000} \cdot \frac{N_2}{79} \cdot e \quad N_2 : \% \text{ d'azote dans le gaz.}$$

Quand  $e$  est positif,  $h$  est négatif : la combustion des matières volatiles masque la formation de gaz à l'eau. Si  $e$  est négatif,  $h$  est positif : la décomposition de la vapeur l'emporte quantitativement sur la combustion de l'hydrogène du charbon.

Les notations  $d$  et  $g$  (charbon distillé et charbon gazéifié) employées dans la note sur Djerada correspondent respectivement aux paramètres  $c$  et  $g'$  (charbon total et charbon gazéifié) du chapitre V (Bois-la-Dame) divisés par un facteur de proportionnalité  $F$  :

$$F = \frac{1}{22,4} \cdot \frac{N_2}{79}$$

La même proportionnalité relie les paramètres utilisés dans le bilan thermique.

$$\left. \begin{aligned} c &= F \cdot d \\ g' &= F \cdot g \\ P_g &= F \cdot q_1 \\ S_g &= F \cdot (q_2 + q_3) \\ S_k &= F \cdot q_4 \\ T - P_k &= F \cdot (Q_1 + Q_2) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{c}{g'} &= \frac{d}{g} \\ r_2 &= \frac{q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{P_g}{T - P_k} = \eta_{th} \end{aligned}$$

Les rapports  $d/g$  du chapitre VI et  $c/g$  du chapitre V sont donc identiques, et le « rendement à froid »  $r_2$  du chapitre VI est équivalent au « rendement thermique »  $\eta_{th}$  utilisé dans les autres chapitres, ou au pouvoir calorifique supérieur du gaz  $P_g$  exprimé en % de la chaleur  $(T - P_k)$  fournie par le combustible.