

# Recherches récentes sur les affaissements dus aux travaux miniers

par L. DENOEL,

Professeur émérite de l'Université de Liège.

## SAMENVATTING

De werken van M. Wardell en zijn medewerkers vormen een belangrijke bijdrage tot de studie van de mijnverzakkingen. Zij hebben de buitengewone verdienste ons een groot aantal nauwkeurige waarnemingen ter beschikking te stellen die volgens een methodisch plan uitgevoerd werden in een terrein waar slechts een enkele laag in ontginning is.

Zij hebben in Engeland de praktijk der periodische uitgestrekte nivelleringen, toegepast in Duitsland en in Nederland ingevoerd en aldus een voorbeeld gesteld aan de overige landen. Tezelfdertijd hebben zij de begrippen grenshoek en invloedzone ge vulgariseerd en ze gebruikt om een duidelijke grafische voorstelling te maken van de voortschrijding der verzakkingen.

Het verband in de tijd tussen de vervormingen van de bodemoppervlakte en de mijnwerken werd zorgvuldiger nagegaan dan zulks tot hertoe ooit het geval was. De besluiten die uit deze werken voortvloeien hebben een groot praktisch en theoretisch nut, en het lijkt ons nuttig er de voornaamste punten van te overlopen en de mogelijkheid van hun veralgemening na te gaan.

Wij nodigen de lezer uit vooreerst kennis te nemen van de aanhangsels I en II, die de vertaling bevatten van de twee studies van de H. Wardell alsmede een synthetisch overzicht van de opmerkingen waartoe zijn publicaties aanleiding gaven op de samenkomst van de « Institution of Mining Engineers » in 1955.

Wij gaan uit van de hypothese dat de terreinen die door de ontginning gescheurd zijn, mogen beschouwd worden als een massief zonder cohesie en tonen aan dat deze veronderstelling zeer goed de dynamische fasen van de bodemverzakkingen verklaart.

Wij onderzoeken volgens enkele betwiste punten en in het bijzonder de praktische methoden om de vooruitzichten op te stellen.

## RESUME

Les travaux de M. Wardell et de ses collaborateurs apportent une contribution très importante à l'étude des affaissements miniers. Ils ont le mérite exceptionnel de nous offrir un grand nombre d'observations précises effectuées d'après un plan méthodique et dans un terrain où il n'y a qu'une seule couche en exploitation. Ils ont introduit en Angleterre la pratique des nivellements étendus et périodiques usitée en Allemagne et en Hollande, et, par là, ils ont donné le bon exemple aux pays retardataires. Par la même occasion, ils ont vulgarisé les notions d'angle limite et de zones d'influence et ils les ont exploitées pour produire une représentation graphique parlante de la progression des affaissements. La relation de temps entre les déformations de la surface du sol et les travaux miniers a été fouillée beaucoup plus soigneusement qu'on ne l'avait fait jusqu'à présent. Les conclusions qui se dégagent de ces travaux ont un grand intérêt, tant théorique que pratique, et il nous

paraît opportun d'en revoir les principales et la possibilité de les généraliser (\*).

Nous partons de l'hypothèse que les terrains fracturés par l'exploitation sont assimilables à un massif sans cohésion et nous montrons qu'elle explique très bien les phases dynamiques de l'affaissement de la surface du sol. Nous examinons ensuite quelques points controversés en cette matière et, en particulier, les procédés pratiques pour établir des prévisions.

## I. — LA COURBE TYPE DE LA PROGRESSION DES AFFAISSEMENTS

Arrêtons-nous d'abord à la courbe type de la progression de l'affaissement d'un point du sol en

(\*) Nous engageons le lecteur à prendre d'abord connaissance des appendices n° I et n° II qui sont la traduction des deux mémoires de M. Wardell et un résumé synthétique des observations auxquelles ses publications ont donné lieu au meeting de l'Institution of Mining Engineers 1955.

fonction du temps et de l'avancement d'un chantier souterrain. Rappelons que ce point P est pris pour sommet d'un cône droit dont la génératrice fait avec la verticale un angle  $\alpha$ , appelé *angle limite*, et que ce cône découpe dans une veine en plateure une surface dont la projection horizontale est une circonférence de rayon R. Celle-ci limite la *zone d'influence* en dehors de laquelle les travaux miniers n'ont aucune action sur le point P. Dans la veine, une taille, dont la longueur idéale serait  $2R$ , est en activité et aborde la zone d'influence dans laquelle elle progresse régulièrement jusqu'à la dépasser de telle manière que le point P coïncide verticalement avec le centre du chantier. Dans ces conditions, l'affaissement observé au point P est le maximum possible et c'est aussi le plus facile à mesurer avec précision. Sa durée jusqu'au moment où le mouvement s'arrête, c'est-à-dire cesse d'être perceptible avec nos instruments, sera mesurée en P avec une précision plus grande qu'en n'importe quel autre point. Ajoutons que si, dans le champ des observations, la stratification est régulière et la méthode d'exploitation identique, nous devons nécessairement nous attendre à ce que les résultats des mesures soient concordants. En valeur absolue, ces résultats seront très différents, parce qu'ils dépendent d'abord de deux facteurs localement très différents : la puissance de la veine et la profondeur des chantiers. De plus, en pratique il n'est pas souvent possible de donner aux tailles la longueur  $2R$ , et l'affaissement diminue suivant le rapport de l'aire partielle à l'aire totale, mais si le point P est au centre du panneau, il sera quand même le siège de l'affaissement maximum.

L'artifice de M. Wardell consiste à éliminer toutes ces variations et à prendre comme coordonnées, non plus les valeurs concrètes de l'affaissement et du temps du calendrier mais, d'une part, la proportion de l'affaissement maximum atteinte à un moment donné et, d'autre part, l'avancement réalisé depuis l'origine et exprimé en fraction de R. Dans le graphique ainsi obtenu, les abscisses, bien que représentant un temps, évoquent la relation d'espace et la situation des fronts de taille par rapport au point P.

Onze cas ont été examinés et ils ont donné des résultats assez rapprochés pour qu'on puisse en déduire une moyenne probable. Aux yeux du statisticien, onze n'est pas un grand nombre, mais dans l'espèce, vu les difficultés de l'expérimentation, c'est beaucoup. Cela dépasse tout ce qu'on a bien voulu publier jusqu'à présent et nous devons nous estimer très heureux d'avoir enfin une bonne base de référence. Sa probabilité est du même ordre que celle dont on est bien forcé de se contenter dans d'autres cas : par exemple, la prise de dix échantillons de minerai ou la vérification par dix tirs des qualités d'un explosif. Les divergences entre les observations de M. Grond et celles de M. Wardell n'ont rien d'étonnant ; elles n'entament ni la rigueur de la méthode ni les déductions sur la nature des phénomènes. M. Grond ne nous donne pas tous les éléments du problème et il est bien possible qu'en plus de la nature des morts-terrains, on

s'écarte des postulats que nous venons de rappeler et auxquels est subordonnée la confection des courbes Wardell. Les écarts constatés et ceux que l'on trouvera certainement en multipliant les observations, ne sont pas purement accidentels. Faisons abstraction pour le moment des critiques de détail et voyons ce que nous enseigne la courbe type.

Le diagramme est celui du mouvement d'un mobile partant du repos et y revenant après un certain temps. Nous y discernons facilement trois phases :

- 1) un démarrage très lent s'accéléralant pendant un temps court pour passer à
- 2) une période de régime où la vitesse est sensiblement constante, car la courbe présente un point d'inflexion dans la partie centrale et ne s'écarte guère de la ligne droite,
- 3) une période de ralentissement, plus brusque que celle de démarrage.

A ce cycle correspond une dépense d'énergie. La force motrice, c'est la pesanteur. Nous avons affaire à un corps qui tombe, acquiert de la force vive, est arrêté dans sa chute par une résistance. La hauteur de chute est faible (la hauteur libre dans l'ouverture de la veine), mais la masse mobile est énorme, par conséquent aussi l'énergie engendrée par la chute. Aucune construction humaine ne résisterait à ces effets destructeurs, si eux-mêmes ne se chargeaient de l'amortissement. L'essentiel, c'est qu'ils se cantonnent dans un domaine écarté des endroits fréquentés. De ce corps qui tombe nous ne connaissons rien, sinon que sa surface latérale a pour directrices le périmètre du chantier et le bord de la cuvette d'affaissement à la surface du sol ; la région intermédiaire demeure mystérieuse. Elle a bien été explorée par quelques nivellements de galeries, mais jamais on n'a déterminé le contour d'une section complète. Il faut y suppléer par des hypothèses et il n'en manque pas (1). On peut imaginer le cas théorique d'un milieu homogène et d'un chantier de forme circulaire dont le rayon croît progressivement d'une manière continue. La cuvette sera limitée par une circonférence de cercle et le corps détaché sera un solide de révolution dont la méridienne peut être une droite ou une courbe. Quand il ne s'agit que de la correspondance géométrique entre le fond et la surface, on admet généralement l'hypothèse de surfaces réglées dont les génératrices sont inclinées sur l'horizon d'un angle déterminé (angle limite ou angle de cassure) ; hypothèse simple et valable pour toute espèce de périmètre du chantier. Si l'on analyse les phénomènes du point de vue mécanique, la forme du solide détaché du massif en place n'est pas indifférente, mais quelle que soit cette forme, une chose est certaine, c'est qu'il faut une dépense d'énergie pour vaincre la cohésion et les frottements tout le long de la surface de séparation.

Un autre fait est certain, c'est que la désagrégation commence par le bas, qu'elle résulte d'une fragmentation de toute la masse, ce qui représente

(1) GROND cite une dizaine dans une étude parue dans « Iron and Coal Trades Rev. », 1950.



aussi une dépense d'énergie que Rittinger estimait proportionnelle à l'augmentation des surfaces mises à nu. Au début de l'exploitation, tant que le chantier n'a pas pris un certain développement, la pesanteur est impuissante à surmonter les forces antagonistes et à produire la déformation de la surface du sol, mais elle l'emporte nécessairement à un certain moment parce qu'elle croît comme le cube tandis que les forces de rodage, pour ne citer que celles-là, croissent comme la surface limite. Le chantier qui va influencer le point P a donc été mis en train depuis un temps notable quand il aborde la zone d'influence, origine du diagramme, et il a acquis un développement suffisant pour former à la surface une cuvette s'étendant jusqu'au point P. L'excédent de poids va en croissant et provoque la mise en mouvement d'abord lente, ensuite progressivement accélérée jusqu'à un certain point.

Dans ce mouvement, nous devons considérer une multitude de fragments enchevêtrés dont chacun tend à suivre le chemin de moindre résistance. C'est ce qu'on observe très nettement dans le sablier, les grains du centre s'écoulent beaucoup plus rapidement que ceux des bords et il se forme à la surface une cuvette en forme de cône ou d'hyperboloïde de révolution. Des essais sur modèles à échelle beaucoup plus grande montrent exactement la même marche de l'écoulement de matières pulvérulentes. Nous citons spécialement ceux de ROLOFF dont nous donnons un aperçu à l'appendice n° III. Si l'on imagine un panneau carré qui aurait été exploité symétriquement par rapport à son centre et aurait atteint son état d'équilibre final, les trajectoires des différents points seraient celles de la figure 1, c'est-à-dire des courbes ayant une asymptote verticale et assimilables à des arcs d'exponentielle ou d'hyperbole. Leur courbure très prononcée au bord de la cuvette s'atténue à mesure qu'on se rapproche du centre.

Si l'on considère une taille de longueur constante, avançant régulièrement dans un sens donné, il faut admettre qu'au moment où la surface du sol commence à être influencée, les lignes de flux sont virtuellement formées. Dans le sens perpendiculaire à l'avancement, elles prennent leur forme définitive, tandis que dans le sens de l'avancement, elles subissent un effet d'étirement qui dépend de la vitesse du chantier. Chacun des fragments de la masse en mouvement obéit différemment à la résultante des efforts verticaux et horizontaux, mais ce sont évidemment ceux dont la vitesse de chute est la plus grande qui sont le moins déviés. Ce sont ceux qui sont momentanément au centre du panneau. On conçoit aisément que du fait des vitesses relatives de corps en contact naissent des frottements, des chocs et des destructions, c'est-à-dire du travail ajouté à celui de la fissuration en avant du front. Une grande partie de ces effets parasites dépend de la force vive acquise et ainsi se fait-il qu'à un certain moment s'établit un état voisin de l'équilibre et que la vitesse de descente devient à peu près uniforme. Le phénomène est analogue à celui de la chute d'un lit de grenailles dans l'eau et dans un récipient de grande hauteur. La vitesse

tend vers une limite asymptotique, c'est-à-dire qu'après un certain temps les accroissements ne sont plus mesurables. Mais la hauteur de chute est limitée et, quand le lit de grenailles touche le fond du récipient, il possède une force vive qui s'amortit par le travail des forces moléculaires dans les matériaux et par des remous dans le liquide. Si le fond du récipient, au lieu d'être rigide, était constitué par un piston à ressort ou à coussin d'air, on le verrait s'affaisser au moment du choc des grenailles.

Ces raisonnements, basés uniquement sur les théorèmes de la mécanique rationnelle, nous font apparaître comme très probable l'assimilation de l'affaissement du sol à l'écoulement d'un massif sans cohésion par un entonnoir de forme très évasée, les matériaux tombant dans un espace confiné qui limite la hauteur de chute. Cette hypothèse rend parfaitement compte de l'allure des diagrammes Wardell.

*1<sup>re</sup> phase* : Le démarrage se fait lentement pendant une période qui correspond à un avancement de 0,5 à 0,6 R. Cet intervalle correspond sensiblement à la partie de la cuvette comprise entre l'angle limite (mesure sur l'horizontal) et l'angle de cassure ( $\pi/4 + \beta/2$ ) déterminé par la bissectrice de l'angle  $\beta$  et de la verticale. Dans cette région, la cuvette est légèrement concave vers le bas et très peu inclinée, la chute du point P ne peut être que très faible et le diagramme nous renseigne sur sa valeur qui est de 0,05 de l'affaissement final.

Il est à noter que, dans cette première partie du diagramme, le faisceau des onze courbes particulières est très resserré, c'est là aussi que les courbes produites par M. Grond présentent le moindre écart. Par conséquent, on doit admettre comme très probable cette allure du démarrage, et il est permis de la généraliser.

La période d'accélération se situe entre 0,6 R et 1,1 R ; c'est la zone comprise entre la verticale et l'angle de cassure, bien connue comme étant le siège des plus grands dégâts. La pente du bord de la cuvette s'accroît fortement, atteint son maximum et la concavité change de sens. Quand le chantier passe à l'aplomb du point P, l'affaissement atteint 0,20 du total.

Dans cette région, les écarts de la moyenne, encore faibles dans les courbes Wardell, sont très considérables dans celles de Grond. Il y a donc là un domaine qui doit attirer l'attention des observateurs.

*2<sup>me</sup> phase* : La vitesse a atteint son maximum et le maintient dans l'intervalle compris entre R et ( $1,6 R + \epsilon$ ). La courbe type se confond sur une grande longueur avec la tangente au point d'inflexion et on peut voir dans un très grand nombre de cas d'espèce que le diagramme est absolument rectiligne. On le constate aussi dans maints exemples cités par d'autres auteurs. Dans tous ces cas, le diagramme de la vitesse de descente du point P est un trapèze à côtés incurvés (fig. 1). On ne peut manquer d'être frappé par sa ressemblance avec le diagramme du débit d'une pompe



foulante à piston, commandée directement par un fluide à pression constante et qui aurait une soupape défectueuse, très lourde et de grande levée. Pendant cette période de régime, le point P effectue environ les 2/3 de sa descente.

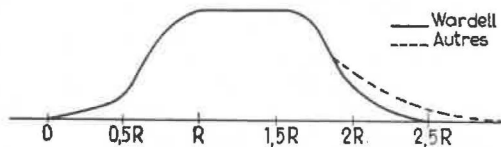


Fig. 1. — Vitesse d'affaissement/temps.

3<sup>me</sup> phase : La vitesse ralentit progressivement, ce qui implique une diminution de puissance ou un accroissement de résistance ou les deux. La progression du chantier n'a plus qu'une très faible influence sur l'accroissement de l'affaissement et elle n'en a plus aucune pour  $x = 2R$ . Le point P se trouve dans la partie de la cuvette voisine du centre, qui est très plate, et la composante verticale de sa trajectoire jusqu'au point central est très faible. Les conditions du phénomène sont maintenant tout autres que dans les phases précédentes. Aux dislocations ont succédé des recompressions ; le travail de la pesanteur consiste à rétablir le système dans un état d'équilibre stable différent infiniment peu de l'état primitif où les surfaces équipotentiellles sont des plans horizontaux et où les pressions croissent avec la profondeur. Cette compression est itinérante comme le chantier. On l'apprécie au fond par des mesures de convergence et des étançons dynamomètres. Elle devient de plus en plus difficile à mesure que la masse reprend sa compacité. Si l'on considère un tube vertical isolément, et si l'on désigne par  $y$  la compression subie à partir d'un état pris pour origine, on peut dire que la différence entre la pression agissante et la réaction s'exprime par  $P - R = F(y)$ .  $F$  étant une fonction décroissante (2),  $R$  est naturellement très variable suivant les circonstances, le volume du vide, la dureté des matériaux, les frottements, etc. Dans cette masse moulée contre les parois de l'entonnoir, il est admissible que les choses se passent comme dans le poinçonnage pendant la débouchure, c'est-à-dire qu'on a affaire à des glissements dans des plans verticaux.

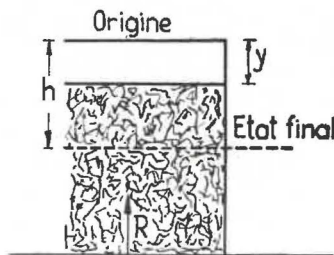


Fig. 2.

(2) La même hypothèse est admise dans le calcul des traverses de chemin de fer reposant sur un ballast compressible.

Pour se rendre compte de l'allure du phénomène, il n'est pas nécessaire de connaître la vraie valeur de  $F(y)$ , il suffit de savoir quelle est à un instant donné la fraction du tassement restant à effectuer. La plus simple de toutes les formes de  $F(y)$  c'est

$$\text{l'équation linéaire } \frac{d^2y}{dt^2} = -K^2 y \text{ (K étant un}$$

coefficient spécifique). L'intégrale générale est  $y = A \sin Kt + B \cos Kt$ .

Pour  $t = 0$   $y = 0$  d'où  $B = 0$

$$y = A \sin Kt, \quad -y_{\max} = h = A.$$

La courbe du diagramme est donc la sinusoïde :  $y = h \sin Kt$ . La vitesse est donnée par  $v = Kh \cos Kt = v_2 \cos Kt$ . Elle est maximum au départ et donnée en grandeur et direction par la vitesse  $v_2$  à la fin de la deuxième phase, c'est-à-dire au point d'inflexion du diagramme. Elle s'annule pour

$$KT = \pi/2$$

est le temps total de l'affaissement. Ceci précise la grandeur du coefficient  $K$  qui est l'inverse du temps.

Les formules peuvent donc s'écrire aussi :

$$y = h \sin \frac{\pi t}{2 T} \quad \text{et} \quad v = v_2 \cos \frac{\pi t}{2 T}$$

elles montrent que la vitesse au début est égale à la vitesse moyenne multipliée par  $\pi/2 = 1,57$ .

Ces formules sont d'application très commode, elles ne nécessitent que la connaissance de deux grandeurs  $h$  et  $T$  résultant des observations locales ; elles nous ont permis de faire des vérifications et d'établir des prévisions.

Dans la courbe type Wardell, si nous prenons l'intervalle  $1,6R$  à  $2,5R$  et faisons  $T = 9$  et  $h = 20$ , nous constatons que l'accord est très bon dans l'intervalle  $1,6R$  à  $2R$ , moins bon au-delà. Ce dernier domaine est celui de l'affaissement résiduel des très petites mesures et de la moindre précision. Pratiquement, une grande rigueur est ici sans importance puisque les dégâts tardifs sont minimes et facilement réparables.

Notons enfin que ces formules sont basées sur l'état final de la cuvette qui est celui de l'équilibre stable et indépendant des phases intermédiaires. Par conséquent, elles sont valables même si le chantier est arrêté à une distance  $x \leq 2R$ . Toutes les fois qu'un chantier sera arrêté pendant un temps notable à l'intérieur de la zone d'influence, soit à une limite conventionnelle, soit par suite d'accidents, on verra la vitesse de descente diminuer rapidement, puis plus lentement. Si l'on constate que cette vitesse reste à un certain niveau ou va de nouveau en croissant, on peut être certain que c'est le résultat d'une reprise du chantier ou de la mise en marche d'un autre panneau, soit dans la même veine, soit dans une veine voisine. Il y a là un indice très net et qui permet de différencier les actions qui se succèdent dans la zone d'influence, elles se marqueront toujours par une brisure dans le diagramme « temps-affaissement ».



Les considérations théoriques qui précèdent ne sont pas entièrement nouvelles, mais il nous paraît opportun de les rappeler maintenant qu'elles sont confirmées et exprimables en nombres par les recherches de M. Wardell. Sa publication permet de faire le point sur plusieurs questions controversées.

Concluons dès à présent que les affaissements du sol et le comportement des tailles sous les pressions du terrain sont des phénomènes d'ordres absolument distincts et qu'il est vain de vouloir les faire entrer conjointement dans des systèmes théoriques dont aucun n'échappe au reproche d'insuffisance ou même de contradiction. On arrive à des notions beaucoup plus nettes et d'un intérêt pratique majeur en traitant les deux problèmes séparément, c'est du reste conforme au principe qu'il faut sérier les difficultés (3).

## II. — QUELQUES PARTICULARITES

Nous nous proposons dans ce chapitre d'examiner quelques-uns des points discutables et discutés du mémoire de M. Wardell.

### Angle limite.

Cet angle est l'équivalent de l'angle « de repos » ou de talus naturel des roches tel qu'on l'observe à la surface. C'est aussi celui qui correspond à un équilibre stable du terrain. Il paraît donc logique de l'observer sur le bord de la cuvette arrivée à son repos définitif. Mais la détermination du moment précis où cette condition est réalisée exige naturellement des nivellements pendant une période assez longue. M. Wardell détermine l'angle limite par le moment où le point observé commence à bouger, le chantier ayant été mis en activité un certain temps avant qu'il n'aborde la zone d'influence. Cette méthode n'est plus applicable quand le point de départ est à l'intérieur de la zone d'influence.

Dans les couches plates, l'angle limite est le même dans toutes les directions. Dans le sens perpendiculaire à l'avancement, on peut donc l'observer quel que soit le point de départ et il serait très intéressant de connaître les résultats de nivellements suivant des profils normaux embrassant toute la largeur de la zone d'influence.

L'angle limite varie avec la nature des terrains surplombant la veine. La question se pose de sa-

(3) Ce n'est pas ici le lieu de traiter du phénomène de la propagation des ébranlements du fond jusqu'à la surface. Nous sommes loin de méconnaître son importance, surtout en ce qui concerne les déformations de la colonne des puits. Nous ferons seulement observer ici que les observations faites simultanément dans un même plan vertical ne contredisent en rien l'hypothèse de l'écoulement. Ainsi les nivellements d'un travers-bancs au-dessus d'un champ d'exploitation montrent que les affaissements ont une marche parallèle au fond et à la surface, ceux du fond étant plus forts. Les observations de Löffler dans les puits confirment ce parallélisme. C'est conforme au fait que la vitesse d'écoulement d'un fluide est inversement proportionnelle à la section de passage. A un certain moment, l'affaissement est le même au fond et à la surface. C'est alors que le vide du chantier est rempli par les éboulis et que ceux-ci commencent à se comprimer.

voir s'il est influencé par les exploitations prises successivement suivant la verticale. Si les morts-terrains sont constitués presque entièrement de roches sans cohésion, les exploitations ne changent pas grand-chose à leur comportement. Dans les roches consistantes, les cassures d'exploitation s'ajoutent aux cassures naturelles, et plus il y en a, plus est vraisemblable l'assimilation en grand du terrain à un sol meuble. On doit donc s'attendre à ce que l'angle limite augmente et davantage là où la fragmentation est plus forte, c'est-à-dire à petite profondeur. Cela peut expliquer les écarts de 32 à 36° relevés par M. Wardell.

On peut relever à titre d'indication probante les cas J où l'on a trouvé le maximum 40°. Il s'agit d'une veine située à 210 m de profondeur dans une zone où le terrain houiller affleure et a déjà été disloqué par deux exploitations antérieures. Plus grande est la profondeur, moindre est la déformation du sol, et il devient très difficile de discerner ces variations possibles de l'angle limite. A plus forte raison, si on remblaie. Dans un profil normal à la direction de l'avancement, on pourrait sans doute relever une différence, suivant que le chantier avance en ferme ou est limité par de vieux travaux. La dissymétrie des ailes de la cuvette est signalée dans la fig. n° 1 du rapport Beevers - Wardell de juillet 1954 (voir plus loin fig. 5 et Appendice n° 2), mais ce cas appelle de nettes réserves. La différence signalée est absolument trop forte pour être due uniquement à une différence dans la compacité du terrain.

Du point de vue des applications, il n'y a pas lieu d'attribuer une importance excessive à la précision de l'angle limite, attendu que sur les bords de la cuvette tous les mouvements du sol ont une amplitude très faible et peu dommageable (4). On peut donc se baser sur les valeurs moyennes relevées dans les conditions locales. La valeur maximum est à considérer comme la limite au-delà de laquelle l'influence des travaux miniers devient invraisemblable. A ce titre, nous l'adoptons quand il s'agit de vérifier des cas douteux ou des influences combinées. Cette valeur maximum dans le terrain houiller du Sud de la Belgique est de 40° et sa bissectrice fait avec la verticale un angle de 20°, limite admise pendant longtemps pour l'aire des dégâts francs aux constructions. Nous savons maintenant qu'elle n'a qu'une valeur probable.

### Point de départ du chantier et début de l'affaissement.

Dans les conditions où a été établie la courbe type, c'est une tautologie de dire que l'affaissement du point P débute dès que le front de taille aborde sa zone d'influence. Cela implique que le chantier était déjà assez développé pour influencer la surface en arrière de P. Ici se pose la question du temps nécessaire pour que les ébranlements se propagent du toit de la couche jusqu'à la surface. Ce

(4) Niemczyk a trouvé qu'un écart de 10° sur la valeur de l'angle limite n'a de retentissement que sur les aires partielles très petites.



décalage est très important pour l'établissement des prévisions ; il a en outre sa répercussion sur l'allure du diagramme affaissements-temps. Si le décalage est de  $T_a$  jours et la vitesse d'avancement  $v$ , le chantier aura avancé d'une longueur  $xR = v \cdot T_a$  et il pourra avoir pénétré dans la zone des grandes vitesses, le diagramme indiquera une accélération des démarrages et une vitesse de chute brusques (voir notamment les courbes de Briggs p. 134 et celle du cas singulier signalé par Grond).

Dans l'état actuel, ce facteur est celui que l'on connaît le moins et il paraît imprévisible. Il est extrêmement variable suivant les conditions locales. Ainsi, Niemczyk cite deux exemples ; dans l'un, couche de 1,40 m, profondeur non indiquée, le retard est de 6 à 12 mois, dans l'autre (couche de 1,80 m, remblai serré), il atteint deux ans pour une profondeur de 200 m.

Sur notre demande, M. Wardell a bien voulu nous faire savoir qu'il n'avait trouvé dans ses levés que très peu de cas d'où l'on puisse déduire la grandeur du retard avec quelque probabilité. Cela provient en premier lieu de la précision des observations et il faut que l'affaissement ait au minimum 2,5 mm pour que l'on puisse dire que les travaux souterrains ont commencé à se faire sentir. Il faut saisir le point sensible et le moment opportun. La profondeur, le remblai, la nature des terrains et la vitesse d'avancement sont autant de causes de variations locales.

Avec les éléments dont il dispose, M. Wardell a cherché à établir une relation entre le temps d'attente, la vitesse d'avancement et le rayon de la zone d'influence (voir Appendice IV). Si les premiers indices d'affaissement se manifestent quand une taille de longueur  $2R$  a avancé de  $R/k$  et si la vitesse d'avancement est de  $V$  mètres par an, le temps sera donné par  $T_a = R/k : V$  et, comme  $V$  peut s'exprimer aussi par un multiple de  $R$ , soit  $xR$ , l'on aura  $T_a = R/k = xR = 1/kx$  ou  $360/kx$  en jours. D'après une première estimation, on aurait  $k = 8$ , dans le cas du foudroyage et d'une veine de 1 m d'ouverture. Si la taille avait une longueur plus petite que  $2R$ , le temps serait naturellement plus long et devrait être corrigé en tenant compte du rapport de l'aire partielle à l'aire d'influence totale. Il sera aussi plus long si l'on remblai et plus court si la couche est épaisse.

Cette règle ne constitue évidemment qu'une première indication, et les quelques exemples de vérification dont nous disposons montrent que la valeur  $k$  diffère de 8 et peut varier du simple au double.  $R/8$  paraît assez vraisemblable pour des profondeurs de l'ordre de 600 m.

La raison principale de ces différences se trouve dans la nature des roches encaissantes, de leur résistance aux efforts de flexion et de cisaillement. Précisons ici que le temps d'attente c'est la période préparatoire aux affaissements du sol, pendant laquelle les terrains surplombant la couche se fissurent et se disloquent jusqu'à devenir comparables à un massif sans cohésion. Une fois ce point atteint, il n'y a plus guère de différences dans la cohésion et c'est ce qui explique l'allure concordante des courbes de la progression de l'affaissement dans tous

les terrains. Cette concordance ne prouve rien quant aux procédés de destruction et au temps qu'ils exigent. Il est donc douteux que le temps d'attente soit en rapport direct avec le rayon de la zone d'influence. Le phénomène de la propagation des ébranlements est fort complexe, et la vitesse qu'on pourrait appeler ascensionnelle n'est pas constante, mais certainement décroissante de bas en haut avec tendance vers zéro. Tout au début, avec les longueurs de taille de 100 à 200 m aujourd'hui habituelles, la flexion se fait dans le plan perpendiculaire à la direction de l'avancement et, après un certain temps, quand les fissures en avant du front et le clivage provoqué sont bien marqués, alors les bancs cassent parallèlement au front de taille et suivant un rythme dicté par la vitesse d'avancement. Ce phénomène se manifeste à toute profondeur. La facilité avec laquelle les bancs se cassent et se décollent les uns des autres par l'effet de la pesanteur dépend de leur épaisseur et de leur résistance mécanique. Ainsi, les gros bancs de grès du bas-toit retardent le foudroyage et on doit souvent les miner. S'ils sont dans le haut-toit, c'est pire. Il y a danger de coups de toit, et de toute façon, entrave à la propagation régulière de bas en haut. On peut en dire autant des formations de voûte. Mais, l'expérience prouve que dans tous les cas le temps et l'avancement du chantier ont raison de ces obstructions momentanées.

De ces considérations, on conclut que nous n'avons encore aucune base sérieuse de pronostic du temps d'attente et qu'il faut se référer aux observations locales. Malheureusement, celles-ci sont encore peu nombreuses ou peu divulguées. Il est donc nécessaire de faire encore un grand nombre d'observations précises.

#### Mouvements horizontaux.

Notons l'accord entre les observations du Yorkshire et celles des bassins allemands (Niemczyk, p. 27/31). Le point de passage des tensions aux compressions coïncide avec la verticale au périmètre du chantier. Quant au maximum des tensions, il est situé dans l'intervalle entre la verticale et l'angle de cassure, mais sa position précise semble sujette à des fluctuations assez importantes.

On a fait observer avec raison que ces expressions de *tension* et *compression*, mises en circulation par les auteurs allemands, sont impropres, que les terrains superficiels sont incapables de transmettre un effort de tension. En réalité, on mesure des déplacements entre repères, extensions ou raccourcissements. On les ramène à une unité de longueur en les exprimant par exemple en mm par 10 m, mais il est absolument impossible d'en tirer un taux de contrainte en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Quant aux bâtiments, les matériaux de construction ayant un module d'élasticité connu, les contraintes pourraient s'évaluer, mais elles ne sont pas directement proportionnelles aux déformations accusées par les levés topographiques. Les bâtiments ne participent pas aux mouvements du sol comme de simples piquets-repères. Leur poids, la pression unitaire des fondations, les frottements interviennent et les déplacements horizontaux sont autres qu'en sol nu. Grâce à la cohésion de la structure, il peut y avoir une certaine translation en bloc très appréciable.



Enfin, il est à noter que les levés du Yorkshire ont confirmé que l'amplitude des mouvements horizontaux est en rapport avec celle des affaissements et qu'elle diminue en raison directe de la profondeur.

#### Affaissement résiduel.

Dans la courbe type Wardell, le chantier dépasse la zone d'influence, par hypothèse toujours à la même allure, et il faudrait qu'il avance encore de  $0,5 R$  pour que l'affaissement du point P soit définitif. C'est plausible et conforme aux vues de plusieurs auteurs allemands. Mais il faut bien se garder d'en conclure que toujours la durée totale du phénomène sera déterminée par  $2,5 R = v$ .

Le chantier finit toujours pas s'arrêter, soit contre un accident naturel, soit à la limite de la concession, champ clos des contestations entre voisins. Quelle sera l'allure du phénomène dans cette phase finale ? Supposons que le chantier s'arrête net à  $x = 2 R$ . La cuvette a pris son extension définitive, mais pas encore toute sa profondeur. Le dernier tassement dû à la compression des éboulis se passe en vase clos, il exige un temps notable, qui peut dépasser très largement celui d'un avancement de  $0,5 R$  à l'allure antérieure. Il est souvent de plusieurs années, il résulte de l'observation et on ne voit pas comment on pourrait le déterminer par extrapolation du diagramme établi dans l'intervalle  $O - 2 R$ . La dernière partie du diagramme réel sera donc d'ordinaire beaucoup plus plate que celle de la courbe type.

Dans cette ultime phase de l'amortissement, les affaissements et les tensions sont très faibles. Il peut arriver cependant que les actions de plusieurs exploitations simultanées se cumulent et qu'il en résulte des lésions dans les parties faibles des bâtiments, par exemple des fissurations des plafonds.

#### Vitesse d'avancement et dégâts.

Une assertion qui n'a pas manqué de causer quelque surprise, c'est que la vitesse d'avancement n'a aucune influence sur la nature ou la gravité des dégâts aux constructions ; elle change seulement l'époque où ils apparaissent.

Notons d'abord que ceci peut avoir un grand intérêt en certaines circonstances. Si l'on est sous une région encore peu peuplée mais dans laquelle on prévoit des plans d'urbanisme, des ouvrages d'art, des constructions civiles ou industrielles de grande importance, il faut apporter toute la célérité possible à l'extraction des principales couches de façon que la période dangereuse des premières années soit passée et que les constructions s'édifient pendant la période du tassement uniforme.

En second lieu, M. Wardell ne considère que les tensions et compressions comme causes de dommages. Il ne dit rien des dénivellations et des hors-plomb des murs et des constructions en maçonnerie de grande hauteur. Ces dégâts sont permanents sur les bords de la cuvette finale, mais ils se constatent aussi, et à une échelle beaucoup moindre, pendant les étapes intermédiaires. C'est un fait bien connu que les dénivellations font plonger les bâtiments vers le front du chantier en marche, ce qui amène un redressement lorsque le front a dé-

passé le bâtiment. Lorsque la ligne de cassure itinérante aborde le bâtiment, elle produit un affaissement plus fort à l'avant qu'à l'arrière et, si elle stationne ou passe lentement, le moment de déversement peut produire des fissurations que l'on évite en passant rapidement. C'est pourquoi l'on recommande d'orienter l'avancement des fronts de taille dans le sens de la plus petite dimension.

On peut noter aussi qu'un corps semi-élastique soumis à une contrainte durable, même non dangereuse, subit une déformation plastique qui s'accroît avec le temps. Toutes les constructions en maçonnerie rentrent dans cette catégorie, elles seront donc moins affectées par une progression rapide.

### III. — PREVISIONS

Les observateurs anglais ne nous apprennent rien de nouveau quant à la marche à suivre pour prévoir la grandeur des affaissements du sol, mais ils apportent des précisions sur le facteur temps qui est un des éléments essentiels du problème.

Il ne faut pas se faire d'illusions. Il n'y a jusqu'à présent aucune méthode qui puisse prédire une valeur concrète de l'affaissement d'un point du sol à un moment donné, avec une approximation donnée. Les aléas sont nombreux. Les erreurs d'appréciation dans les données se répercutent dans les résultats ; les hypothèses sur l'homogénéité du milieu et la continuité des phénomènes sont nécessaires pour pouvoir établir des raisonnements mathématiques. Si elles valent en grand, elles ne valent rien dans le détail. Dans l'étendue d'un panneau de 300 à 500 m, il est rare qu'on ne rencontre pas des variations dans la puissance des veines, la stratification, la nature des stamper ou des irrégularités dans l'avancement ou la longueur des fronts. On a constaté souvent des écarts notables entre les prévisions et la réalité révélée par des nivellements méthodiques. Deux points voisins dans une même base d'observation peuvent se comporter différemment dans l'intervalle entre deux mesurages consécutifs et il est bien délicat d'en trouver une explication. Niemczyk, qui a exposé longuement la question et fait la critique des divers procédés de calcul, estime qu'une approximation de 10 % sur l'ordonnée de l'affaissement est vraisemblable ; quant aux intensités des tensions et compressions, l'aléa est beaucoup plus considérable.

Cette incertitude ne doit pas nous rendre sceptiques. L'intérêt du problème ne se concentre pas sur un point de l'espace, mais bien sur des zones d'une certaine étendue qu'il n'est pas nécessaire de déterminer à un mètre près. Ce sont les zones où les tensions et les compressions peuvent atteindre un taux dangereux, et leur connaissance est nécessaire du point de vue des mesures à prendre dans la construction des nouveaux bâtiments et, ce qui est encore plus important, du point de vue du plan d'exploitation et de la compensation de ces tensions.

Le problème des prévisions étant ainsi limité à son essentiel, on peut dire que, dans l'état actuel de nos connaissances, il est susceptible de solutions pratiquement très satisfaisantes. On a le choix



entre les méthodes Keinhorst, Bals, Beyer qui toutes font appel à des artifices de calcul discutables, qui conduisent dans l'application à des calculs laborieux pour lesquels on a élaboré des tables de nombreux paramètres. Il est permis de se demander si une telle complication est bien justifiée en pareille matière et s'il n'est pas illusoire de pousser la recherche de la précision à un degré que la nature se charge de démentir.

Nous sommes ainsi amenés à rechercher si le problème n'est pas susceptible d'une solution plus commode et d'une approximation suffisante pour les besoins de la pratique.

Les données du problème sont la puissance et la pente de la veine, le chantier de forme rectangulaire avec une dimension constante, la longueur du front de taille, l'angle limite et l'angle de fracture. Il faut se donner le profil de la cuvette qui s'ajuste le mieux possible aux résultats des nivellements exécutés dans la région sur une longueur dépassant celle de la zone d'influence. En couche inclinée, il faut au minimum une base suivant la ligne de plus grande pente et trois suivant la direction, une par le point le plus bas de la cuvette, une en amont et une autre en aval. C'est indispensable quand la pente dépasse 20°. En couche plate aussi, bien qu'on admette la symétrie, il est évidemment instructif de disposer de nivellements en long et en travers. En pratique, malheureusement, on dispose rarement de nivellements méthodiques effectués dans un but d'étude, mais on est assujéti à suivre des routes ou des voies ferrées plus ou moins sinueuses et il faut dépouiller attentivement et interpoler les résultats des observations. A défaut de renseignements régionaux dignes de foi, il faudra se régler d'après les analogies et adopter l'un ou l'autre des profils types proposés pour la forme de la cuvette. En couche plate, ce sera toujours une figure ayant un axe de symétrie vertical au centre de figure du chantier.

Le problème ainsi posé, on cherche en premier lieu à déterminer l'ordonnée maximum au centre de la cuvette. Il est commode pour les calculs d'y rapporter toutes les autres ordonnées et d'exprimer les longueurs en prenant pour unité le rayon R de la zone d'influence.

carrée et de côté 2 R (c'est-à-dire le carré circonscrit au cercle). La zone influencée sera par suite un carré de côté 4 R, et cela, quels que soient la profondeur des travaux ou les angles limites dont les valeurs concrètes disparaissent.

Dans cette zone d'action complète, ce qu'il est indispensable de connaître, c'est la forme définitive de la cuvette, celle de l'équilibre stable, à laquelle on arrive fatalement. Elle est déterminée par trois repères sur lesquels tous les observateurs sont d'accord :

1) Le fond de la cuvette dont l'ordonnée est une fraction de l'ouverture de la veine variant entre 0,9 (cas de foudroyage intégral) et un coefficient en rapport avec la nature du remblai.

Cette ordonnée axiale est cotée 100 ;

2) Les ordonnées au droit du périmètre du chantier, parce qu'elles correspondent à la limite des zones de tension et de compression (ou encore au point neutre), la cote est voisine de 50.

3) L'ordonnée correspondant à l'angle de fracture, c'est-à-dire au point d'inflexion de la courbe de la cuvette et à l'accélération du mouvement de descente. Ce point se situe dans une zone assez étroite dont le centre peut être fixé avec une grande probabilité à une distance 0,6 R du bord de la cuvette dans le terrain houiller. Cette ordonnée vaut 16 à 20.

Avec ces repères, on peut tracer un polygone rectiligne qui s'écarte très peu du profil réel.

La partie concave dont la corde est 2 R peut sans grande erreur être assimilée à un arc de parabole et sa surface est mesurée par 2/3 Rh. Étant donné que le fond de la cuvette est très plat, si on le suppose horizontal sur une longueur 1/3 R, on détermine un trapèze exactement de même surface que la courbe et dont les côtés latéraux s'écartent très peu de celle-ci. Nous déterminons ainsi le contour polygonal (fig. 3) d'étendue LL'.

Le volume compris entre le sol primitif et le sol affaissé est la somme de trois troncs de pyramide superposés et, en faisant la cubature et comparant au volume du vide du chantier dans le cas du foudroyage, on trouve que la valeur de l'ordonnée axiale est bien de 0,9 sans aucune intervention du foisonnement. En prenant 1/4 R pour la petite base,

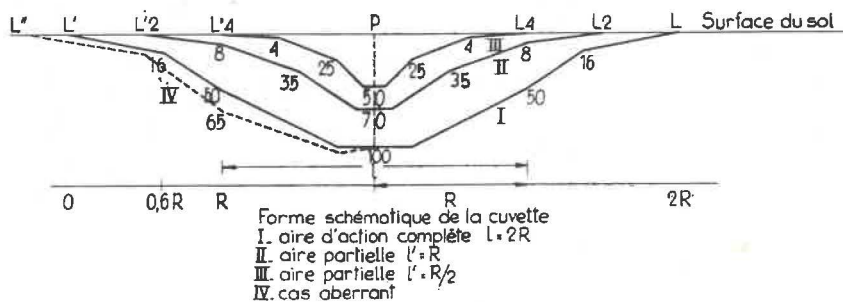


Fig. 3.

A. — Aire d'action complète.

Cette zone théorique circulaire est une source de complication. Nous y substituons la zone d'influence déterminée à la surface par un chantier de forme

le résultat est sensiblement le même. Le procédé est applicable même si dans la réalité il existe une certaine dissymétrie entre les deux ailes. Le trait pointillé représente, à titre d'exemple, le cas cité



par M. Wardell d'un affaissement de 65 % du côté remblai et de 40 % du côté du ferme (5).

Ce cas particulier ne rentre pas dans le domaine des erreurs accidentelles et il doit être écarté comme aberrant. La différence du tassement entre l'aile gauche et l'aile droite de la cuvette est trop considérable pour s'expliquer par une différence de compacité des terrains. Elle est due sans aucun doute au fait que le tassement du remblai à la limite du panneau observé n'était pas terminé quand on a mis le chantier en marche et procédé au premier nivellement. Ainsi, le tassement résiduel de l'un s'est ajouté à celui dû à la progression de l'autre et il est mesuré par la différence des ordonnées entre le profil IV et le profil III considéré comme normal. Le résultat des observations serait tout autre si l'on attendait un temps suffisant entre l'arrêt du premier panneau et le démarrage du second, ou si ce dernier était pris dans le sens rétrograde.

Le cas mérite d'être retenu parce qu'il donne une idée de la grandeur des erreurs systématiques possibles. Des écarts du même genre proviendraient aussi d'une veine sous-jacente dont le tassement serait supposé erronément comme terminé.

Le profil polygonal que nous présentons représente l'ossature générale de toute cuvette. Il est suffisant comme base d'argumentation ; s'il s'agit de l'établissement d'un premier avant-projet, il ne laissera que des menus détails à modifier.

En plan, figure 4, on tracera les lignes d'influence et les lignes de niveau de la cuvette. Elles font voir l'étendue des trois zones les plus intéressantes et permettant de tracer un profil dans une direction quelconque, par exemple le long d'une rue XY. Selon la position des bâtiments, on peut prévoir le sens et l'importance de dénivellations, des extensions et compressions. Ainsi sur le schéma, les risques de gravité des dégâts vont en croissant dans l'ordre  $D_1$ ,  $D_3$ ,  $D_2$ ,  $D_4$ .

### B. — Aire partielle.

A part le cas où la profondeur est assez faible pour que la longueur du front de taille soit égale à  $2R$ , on n'arrivera à l'état final décrit ci-dessus qu'en prenant successivement dans un ordre déterminé une série de panneaux de largeur plus petite que  $2R$ , et cela peut exiger un temps très long. Il faut donc déterminer la forme finale de la

(5) M. Trusty a proposé une explication de la dissymétrie de la cuvette. Sur le ferme, les terrains subissent une compression élastique, sur les anciens travaux, ils reposent sur un remblai encore compressible. Il faudrait donc compter l'aire influençant la surface entre la paroi en ferme et la zone où le remblai est complètement tassé. Ainsi le point le plus bas ne serait plus au centre du panneau en exploitation. Cette conception revient à augmenter l'angle limite, mais elle a le défaut de ne pas tenir compte du temps. Une certaine dissymétrie peut aussi résulter du fait que, par exemple sur une hauteur d'étage de 50 m et une inclinaison de 0,20, si la profondeur est faible, il y aura une différence déjà très appréciable entre les valeurs de  $R$  au sommet et au pied de la taille.

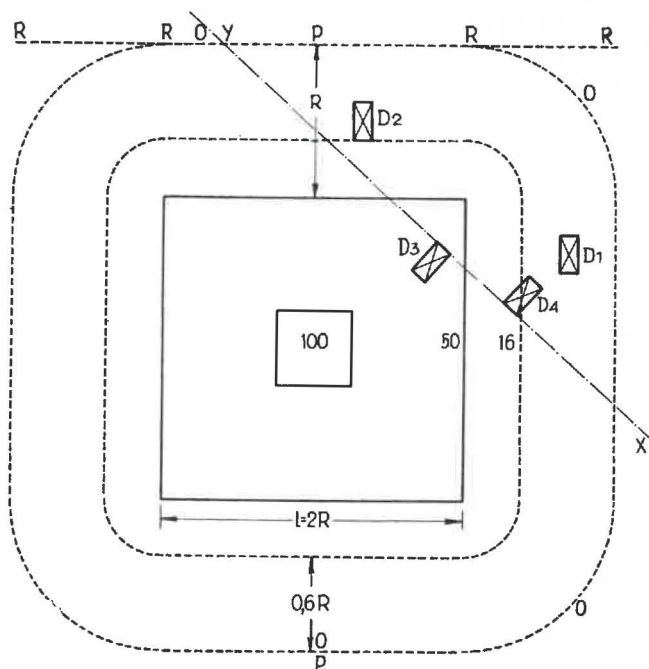
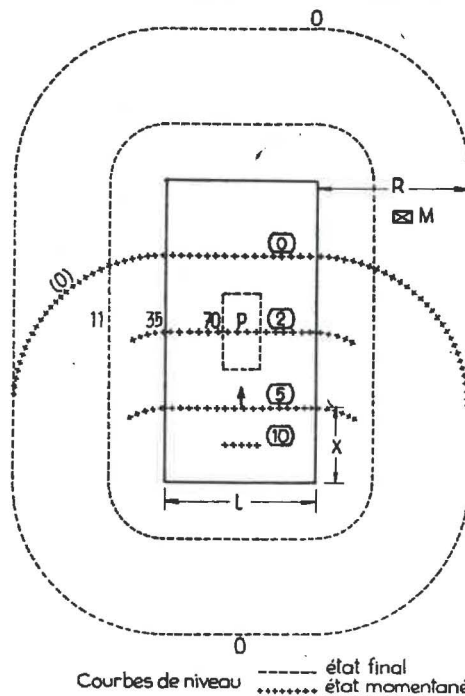


Fig. 4. — Aire d'action totale. Courbes de niveau.

cuvette pour un panneau de l'espèce et un avancement  $2R$ . Nous en donnons un exemple à la figure 5, dans l'hypothèse  $I = R$ ,  $R/2$  ou  $R/4$ .

On trace d'abord la limite de la zone influencée. On voit qu'elle a la même largeur dans le sens de l'avancement et qu'elle est réduite dans le sens perpendiculaire. Les formes successives de la cuvette ne sont pas homothétiques et les ordonnées ne sont pas réduites uniformément dans ce même rapport. L'ordonnée axiale décroît dans le rapport



Courbes de niveau — état final  
..... état momentané

Fig. 5. — Aire partielle.

Les chiffres encadrés sont relatifs à l'état momentané, les autres à l'état final.



$\sqrt{l/R}$  ici  $\sqrt{1/2} = 0,70$ . Conservant ce rapport pour nos autres repères, nous aurons le nouveau profil et (fig. 5) les courbes de niveau correspondantes (6). Nous inscrivons cette cote et les autres en pourcentage de la cote fondamentale. Nous aurons ainsi la cuvette finale correspondant au panneau I' et les corollaires pratiques sont exactement les mêmes que dans le cas précédent, avec cette différence que toutes les déformations et contraintes seront d'un taux réduit. Notons en particulier qu'aucun artifice de calcul n'est requis pour déterminer la cote d'un point quelconque M pris dans la zone d'influence, mais en dehors du périmètre du chantier. Son affaissement se calcule par interpolation entre les deux courbes de niveau voisines.

La manière dont le panneau a été exploité ne changera rien, mais les étapes intermédiaires auront été toutes différentes suivant qu'on aura adopté un sens unique d'avancement ou une avance bilatérale convergente ou divergente.

### C. — Actions momentanées.

Considérons, pour fixer les idées, une taille de longueur l, avançant uniformément et arrivée à la distance x. Elle est accompagnée d'une ligne d'influence tracée avec le même angle limite et figurée par les petites croix (fig. 5). Les cotes d'affaissement au moment où le chantier est en x se déduisent de la forme finale et il faut les réduire dans un rapport établi par comparaison avec l'affaissement du point P au même moment, c'est-à-dire l'ordonnée de la courbe type Wardell.

Nous allons faire application de la méthode à un cas typique qu'il est toujours utile d'examiner dans tout avant-projet. Supposons une taille de longueur R avançant vers le nord et arrivée à la distance  $x = R/2$ . Nous choisissons à dessein cette étape parce qu'elle correspond au maximum des contraintes horizontales ; à partir de ce point, elles n'augmentent plus mais leur point d'application se déplace avec l'avancement du chantier. On voit tout d'abord que la zone des extensions recouvre la moitié du panneau et une aire qui sera dans la suite le siège de compressions. Les constructions sont donc sujettes à des efforts alternatifs de sens contraire au cours de la progression du chantier, mais il ne faut pas s'en alarmer outre mesure. Les affaissements, et par suite, les contraintes pendant la période itinérante sont très faibles. Ainsi dans la phase figurée, à un avancement  $R/2$  correspond dans le diagramme Wardell un affaissement de P à peine perceptible et de l'ordre de 2 à 3% du maximum, c'est-à-dire qu'il sera par exemple 2 au lieu de 70. Si maintenant nous faisons glisser le diagramme n° 3 de manière que la limite  $L_4$  coïncide avec la limite momentanée  $L_x$  (fig. 5), nous aurons toutes les cotes de la partie

(6) La courbure de la partie centrale de la cuvette s'accroît à mesure que la largeur diminue. A un certain degré, il n'y a plus que deux arcs concaves vers le bas et convergeant au centre. On peut comparer cette évolution à celle de la vallée d'érosion, en prenant les profils en travers du ruisseau, de la rivière et du fleuve.

en arrière du front par proportion avec celle du point P. On voit qu'au moment même du passage, la cuvette sera encore très peu développée et ne se signalera par aucun dégât et il en sera ainsi jusqu'à ce que le front ait atteint l'aplomb du point P.

Si au lieu d'avancer continuellement le front reste stationnaire dans cet intervalle  $R/2$  à R, les contraintes s'aggravant avec le temps, les tensions pourront peut-être se manifester par des lésions. quand on reprendra le chantier toujours dans le même sens, on entrera dans la zone de compression et les dégâts en résultant s'ajouteront aux précédents. Le dommage final sera donc beaucoup plus grave que si l'extraction s'était faite d'une manière continue (7).

Considérons en second lieu ce même panneau dans l'hypothèse d'une double attaque symétrique convergente. Les lignes d'influence de chaque front partent du point P en sens inverse et se pénètrent de plus de telle manière que, dans la phase  $x = R/2$ , chacune se trouve à l'aplomb du front de l'autre. La surface affaissée prend la forme de deux bassins séparés par un dôme. Au sommet de celui-ci, les affaissements ont une valeur double de ceux de l'attaque simple. Le dôme s'effondre plus vite que les deux bassins et il disparaît au moment où les deux chantiers se soudent au point P. Jusque à ce moment, la partie centrale est le siège d'extension dont le taux est doublé. Par contre, les hors-plomb se compensent et le point P descend verticalement. Dans la partie en arrière de chaque front entre  $R/2$  et R, il y a compensation partielle des contraintes horizontales, et elles se répartissent en deux ailes symétriques ; elles se modifient avec le temps et les changements de forme de la cuvette (8).

Le phénomène du tassement est encore loin d'être terminé. Au moment de la jonction des travaux, il est au plus de 35% au point central et le restant s'effectue sans aucune intervention du chantier, le diagramme avec abscisses en R n'a plus aucune signification et il faut revenir au diagramme affaissement-temps. Le point P a atteint sa vitesse maximum et il la garde pendant un temps notable, étant donné non seulement qu'il suit le chemin le plus court, mais qu'il est au milieu de la zone où la compacité du remblai ou des éboulis est la moindre. A titre d'indication, on peut dire que, si l'exploitation a duré un an, on observera à la fin de la seconde année un affaissement de 75 à 80% et la troisième année de 90 à 95%.

### Corollaires.

1. Une conclusion importante se dégage de l'étude de ce cas particulier. Si on effectue un nivellement à l'époque où le panneau vient d'être complètement

(7) C'est ainsi que se produisent notamment les distorsions des chassis de fenêtre et des portes et que dans un bâtiment d'une certaine longueur on constate des effets en apparence contradictoires, comme de fortes disjonctions des murs et des bombements de pavement. Ces dégâts sont de dates différentes.

(8) Le diagramme 1 de l'Appendice III donne une image fidèle de cette nouvelle répartition des tensions et compressions dans son état final.



extrait et quelques autres à intervalles assez rapprochés, on sera dans les conditions idéales pour vérifier comment se réalise le tassement en fonction du temps seulement. Il serait donc indiqué que les Comités d'études fassent connaître les résultats de leurs observations dans ce domaine ou qu'ils réservent une place de choix à ce cas particulier dans le programme de leurs travaux. Dans un bassin comme celui de la Campine, où il y a de vastes étendues encore vierges, on trouverait certainement un champ d'observation approprié.

2. Nous avons par cet exemple montré le parti qu'on peut tirer des observations et du graphique Wardell pour établir des prévisions. La méthode facilite aussi l'étude de projets d'exploitation harmonique par combinaison de panneaux décalés dans le temps, soit dans la même couche, soit dans deux couches superposées. On voit qu'il n'est pas nécessaire de prendre en considération un décalage moindre que  $R/2$ . Un décalage de  $R$  par contre s'impose parce qu'il fait coïncider la période de démarrage ou d'amortissement d'un chantier avec la période des grandes vitesses de descente de l'autre. Ces remarques sont de nature à diminuer le nombre d'épures à dresser pour arriver au meilleur programme. L'exemple fig. 9 du deuxième mémoire Wardell est instructif à cet égard. On y voit que le décalage entre les deux panneaux combinés est légèrement supérieur à  $R$ . Un autre domaine d'application est celui du départage des responsabilités ou des conventions entre charbonnages voisins pour l'aménagement de la zone d'influences communes.

3. S'il n'y a pas moyen d'arriver à une compensation par l'organisation des chantiers, il faut diminuer le plus possible le taux de l'affaissement par un remblai compact, mécanique ou pneumatique. Le système des fausses voies qui revient à creuser un trou pour combler un autre a peu d'influence sur le tassement final. Le remblayage rapporté est beaucoup plus efficace et il est aussi beaucoup moins dispendieux aux petites profondeurs qu'aux grandes; il est donc indiqué. Dans les mines très profondes, il est avéré que dans bien des cas le foudroyage favorise, non seulement une extraction intensive, mais aussi le contrôle du toit. Il restera préférable étant donné que, d'autre part, les dégâts à la surface sont fort atténués.

#### Un procédé indéfendable.

Certains auteurs qui ont eu leur heure de célébrité, entre autres Thiriart et Goldreich, assimilent le profil de la surface affaissée à un trapèze ayant pour bases la longueur du chantier et celle de la surface influencée déterminée par les angles de fracture. Par une relation purement géométrique, en écrivant que le volume compris entre la surface primitive et la surface affaissée est égal au vide créé dans le fond, on détermine la hauteur  $h$  de ce trapèze en fonction de la puissance de la veine. Le calcul est possible, quelle que soit l'inclinaison des strates, en se conformant pour les angles de fracture aux règles de Dortmund. Cette formule fait croître la valeur de  $h$  avec le développement du chantier suivant une loi hyperbolique qui fait tendre  $h$  vers l'asymptote  $Kp$ .

Il est facile de voir que cette formule ne peut donner de résultat plausible que si la surface exploitée est très longue; appliquée à des chantiers courts, elle est absolument décevante. Mais la principale objection, c'est la méconnaissance du processus mécanique du phénomène. Nous savons qu'à partir d'une certaine longueur  $2R$  (ou peut-être  $2,5R$ ) l'avancement n'a plus aucune influence sur la profondeur de la cuvette, celle-ci a atteint son maximum et, si le chantier continue à avancer, la cuvette d'affaissement présente effectivement un fond plat de niveau.

Que donnerait la formule du trapèze pour cette longueur  $2R$ ? On trouve  $h = 0,45 Kp$ . C'est la moitié du maximum ou bien l'ordonnée à l'aplomb du périmètre du chantier. C'est là le seul point commun qu'aurait le trapèze avec le profil réel de la cuvette. Il se fait donc qu'en fait le domaine des discussions étant restreint presque toujours à l'espace compris entre la verticale et l'angle de fracture, on soit arrivé à certaines déductions vraisemblables bien qu'imprécises, par exemple sur l'influence de la profondeur et sur les effets comparatifs de couches superposées. De même qu'on peut faire une bonne pesée avec une balance fautive, du moment qu'on en est averti, on a pu établir des conclusions fondées quand il ne s'agissait que d'établir des rapports, mais pas des chiffres absolus.

En superposant ce trapèze fictif sur le profil réel, on voit qu'on s'écarte de celui-ci d'autant plus que l'aire exploitée est plus petite et, dans ce cas, même les comparaisons ne méritent aucune confiance si elles se font entre longueurs  $l$  et  $l'$  différentes.

Enfin, il n'est plus permis d'ignorer l'angle limite. Faute de cette notion, on a vu maintes fois comment les avis des experts varient subjectivement quant à l'étendue de la zone influencée.

En conclusion, il faut reléguer cette conception de la cuvette trapézoïdale dans le musée des erreurs historiques.

#### IV. — EXTRACTION PARTIELLE

La méthode des piliers réservés peut en principe empêcher tout affaissement à la surface. L'expérience a démontré que, sauf le cas de petites profondeurs et de roches très cohérentes, le rendement de la méthode est assez faible. Ainsi en terrain houiller, on peut atteindre 60 % jusqu'à 100 m de profondeur et ce taux va en diminuant à mesure que l'on approfondit. Il en résulte un gaspillage de la richesse minérale. L'objectif aujourd'hui n'est pas de supprimer les affaissements de la surface, mais de les atténuer jusqu'à un taux supportable et qui, malgré le manque à gagner résultant de l'abandon des piliers, laisse l'exploitation rentable. Ainsi est née en Angleterre la technique du pilier compressible qui permet de réaliser des extractions de 50 % jusqu'à 600 m de profondeur. En se basant sur la théorie des voûtes de pression, Alder, Potts et Walker ont exposé le rôle de ces piliers dans le contrôle du toit (Congrès de Liège, 1951). Dans des études antérieures, ils avaient étudié, d'après la même théorie, les affaissements à la surface et



extrait et quelques autres à intervalles assez rapprochés, on sera dans les conditions idéales pour vérifier comment se réalise le tassement en fonction du temps seulement. Il serait donc indiqué que les Comités d'études fassent connaître les résultats de leurs observations dans ce domaine ou qu'ils réservent une place de choix à ce cas particulier dans le programme de leurs travaux. Dans un bassin comme celui de la Campine, où il y a de vastes étendues encore vierges, on trouverait certainement un champ d'observation approprié.

2. Nous avons par cet exemple montré le parti qu'on peut tirer des observations et du graphique Wardell pour établir des prévisions. La méthode facilite aussi l'étude de projets d'exploitation harmonique par combinaison de panneaux décalés dans le temps, soit dans la même couche, soit dans deux couches superposées. On voit qu'il n'est pas nécessaire de prendre en considération un décalage moindre que  $R/2$ . Un décalage de  $R$  par contre s'impose parce qu'il fait coïncider la période de démarrage ou d'amortissement d'un chantier avec la période des grandes vitesses de descente de l'autre. Ces remarques sont de nature à diminuer le nombre d'épures à dresser pour arriver au meilleur programme. L'exemple fig. 9 du deuxième mémoire Wardell est instructif à cet égard. On y voit que le décalage entre les deux panneaux combinés est légèrement supérieur à  $R$ . Un autre domaine d'application est celui du départage des responsabilités ou des conventions entre charbonnages voisins pour l'aménagement de la zone d'influences communes.

3. S'il n'y a pas moyen d'arriver à une compensation par l'organisation des chantiers, il faut diminuer le plus possible le taux de l'affaissement par un remblai compact, mécanique ou pneumatique. Le système des fausses voies qui revient à creuser un trou pour combler un autre a peu d'influence sur le tassement final. Le remblayage rapporté est beaucoup plus efficace et il est aussi beaucoup moins dispendieux aux petites profondeurs qu'aux grandes; il est donc indiqué. Dans les mines très profondes, il est avéré que dans bien des cas le foudroyage favorise, non seulement une extraction intensive, mais aussi le contrôle du toit. Il restera préférable étant donné que, d'autre part, les dégâts à la surface sont fort atténués.

### Un procédé indéfendable.

Certains auteurs qui ont eu leur heure de célébrité, entre autres Thiriart et Goldreich, assimilent le profil de la surface affaissée à un trapèze ayant pour bases la longueur du chantier et celle de la surface influencée déterminée par les angles de fracture. Par une relation purement géométrique, en écrivant que le volume compris entre la surface primitive et la surface affaissée est égal au vide créé dans le fond, on détermine la hauteur  $h$  de ce trapèze en fonction de la puissance de la veine. Le calcul est possible, quelle que soit l'inclinaison des strates, en se conformant pour les angles de fracture aux règles de Dortmund. Cette formule fait croître la valeur de  $h$  avec le développement du chantier suivant une loi hyperbolique qui fait tendre  $h$  vers l'asymptote  $Kp$ .

Il est facile de voir que cette formule ne peut donner de résultat plausible que si la surface exploitée est très longue; appliquée à des chantiers courts, elle est absolument décevante. Mais la principale objection, c'est la méconnaissance du processus mécanique du phénomène. Nous savons qu'à partir d'une certaine longueur  $2R$  (ou peut-être  $2,5R$ ) l'avancement n'a plus aucune influence sur la profondeur de la cuvette, celle-ci a atteint son maximum et, si le chantier continue à avancer, la cuvette d'affaissement présente effectivement un fond plat de niveau.

Que donnerait la formule du trapèze pour cette longueur  $2R$ ? On trouve  $h = 0,45 Kp$ . C'est la moitié du maximum ou bien l'ordonnée à l'aplomb du périmètre du chantier. C'est là le seul point commun qu'aurait le trapèze avec le profil réel de la cuvette. Il se fait donc qu'en fait le domaine des discussions étant restreint presque toujours à l'espace compris entre la verticale et l'angle de fracture, on soit arrivé à certaines déductions vraisemblables bien qu'imprécises, par exemple sur l'influence de la profondeur et sur les effets comparatifs de couches superposées. De même qu'on peut faire une bonne pesée avec une balance fautive, du moment qu'on en est averti, on a pu établir des conclusions fondées quand il ne s'agissait que d'établir des rapports, mais pas des chiffres absolus.

En superposant ce trapèze fictif sur le profil réel, on voit qu'on s'écarte de celui-ci d'autant plus que l'aire exploitée est plus petite et, dans ce cas, même les comparaisons ne méritent aucune confiance si elles se font entre longueurs  $l$  et  $l'$  différentes.

Enfin, il n'est plus permis d'ignorer l'angle limite. Faute de cette notion, on a vu maintes fois comment les avis des experts varient subjectivement quant à l'étendue de la zone influencée.

En conclusion, il faut reléguer cette conception de la cuvette trapézoïdale dans le musée des erreurs historiques.

## IV. — EXTRACTION PARTIELLE

La méthode des piliers réservés peut en principe empêcher tout affaissement à la surface. L'expérience a démontré que, sauf le cas de petites profondeurs et de roches très cohérentes, le rendement de la méthode est assez faible. Ainsi en terrain houiller, on peut atteindre 60 % jusqu'à 100 m de profondeur et ce taux va en diminuant à mesure que l'on approfondit. Il en résulte un gaspillage de la richesse minérale. L'objectif aujourd'hui n'est pas de supprimer les affaissements de la surface, mais de les atténuer jusqu'à un taux supportable et qui, malgré le manque à gagner résultant de l'abandon des piliers, laisse l'exploitation rentable. Ainsi est née en Angleterre la technique du pilier compressible qui permet de réaliser des extractions de 50 % jusqu'à 600 m de profondeur. En se basant sur la théorie des voûtes de pression, Alder, Potts et Walker ont exposé le rôle de ces piliers dans le contrôle du toit (Congrès de Liège, 1951). Dans des études antérieures, ils avaient étudié, d'après la même théorie, les affaissements à la surface et



donné des règles pour les dimensions des piliers (9). Pour un même taux d'extraction, la largeur du vide n'est pas arbitraire et elle doit aller en croissant avec la profondeur. Le pilier doit être juste assez épais pour ne s'écraser que sur les bords et pouvoir supporter par son noyau la pression de culée. Depuis 1949, diverses applications ont été faites dans les mines de Grande-Bretagne.

Le deuxième mémoire de MM. Wardell et Beevers nous apporte un exemple d'une extraction à 40 %, dans une couche de 1,65 m à 685 m de profondeur prise par panneaux de 72 m de largeur. Les deux faits saillants ressortant d'un nivellement en travers sont d'abord la réduction de l'affaissement par rapport à l'épaisseur de la veine (6 %) et ensuite la forme très plate du fond de la cuvette et l'absence de mouvements horizontaux.

A juger par la figure 8 et les cotes, le bord extrême de la cuvette à l'extrémité du quartier répond au même angle limite que dans le cas de tailles continues, et l'ordonnée à l'aplomb du périmètre du premier panneau est égale à 50 % de celle du fond de la cuvette. On en conclut que, s'il y a des dômes de Fayol, leur stabilité est précaire et leur existence éphémère. Leur effondrement se manifeste à la surface par une dépression du sol dont la formation se fait d'après le même mécanisme que dans tous les autres cas observés. La vitesse de descente pourrait être différente. Il faut attendre les résultats des observations en cours pour être renseigné sur ce point et sur certains autres parmi lesquels l'effet du taux de mise à fruit serait sans doute le plus intéressant. On recherchera notamment si le taux d'extraction doit diminuer quand on prend successivement les couches dans l'ordre descendant.

La dimension des vides doit être déterminée d'après la profondeur ou, ce qui revient au même et est assez commode pour fixer les idées, en fonction du rayon R. Se basant sur le taux de 40 % et l'exemple cité, M. Wardell propose les rapports R/6,5 pour les vides et R/4,4 pour les piliers. Mais ce taux de 40 % n'a rien d'absolu. En nous référant aux travaux des auteurs déjà cités, nous trouvons les coefficients suivants :

$$\begin{array}{l} \text{pour } R = 630 \text{ m} \quad V = 0,175 R \quad P = 0,20 R \\ \quad \quad \quad R \text{ entre } 472 \text{ et } 315 \text{ m} \quad V = P = 0,20 R \\ \quad \quad \quad R = 70 \text{ m} \quad V = 0,30 R \quad P = 0,22 R \end{array}$$

L'effet des piliers sur la surface est complexe. Au dessus de chaque chambre, il se forme une cuvette qui déborde très largement sur les piliers et les chambres voisines. Ainsi, par exemple, si la dimension du vide est R/6, la zone d'influence à la surface aura une largeur  $2R + R/6$ , c'est-à-dire que chaque chambre est influencée de part et d'autre par ses deux voisines et différemment suivant la distance, donc aussi suivant l'épaisseur du pilier. En cumulant les affaissements qui se superposent suivant une même verticale, on aura l'ordonnée de l'affaissement total en chaque point et la forme

finale de la cuvette. Elle sera toujours beaucoup moins profonde que dans le cas d'une extraction totale et plus ou moins ondulée. En pratique, il arrive que ces ondulations soient de l'ordre des erreurs d'observation. Cela s'explique par le décalage des fronts de taille dans l'espace et dans le temps. A la partie centrale d'une chambre, siège de compressions, viennent se superposer en chevauchant trois zones d'extension des cuvettes voisines et il y a donc une certaine compensation des déplacements horizontaux. La continuité de l'extraction exige que, sitôt un panneau épuisé, le suivant soit mis en exploitation et ainsi les affaissements se produisent suivant un rythme déterminé.

L'expérience est concluante quant au succès de la méthode qui est donc très recommandable aux charbonnages ayant encore des réserves à petite profondeur sous des agglomérations urbaines.

Un charbonnage liégeois a fait une application du système en 1952 dans un quartier sous lequel n'existait aucune exploitation connue. Une couche de 1,20 m d'ouverture et de 12° d'inclinaison a été déhouillée en deux fois sur une hauteur d'étage de 40 mètres par longues tailles chassantes prises dans l'ordre descendant et ayant respectivement 86 m et 65 m de longueur. La profondeur moyenne est de 210 m et le rayon de la zone d'influence  $R = 147 \text{ m}$ .

Au début, on a choisi des panneaux de 34 m séparés par des piliers de 26 m, l'un de ces panneaux a été foudroyé et les autres, remblayés pneumatiquement. Quand on est arrivé à la fin du quatrième panneau, on a jugé opportun de réduire la largeur des vides à 26 m, chiffre qui a été maintenu dans la suite pour toute la tranche d'aval. Celle-ci a été mise en train 8 mois après la première. La vitesse d'avancement a été en moyenne de 17 m par mois pendant la première période et de 26 m pendant la seconde.

Des nivellements ont été faits suivant une ligne brisée qui recoupe 7 panneaux et à intervalles de 3 à 6 mois. Le point le plus bas se trouve au-dessus du panneau foudroyé et le dernier affaissement mesuré a été de 55 mm, 16 mois après le passage de la taille. Cela correspond à 4,6 % de l'ouverture de la veine. Dans le panneau voisin remblayé, on a trouvé 43 mm après 22 mois. Ce tassement n'est certainement pas terminé et il ne comprend pas à cette date l'effet de la tranche inférieure. Des prochains nivellements seront exécutés jusqu'à l'état final pour préciser la question.

On peut remarquer que la longueur totale du front sur cette hauteur d'étage est égale à R et que les dimensions des vides et des pleins sont de R/6.

Dès à présent, on peut conclure de cette expérience que le taux d'extraction de 60 % paraît aventureux, que celui de 50 % combiné avec le remblayage pneumatique paraît sûr. L'affaissement total ne dépassera vraisemblablement pas le quart de ce qu'il serait dans le même espace exploité par tailles continues.

## OBSERVATIONS FINALES

Les nivellements précis et périodiques constituent la seule base scientifique de l'étude de ces phénomènes complexes que sont les affaissements miniers.

(9) On trouvera un bon exposé de ces travaux dans « Quelques aspects de l'exploitation des mines sous les agglomérations urbaines en Angleterre », par M. DELAVESNE (Revue Ind. Minérale, octobre 1950).



Il faut donc en faire le plus possible et dans des conditions diverses. Nous sommes assez bien documentés par les recherches récentes sur les couches plates. Nous le sommes encore très mal sur les couches de fort pendage, c'est donc là qu'il y a urgence à faire des recherches. Il n'est pas indispensable d'opérer dans un champ où il n'y aurait qu'une seule couche en exploitation pour déterminer les angles limites à la tête et au pied d'une taille. Le cas du dressant vertical, notamment, est fort controversé. Mais il y a des régions qui se

prêtent admirablement aux observations, par exemple les grands dressants du bassin de la Sarre.

La progression des affaissements en fonction du temps demande à être vérifiée dans tout gisement dont les conditions diffèrent notablement de celles des bassins du Yorkshire, donc surtout là où la stratification est tourmentée. Le cas des chantiers très étroits appelle aussi des précisions. La représentation graphique de M. Wardell est très commode et se prête très bien aux calculs de vérifications, de discernement d'influence et de prévisions.

---