

# Avancements et Prix de revient

DU PROCÉDÉ DE

## FONÇAGE DES PUIITS PAR CONGÉLATION (1)

PAR

M. LE PROFESSEUR STEGEMANN

d'Aix-la-Chapelle (2)

M. L. Hoffmann a publié, en 1901, un article plein d'intérêt (3) concernant les avancements obtenus ainsi que les frais occasionnés par les fonçages de puits dans le bassin de la Ruhr. L'expérience considérable qu'il possède à ce sujet lui a permis d'investiguer à fond le côté économique du fonçage des puits dans le dit bassin et d'établir des moyennes pour ce qui concerne les avancements et les prix de revient. Aujourd'hui, après plus de dix ans, ses calculs conservent toute leur valeur et on peut encore se baser sur ses chiffres à condition de tenir compte des changements subis par les deux facteurs variables : salaires et prix des matières premières.

Hoffmann avait divisé son étude en trois parties :

1. Fonçage suivant le procédé ordinaire, c'est-à-dire à niveau vide avec épuisement ;
2. Le fonçage à niveau plein par battage (procédé Kind-Chaudron) ;
3. Le procédé par revêtements descendants.

Dans le *Sammelwerk* (4), où il a également consigné les résultats

(1) Tout ce qui concerne le fonçage des puits à travers les morts-terrains aquifères présente un grand intérêt d'actualité en Belgique où tant de puits sont en creusement ou vont être creusés à travers de grandes épaisseurs de morts-terrains de ce genre. L'article de M. le Prof. Stegemann ajoutera d'intéressantes données à celles déjà publiées récemment par M. l'Ingénieur BREYRE dans les tomes XV et XVI des *Annales des Mines de Belgique*.  
V. W.

(2) Extrait du *Glückauf*, n° du 16 mars 1912. — Traduction de G. W.

(3) Voir *Glückauf*, 1901, pp. 755 et suiv.

(4) *Die Entwicklung des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlen Bergbaues in der zweiten Hälfte des 19<sup>te</sup> Jahrhunderts*, vol. III, pp. 146 et suiv., 252 et suiv. et 454 et suiv.

publiés dans l'article cité plus haut, Hoffmann étudie aussi le procédé de fonçage par congélation au point de vue du rendement et du prix de revient. Cette étude présente cependant moins d'intérêt que celle des autres procédés, par le fait que l'auteur n'a pu, à cette époque, disposer, pour asseoir ses conclusions, que de peu de données. Or, l'importance du procédé par congélation ne cessant de croître d'année en année en Allemagne, surtout pour les exploitations de potasse et celles de houille du bassin du Rhin inférieur, des chiffres concernant le côté économique du procédé en question présenteraient sans aucun doute un intérêt de plus en plus grand.

Il est malheureusement tout à fait impossible de donner pour ce procédé, comme Hoffmann l'a fait pour les autres, des moyennes résultant d'une longue expérience; presque tous les fonçages par congélation sont en effet entrepris à forfait par des firmes spécialistes et celles-ci, pour des raisons commerciales, tiennent secret les résultats économiques obtenus. Malgré tout cependant, je vais essayer ici de donner une idée, au moins approximative, des avancements et des prix de revient dans le procédé de fonçage par congélation pour divers diamètres et profondeurs de puits. Pour ce faire, je me baserai en partie sur des données positives et en partie sur des supputations et interpolations entre deux valeurs connues.

Evidemment, l'avancement et le prix de revient changent suivant la constitution des morts-terrains à traverser. Il est donc nécessaire de considérer une espèce déterminée de morts-terrains comme une sorte de point de comparaison. Le terrain que je choisirai comme terrain-type sera le tertiaire du bassin du Rhin inférieur. J'ai pour faire ce choix, plusieurs raisons: d'abord c'est le terrain que je suis le mieux à même de connaître et, ensuite, le choix de ce terrain présente certains avantages au point de vue qui nous occupe. Ce terrain, composé d'une succession de couches de sables, sables argileux et argiles tertiaires, n'oppose pas à la congélation des difficultés particulières; c'est d'ailleurs cette raison qui, durant la dernière période décennale, a fait donner la préférence au procédé en question; en Hollande, notamment, il a été très employé. Le terrain tertiaire du bassin du Rhin inférieur peut donc constituer un bon terme de comparaison.

Les morts-terrains de la rive gauche du Rhin ont été décrits par Wunstorff et Fliegel dans leur *Géologie des terrains de la rive gauche du Rhin inférieur*, et aussi par le soussigné, au point de vue du fonçage des puits, dans sa publication *Le fonçage des puits dans les morts-terrains de la rive gauche du Rhin*.

De même que pour le fonçage de puits par tour descendante, on commence généralement, pour le fonçage par congélation, à creuser des puits préparatoires jusqu'au niveau naturel de l'eau. Ces puits ont pour but de recevoir les couronnes distributrices et collectrices de la solution saline; on doit leur donner un diamètre suffisant pour qu'on puisse y loger, outre les sondages de congélation, les sondages supplémentaires qui seront nécessaires. Il s'en suit que les deux quantités: avancement et prix de revient de ces puits préparatoires varient suivant la constitution des terrains, la situation de la nappe aquifère, le diamètre et la profondeur des trous de congélation; c'est donc une question distincte de celle de l'avancement et du prix de revient des puits proprement dits foncés par le procédé par congélation.

Il n'en est pas moins vrai que ces puits préparatoires constituent un accessoire pour ainsi dire indispensable du procédé par congélation; mentionnons donc que l'avancement a oscillé entre 2 et 15 mètres par mois et le prix de revient de 1 mètre de puits préparatoire entre 1,000 et 1,800 marks suivant le diamètre et le revêtement du puits, revêtement en fers U, avec garnissage, ou en béton.

Disons en passant que la réussite de tout le puits pouvant dépendre du soin apporté à l'exécution du revêtement du puits préparatoire, on a déjà commencé à employer pour cet usage le béton armé.

Au sujet de l'avancement du fonçage proprement dit, par congélation, voici les chiffres qui m'ont été fournis par les mines de l'Etat du Limbourg Hollandais et qui concernent les puits Emma I et II, de 5<sup>m</sup>80 et 4<sup>m</sup>50 de diamètre intérieur respectivement, dont le fonçage fut exécuté par l'Administration elle-même.

| PÉRIODES  | NOMBRE<br>de journées<br>de travail | AVANCEMENT EN MÈTRES      |          |
|---|-------------------------------------|---------------------------|----------|
|   |                                     | par journée<br>de travail | par mois |
| <b>Puits I, de 5<sup>m</sup>80 de diamètre intérieur.</b>                     |                                     |                           |          |
| 1 <sup>re</sup> période : 15 à 111 <sup>m</sup> 70 . . . . .                  | 118                                 | 0.82                      | 20.40    |
| a) Creusement . . . . .   | 69                                  | 1.40                      | 34.50    |
| b) Revêtement (ou pose du cuvelage). . . . .                                  | 49                                  | 1.97                      | 49.90    |
| 2 <sup>me</sup> période : 111 <sup>m</sup> 70 à 202 <sup>m</sup> 40 . . . . . | 113                                 | 0.80                      | 20. »    |
| a) Creusement . . . . .   | 75                                  | 1.21                      | 29.50    |
| b) Revêtement . . . . .   | 38                                  | 2.39                      | 61.80    |
| 3 <sup>me</sup> période : 202 <sup>m</sup> 40 à 236 <sup>m</sup> 10 . . . . . | 61                                  | 0.55                      | 13.60    |
| a) Creusement . . . . .   | 31                                  | 1.09                      | 26.60    |
| b) Revêtement . . . . .   | 30                                  | 1.12                      | 28.10    |
| Total Creusement . . . . .  | 175                                 | 1.26                      | 31. »    |
| — Revêtement . . . . .  | 117                                 | 1.89                      | 48.03    |
| Ensemble. . . . .   | 292                                 | 0.76                      | 18.84    |
| Total, y compris congélation . . . . .  | 368                                 | 0.62                      | 15.43    |
| — y compris congélation et sondages préparatoires . . . . .                   | 629                                 | 0.35                      | 8.80     |
| <b>Puits II, de 4<sup>m</sup>50 de diamètre intérieur.</b>                    |                                     |                           |          |
| 1 <sup>re</sup> période : 15 <sup>m</sup> 40 à 107 <sup>m</sup> 30 . . . . .  | 52                                  | 1.77                      | 44.46    |
| a) Creusement . . . . .   | 28                                  | 3.28                      | 83.54    |
| b) Revêtement . . . . .   | 24                                  | 3.85                      | 95.69    |
| 2 <sup>me</sup> période : 107 <sup>m</sup> 30 à 202 <sup>m</sup> 15 . . . . . | 83                                  | 1.14                      | 28.74    |
| a) Creusement . . . . .   | 56                                  | 1.69                      | 42.47    |
| b) Revêtement . . . . .   | 27                                  | 3.51                      | 88.92    |
| 3 <sup>me</sup> période : 202 <sup>m</sup> 15 à 238 <sup>m</sup> 74. . . . .  | 42                                  | 0.87                      | 21.95    |
| a) Creusement . . . . .   | 27                                  | 1.36                      | 33.26    |
| b) Revêtement . . . . .   | 15                                  | 2.44                      | 64.57    |
| Total Creusement. . . . .   | 111                                 | 2.01                      | 50.38    |
| — Revêtement. . . . .   | 66                                  | 3.39                      | 86.13    |
| Ensemble. . . . .   | 177                                 | 1.26                      | 31.75    |
| Total, y compris congélation . . . . .  | 228                                 | 0.98                      | 25.19    |
| — y compris congélation et sondages préparatoires . . . . .                   | 445                                 | 0.50                      | 12.79    |

Les deux puits avaient des puits préparatoires d'environ 15 mètres de profondeur et furent foncés, comme le montrent les tableaux ci-dessus, en trois périodes dont la dernière comprit le raccordement du cuvelage dans le terrain houiller non congelé. On voit donc qu'au puits II on a eu un avancement maximum mensuel de 83<sup>m</sup>54 pour le fonçage, et de 95<sup>m</sup>69 pour le revêtement, tandis que la moyenne totale d'avancement, depuis le commencement du fonçage jusqu'à la terminaison du cuvelage de raccordement, a atteint 12<sup>m</sup>79 par mois. Ce sont là des résultats, à ma connaissance, uniques dans l'histoire du procédé par congélation; avec aucun autre procédé on n'en a obtenu qui puissent soutenir avec ceux-ci une comparaison même approximative. Evidemment on profita pour le fonçage du puits II de l'expérience des circonstances locales acquise lors du fonçage du puits n° I.

En général, voici ci-dessous les avancements maxima que l'on pourra prévoir pour un fonçage dans le tertiaire du bassin du Rhin inférieur par le procédé de congélation, jusqu'à une profondeur de 400 mètres et pour un diamètre de 4<sup>m</sup>50 à 6 mètres.

Ce tableau ne donne que le temps nécessaire pour la construction même du puits, c'est-à-dire qu'on suppose que tous les travaux accessoires, tels que construction de la tour de fonçage, établissement des chaudières, des ateliers des machines frigorifiques, des refroidisseurs d'eau, etc., ont été exécutés d'avance ou, au moins, par une organisation judicieuse des travaux, ont pu être exécutés en même temps. De même, on ne peut compter sur ces avancements que si les terrains ont été d'avance parfaitement reconnus par des sondages et que tout le travail de fonçage peut marcher du commencement à la fin sans que rien ne cloche dans l'organisation du travail et sans contre-temps notables; ces conditions ont été réalisées plus d'une fois lors du fonçage du deuxième puits d'un siège double, tandis que lors du fonçage du premier puits, donc dans des terrains dont la connaissance locale n'est pas encore parfaite, on s'est presque toujours heurté à des difficultés considérables.

Remarquons encore ce qui suit :

Colonne 1. — Pour le travail de sondage, nous avons admis un avancement moyen, y compris la pose des tuyaux, de 70 à 75 mètres par journée de travail, avancement qu'on a plus d'une fois atteint et même dépassé, lors du fonçage des nouveaux puits dans le tertiaire bas-rhénan, grâce à l'établissement de plusieurs treuils de sondage et aux précautions nombreuses prises pour le forage bien vertical des trous. Nous avons aussi admis une profondeur de trous, dans les quatre cas (*a* à *d*), de 10 mètres plus grande que la profondeur de congélation même. On sait que cette façon d'opérer a pour but d'éviter les ruptures aux passages des terrains meubles aux terrains compacts, et on recommande aussi de placer les trousseaux du cuvelage de raccordement plus profondément encore (comme cela s'est fait aux puits Emma), dans le terrain compact non congelé.

Colonne 2. — Les données concernant la puissance des machines frigorifiques nous sont dictées par l'expérience. Les chiffres des calories négatives ou frigories ont pour unité de temps l'heure et se rapportent à une température de saumure de  $-20^{\circ}$  C.

Colonne 3. — La durée de cet intervalle dépend moins de la profondeur que de la teneur en eau des terrains situés immédiatement en-dessous du niveau naturel des eaux et de la puissance des machines frigorifiques. La plus grande partie des frigories doit souvent être consacrée à faire passer l'eau de l'état liquide à l'état solide, c'est-à-dire à enlever simplement la chaleur latente. Il s'en suit que pour

TABEAU D'ENSEMBLE I. — Avancements du fonçage de puits par congélation.

| Diamètre intérieur<br>et<br>profondeur des<br>puits.<br>—<br>m. | 1<br>FORAGE ET PRÉPARATION DES TROUS DE CONGÉLATION<br>(pose des tubes de revêtement et congelateurs) |  |   |   | 2<br>Nombre<br>de frigories<br>de<br>l'installation<br>de<br>congélation | 3<br>Durée de l'intervalle<br>entre le commencement<br>de la congélation<br>et le commencement<br>du fonçage<br>Mois | 4<br>Fonçage et revêtement<br>y compris<br>raccordement au<br>houiller<br>Mois | 5<br>Dégel<br>—<br>Mois | 6<br>Durée<br>totale<br>—<br>Mois | 7<br>Avance-<br>ments<br>en<br>un mois<br>—<br>m. |
|---|---|--|---|---|--|--|--|-------------------------|-----------------------------------|---|
|   | Diamètre<br>du cercle de<br>congélation.<br>m.  | Nombre de trous<br>de congélation<br>+<br>trous supplé-<br>mentaires | Profon-<br>deur des<br>trous<br>—<br>m. | Profon-<br>deur<br>totale<br>de fonçage<br>requise<br>—<br>m. |  |  |  |                         |                                   |   |
| <i>a</i><br>Diamètre : 4,50<br>Profondeur : 100                 | 6,50  | 21 + 4 = 25  | 110                                     | 2,750   | 1 ½  | 4  | 2  | 9                       | 12,20                             |   |
| <i>b</i><br>Diamètre : 5,—<br>Profondeur : 200                  | 8,—   | 25 + 8 = 33  | 210                                     | 6,930   | 2  | 6  | 4  | 16                      | 13,10                             |   |
| <i>c</i><br>Diamètre : 5,50<br>Profondeur : 300                 | 10,—  | 32 + 12 = 44   | 310                                     | 13,640  | 2 ½  | 9  | 6  | 24 ½                    | 12,70                             |   |
| <i>d</i><br>Diamètre : 6,—<br>Profondeur : 400                  | 12,—  | 38 + 16 = 54   | 410                                     | 22,140  | 3  | 12   | 8  | 35                      | 11,70                             |   |

des machines frigorifiques d'égale puissance, la durée de l'intervalle en question dépend, en première ligne de la teneur en eau des couches de terrains situées en-dessous du niveau des eaux. Cette durée n'en est pas moins influencée également par la profondeur, en ce sens que, avec la profondeur, les risques inhérents au fonçage croissent et, par conséquent, la prudence apportée au travail doit également croître. Le procédé de congélation par passes employé, par exemple, à la mine de potasse « Schieferkante », permet d'ailleurs d'accélérer les opérations.

On reconnaît qu'on peut commencer à creuser quand on voit monter le niveau de la nappe aquifère à l'intérieur du cercle de congélation.

Colonne 4. — Les données de cette colonne résultent de l'expérience des derniers creusements. Elles varieront évidemment suivant que le puits sera construit avec cuvelage posé par passes, ou, comme dans les terrains à argiles fortement gonflantes, avec un cuvelage posé en descendant.

Colonne 5. — Quand le dégel a simplement pour but de récupérer les tuyaux de congélation, c'est une opération qui ne dure pas longtemps; mais il en est autrement quand le dégel a pour but de faire disparaître toutes les tensions produites par la congélation.

La congélation a pour effet de dilater le terrain aquifère, tandis que le cuvelage se contracte; lors du dégel, le phénomène inverse se produit. Au fur et à mesure des progrès du dégel, en dépit du serrage continu des boulons et du calfatage des joints de plomb, des afflux toujours croissants d'eau se manifestent, jusqu'à ce que le dégel soit terminé. Le plus sûr pour le puits est de laisser le dégel s'opérer naturellement; mais, pour des puits profonds, cela peut durer des années. Généralement, on n'a ni le temps ni la patience d'attendre et on active l'opération artificiellement en chauffant la saumure dans les circuits entourant le puits et l'eau même du puits par injection de vapeur. Il faut donc faire certaines réserves au sujet des délais consignés dans cette colonne; ils dépendent, en résumé, de l'importance que, dans un cas donné, on attache à la disparition de toutes les pressions et tensions et à un écoulement des eaux donnant le plus de sécurité possible.

Colonne 6. — Ces nombres sont les sommes de ceux renseignés aux colonnes 1, 3, 4 et 5.

Colonne 7. — Les avancements totaux diminueront, *grosso modo*,

au fur et à mesure que la profondeur augmentera. D'autre part, ils n'atteindront pas leur maximum avec une très petite profondeur; nous nous estimons donc justifiés à faire passer le point le plus élevé de la courbe des avancements environ à la profondeur de 200 mètres, mais, disons-le encore une fois, ce maximum ne peut être atteint que si les opérations de fonçage ne sont pas entravées par des vices d'organisation ou des incidents quelconques.

L'établissement d'un *prix de revient* probable rencontre encore plus de difficultés que celui de l'avancement et de la durée probable des travaux. Néanmoins, ici aussi, m'appuyant sur toute une série de données expérimentales, j'ai essayé d'établir une sorte de devis que l'on trouvera sous forme de tableau (tableau II).

De même que pour l'avancement, j'ai supposé quatre cas différents de profondeur et diamètre de puits. Les valeurs unitaires, — nous en parlerons encore plus loin — ont été estimées suffisamment haut pour qu'un puits puisse être foncé dans le tertiaire bas-rhénan au prix consigné dans la colonne 6, à condition, bien entendu, qu'on ne rencontre aucune difficulté spéciale. Pour l'établissement de ce tableau, nous avons supposé l'installation d'un siège double, de sorte que les deux puits pourraient être congelés au moyen d'une seule installation frigorifique, ce qui, quand il s'agit de mine de houille, est le cas le plus fréquent. Nous n'avons pas compté le prix d'un réservoir pour l'eau de refroidissement et d'alimentation, car cela représente, de même, par exemple, que la chaufferie, une valeur durable dont profitera plus tard encore le siège d'exploitation.

Il y a, diminuant les frais, certaines rentrées comme, notamment, celles résultant de la récupération des tubes de sondage et de congélation. C'est là une valeur qui, estimée exactement, est loin d'être négligeable. Pour des puits de 400 mètres de 6 mètres de diamètre, par exemple, en comptant que 1 mètre de tuyau de congélation vaut M. 7.50, on obtient une valeur de  $22,140 \times 7.50 = 166,050$  Marks. C'est évidemment une somme, mais elle diminue d'importance quand il s'agit de puits profonds et quand on la compare à la somme globale des frais (dans le cas qui nous occupe, plus de 3,000,000 de Marks). Aussi a-t-on souvent, pour des puits profonds, abandonné complètement les tuyaux de congélation pour ne pas bouleverser le terrain et mettre le puits en danger en les retirant. On va même jusqu'à y trouver un certain avantage en ce sens que cette couronne de tuyaux constituerait pour le puits une certaine protection, un renforcement.

TABLEAU D'ENSEMBLE II. — Prix de revient du fonçage par congélation.

| DIAMÈTRE<br>intérieur<br>et profondeur des puits<br>—<br>m. | 1<br>Appareils de fonçage |                     |  |                     |  |                     | Travaux<br>pose          |                     |                         |                     |
|---|---------------------------|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
|   | Tour de fonçage           |                     | Treuil d'extraction, câbles, tuyaux d'aérage |                     | Autres appareils câbles, cuffats, etc. |                     | TOTAL pour un puits — M. |                     | Prix du parc de sondage |                     |
|   | en tout<br>M.             | pour un puits<br>M. | en tout<br>M.                                | pour un puits<br>M. | en tout<br>M.                          | pour un puits<br>M. | en tout<br>M.            | pour un puits<br>M. | en tout<br>M.           | pour un puits<br>M. |
| <i>a</i><br>Diamètre : 4.50<br>Profondeur : 100             | 20,000                    | 10,000              | 79,000                                       | 13,500              | 15,000                                 | 7,500               | 31,000                   | 45,000              | 4,500                   |                     |
| <i>b</i><br>Diamètre : 5.—<br>Profondeur : 200              | 25,000                    | 12,500              | 91,000                                       | 15,500              | 20,000                                 | 10,000              | 38,000                   | 50,000              | 5,000                   |                     |
| <i>c</i><br>Diamètre : 5.50<br>Profondeur : 300             | 30,000                    | 15,000              | 103,000                                      | 17,500              | 25,000                                 | 12,500              | 45,000                   | 55,000              | 5,500                   |                     |
| <i>d</i><br>Diamètre : 6.—<br>Profondeur : 400              | 35,000                    | 17,500              | 115,000                                      | 19,500              | 30,000                                 | 15,000              | 52,000                   | 60,000              | 6,000                   |                     |

| 2<br>de forage (y compris la de toutes les tuyauteries) |  |  |  | 3<br>Installations frigorifiques |               |                     |               |                     |               |                     |                          |
|---|--|--|--|----------------------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|--------------------------|
| Longueur à forer et à revêtir<br>m.                     | Prix du forage et du revêtement<br>M/m | Prix des sondages de congélation y compris la tuyauterie<br>M. | Prix total des travaux de forage<br>M. | Puissance en frigories           | Prix          |                     | Fondations    |                     | Bâtiments     |                     | TOTAL pour un puits — M. |
|   |  |  |  |                                  | en tout<br>M. | pour un puits<br>M. | en tout<br>M. | pour un puits<br>M. | en tout<br>M. | pour un puits<br>M. |                          |
| 2,750   | 30                                     | 82,500   | 87,000                                 | 250,000                          | 130,000       | 13,000              | 16,000        | 8,000               | 8,000         | 2,000               | 23,000                   |
| 6,930   | 40                                     | 277,200  | 282,200                                | 500,000                          | 250,000       | 25,000              | 20,000        | 10,000              | 12,000        | 3,000               | 38,000                   |
| 13,640  | 50                                     | 682,000  | 687,500                                | 750,000                          | 360,000       | 36,000              | 30,000        | 15,000              | 16,000        | 4,000               | 55,000                   |
| 22,140  | 60                                     | 1,328,400  | 1,334,400                              | 1,000,000                        | 450,000       | 45,000              | 40,000        | 20,000              | 20,000        | 5,000               | 70,000                   |

| DIAMÈTRE<br>intérieur<br>et profondeur du puits<br>—<br>m. | 4<br>Congélation   |                              |                        | Total des salaires y compris les explosifs |               |
|--|--|------------------------------|------------------------|--|---------------|
|  | Durée depuis le commencement jusqu'à la fin du creusement<br>—<br>Mois | Prix pour un mois<br>—<br>M. | Prix total.<br>—<br>M. | par mètre<br>M.                            | en tout<br>M. |
|  |  |                              |                        |  |               |
| <i>a</i><br>Diamètre : 4.50<br>Profondeur : 100            | 5 1/2  | 4,000                        | 22,000                 | 300  | 30,000        |
| <i>b</i><br>Diamètre : 5.—<br>Profondeur : 200             | 8  | 7,000                        | 56,000                 | 400  | 80,000        |
| <i>c</i><br>Diamètre : 5.50<br>Profondeur : 300            | 11 1/2   | 10,000                       | 115,000                | 500  | 150,000       |
| <i>d</i><br>Diamètre : 6.—<br>Profondeur : 400             | 15   | 12,000                       | 180,000                | 600  | 240,000       |

| 5<br>Creusement et cuvelage |                     |                           |                |                              |                          | 6<br>PRIX<br>TOTAL |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Revêtement provisoire       |                     | Cuvelage pour un puits    |                | Bétonnage pour un puits — M. | Total pour un puits — M. | —<br>M.            |
| par mètre<br>M.             | pour un puits<br>M. | Cercles de cuvelage<br>M. | Trousses<br>M. |                              |                          |                    |
| 50                          | 5,000               | 100,000                   | 5,000          | 12,500                       | 152,500                  | 315,500            |
| 50                          | 10,000              | 308,000                   | 15,400         | 30,000                       | 443,400                  | 857,600            |
| 50                          | 15,000              | 614,000                   | 30,700         | 52,500                       | 862,200                  | 1,764,700          |
| 50                          | 20,000              | 1,072,000                 | 53,600         | 80,000                       | 1,465,600                | 3,102,000          |

Cette supposition nous paraît bien sujette à caution car, somme toute, ces tuyaux sont éloignés les uns des autres. Dans le tableau suivant qui condense les données du tableau II, nous n'avons guère tenu compte de ces rentrées de fonds; en fait, nous ne nous en sommes souvenus que dans le but d'arrondir les sommes.

TABLEAU III. — Prix de revient.

| DIAMÈTRE<br>intérieur<br>et profondeur du puits<br>—<br>Mètres | PRIX TOTAL<br>d'après le<br>tableau II<br>—<br>Marks | A DÉDUIRE<br>(pour récupération des<br>tuyauteries<br>et pour<br>arrondir)<br>—<br>Marks | RESTE<br>—<br>Marks | PRIX<br>par mètre<br>courant de<br>puits<br>(en chiffres<br>ronds)<br>—<br>Marks |
|--|--|--|---------------------|--|
| <i>a</i><br>Diamètre : 4.50<br>Profondeur : 100                | 315.500  | 15.500   | 300.000             | 3.000  |
| <i>b</i><br>Diamètre : 5.—<br>Profondeur : 200                 | 857.600  | 57.600   | 800.000             | 4.000  |
| <i>c</i><br>Diamètre : 5.50<br>Profondeur : 300                | 1.764.700  | 64.700   | 1.700.000           | 5.700  |
| <i>d</i><br>Diamètre : 6.—<br>Profondeur : 400                 | 3.102.000  | 102.000  | 3.000.000           | 7.500  |

On voit que le prix d'un mètre de puits foncé au procédé par congélation augmente d'une façon très considérable quand le diamètre et, en même temps, la profondeur augmentent. La différence n'est cependant pas si forte si on tient compte de la section utile du puits. Prenons, par exemple, le premier et le dernier cas (*a* et *d*) : nous aurons la proportion suivante pour les prix :  $3.000 : 7.500 = 9 : 22.50$ , mais la proportion pour les sections est  $4.50^2 : 6^2 = 9 : 16$ .

Dans les sommes finales n'est pas compris le bénéfice de l'entrepreneur. Si l'on tient compte de ce fait, on verra que les données des tableaux correspondent bien aux résultats obtenus pratiquement.

Au sujet du tableau II, remarquons ce qui suit :

Colonne 1. — Une tour de fonçage en bois revient, dans les cas ordinaires, à 15.000 Marks environ. Nous avons compté davantage parce que pour le procédé par congélation, la tour doit recouvrir tout le puits préparatoire et doit donc être plus spacieuse, et aussi parce que, dans ce procédé, la tour est fort utilisée pour les travaux de sondage. Si, comme l'a fait l'Etat Hollandais, on élève une tour en fer, avec couverture en bois, le prix est encore de 60 % plus élevé. Il faut aussi tenir compte de ce que la tour pourra être utilisée pour l'approfondissement ultérieur du puits, c'est pourquoi nous n'avons chargé le compte du puits par congélation que de la moitié du prix de revient.

Voici les données qui nous ont permis d'établir les prix de la machine motrice, du câble et des installations d'aérage :

| Pour une profondeur de                          | 0 à 100 | 100 à 200 | 200 à 300 | 300 à 400 mètres |
|---|---------|-----------|-----------|------------------|
| Machine motrice. . . . .                        | 50,000  | 60,000    | 70,000    | 80,000 M.        |
| Câble . . . . .                                 | 20,000  | 20,000    | 20,000    | 20,000 »         |
| Tuyaux d'aérage, divers<br>câbles, etc. . . . . | 9,000   | 11,000    | 13,000    | 15,000 »         |
| Total . . . . .                                 | 79,000  | 91,000    | 103,000   | 115,000 M.       |

Ces sommes sont suffisantes pour la profondeur double du puits de congélation, donc aussi pour l'approfondissement ultérieur; mais comme ces installations servent non seulement aux approfondissements subséquents mais seront encore utilisées deux fois après, elles sont portées au tableau non pour la moitié mais seulement pour  $1/2 \times 1/3 = 1/6$  de leur valeur, tandis que les corderies, cuffats, etc. y sont portés, comme la tour de fonçage, pour  $1/2$  de leur valeur.

Colonne 2. — Pour le parc de sondage, nous avons compté qu'il faudrait trois installations complètes de sondage, mais celles-ci pourraient être utilisées certainement au moins 10 fois, de sorte que nous ne porterons dans la colonne que  $1/10^e$  de leur valeur. Les données concernant le nombre de mètres à sonder sont tirés du tableau I. Les frais comprennent ceux de sondage et de tubage, le prix des tuyaux de congélation et de descente, des couronnes distributrice et collectrice. Ces prix sont obtenus en faisant une moyenne pour tout le sondage: il en résulte que pour des sondages à grande profondeur, en dépit du grand diamètre initial que l'on doit donner, au trou, ils pourraient être considérés comme assez élevés.

Colonne 3. — Nous avons déterminé la puissance de l'installation frigorifique en nous basant sur les données du tableau I. L'installation est comptée, pour chaque puits, pour un dixième de sa valeur, les fondations sont comptées pour la moitié, les bâtiments pour un quart de leur valeur, étant donné que les machines frigorifiques peuvent servir pour cinq doubles sièges, les bâtiments, en tout, pour deux doubles sièges. Quant aux fondations, elles ne peuvent naturellement, servir que pour un seul siège double.

Colonne 4. — Dans ces nombres est compris aussi, naturellement, le coût de la vapeur ou du courant électrique calculé à raison de M. 0.04 par kilowatt-heure. Le coût de la congélation n'atteindrait qu'au commencement la somme renseignée par mois car, après quelque temps, on a coutume de mettre au repos une ou plusieurs unités frigorifiques.

Colonne 5. — Les salaires en question ne sont pas seulement ceux payés pour le creusement, mais ils comprennent aussi ceux payés pour les revêtements, provisoire et définitif, ainsi que pour le bétonnage. Ils comprennent même les frais de minage qui s'élèvent, en moyenne, pour un puits de 6 mètres, à environ 35 Marks par mètre.

Nous avons compté pour le revêtement provisoirement en fers U avec tôles de garnissage en fer, 150 Marks par mètre. Ce matériel peut cependant être utilisé 3 fois de sorte que la somme à inscrire n'est que 50 Marks. Remarquons de plus que, à certains endroits, le revêtement provisoire du puits de congélation sera superflu, le terrain devenant, à cause de la congélation, une sorte de monolithe. Il s'en suit que l'on peut finalement réduire la somme à inscrire à 20 Marks le mètre.

Pour déterminer le coût du cuvelage définitif y compris boulons et joints de plomb, nous nous sommes appuyé sur les bases suivantes. Nous avons admis pour la fonte brute le prix de environ 70 Marks, pour les cuvelages, celui de environ 140 Marks la tonne. (Le prix de la fonte est soumis à d'incessantes oscillations.) Le coût moyen de 1 mètre de cuvelage, y compris boulons et joints de plomb, pourrait être fixé comme suit :

| Diamètre<br>du puits<br>Mètres | Profondeur en mètres |                  |                  |                  |
|--------------------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                | 0—100<br>Marks       | 100—200<br>Marks | 200—300<br>Marks | 300—400<br>Marks |
| 4.50                           | 1,000                | 1,400            | 1,860            | 2,300            |
| 5.—                            | 1,200                | 1,880            | 2,440            | 3,000            |
| 5.50                           | 1,400                | 2,040            | 2,700            | 3,500            |
| 6.—                            | 1,600                | 2,220            | 2,900            | 4,000            |

Du tableau ci-dessus on a déduit que le prix du cuvelage est proportionnel au poids; ce n'est pas tout à fait exact car ce qui croît proportionnellement au poids, c'est le coût de la matière et non celui de la façon. Il est donc certain que les prix consignés pour les cuvelages lourds sont bien au-dessus des prix réels. Le cas échéant, il est facile d'en vérifier l'exactitude en se faisant faire des offres par les producteurs.

Le nombre des trousses étant complètement dépendant de la coupe des terrains, ne peut être indiqué d'une façon générale. Pour nous, nous avons porté en compte, comme coût des trousses, 5 % du coût du cuvelage, ce qui, en tous cas, n'est pas trop peu.

Enfin, pour le béton, nous avons supposé un mélange consistant en 1 partie de ciment, 2 parties de sable et 3 parties de gravier, mélange revenant à 25 Marks le mètre cube. Epaisseur du mur en béton : 0<sup>m</sup>33. Si, comme au puits Carl-Alexander, dans le bassin d'Aix-la-Chapelle, on emploie le béton armé à double armature, le coût du mètre cube de béton devient le double et même le triple de celui du mètre cube de béton ordinaire.

Si, dans le tableau II, on réunit les sommes des diverses colonnes et qu'on compare à la somme totale, on a le tableau IV ci-dessous.

|  | A<br>4m50 de diamètre<br>et<br>100 m. de profondeur |                                 | B<br>5m00 de diamètre<br>et<br>200 m. de profondeur |                                 | C<br>5m50 de diamètre<br>et<br>300 m. de profondeur |                                 | D<br>6m00 de diamètre<br>et<br>400 m. de profondeur |                                 |
|--|---|---------------------------------|---|---------------------------------|---|---------------------------------|---|---------------------------------|
|  | Dépenses<br>Marks                                   | %<br>de la<br>dépense<br>totale |
| 1. Matériel de fonçage . . . . .       | 31,000  | 9.82                            | 38,000  | 4.43                            | 45,000  | 2.55                            | 52,000  | 1.67                            |
| 2. Sondages . . . . .                  | 87,000  | 27.58                           | 282,000   | 32.91                           | 687,000   | 38.96                           | 1,334,400   | 43.02                           |
| 3. Installation frigorifique . . . . . | 23,000  | 7.29                            | 38,000  | 4.43                            | 55,000  | 3.12                            | 70,000  | 2.26                            |
| 4. Congélation . . . . .               | 22,000  | 6.97                            | 56,000  | 6.53                            | 115,000   | 6.51                            | 180,000   | 5.80                            |
| 5. Creusement et cuvelage . . . . .    | 152,500   | 48.34                           | 443,400   | 51.70                           | 862,000   | 48.86                           | 1,465,600   | 47.25                           |
| Ensemble . . . . .                     | 315,000   | 100.00                          | 857,600   | 100.00                          | 1,764,700   | 100.00                          | 3,102,000   | 100.00                          |

TABLEAU IV. — Répartition des dépenses.

Ce tableau montre que le coût du creusement et du revêtement est, pour tous les diamètres et profondeurs, environ la moitié du coût total; le coût des travaux de sondage et de pose des circuits représentent environ 25 à 40 % du coût total; donc, ensemble, ces deux postes font 75 à 90 % du prix total. La conclusion, c'est que toute difficulté, tout incident, occasionnant bien une perte de temps mais n'entraînant aucun dommage notable au matériel, ne pèse pas très sérieusement dans la balance. La perte de temps, en effet ne peut influencer que le coût de la congélation, poste qui, si la construction des puits marche d'une façon normale, ne représente que 6.97 à 5.80 % du prix total. C'est donc, relativement peu important. Comme les prix unitaires pour les sondages, le creusement et le cuvelage ont été estimés assez haut, comme aussi, dès l'abord, il a été prévu un nombre suffisant de trous de sondage supplémentaires (voir tableau I), on peut se baser sur nos calculs pour l'estimation du coût de fonçage de puits par le procédé de congélation, et ce devis ne sera vraisemblablement pas dépassé même si, par suite de défauts d'organisation ou de difficultés imprévues, la durée du travail est un peu augmentée, à condition qu'on ne subisse aucun dommage considérable affectant le matériel. En général, pour le fonçage d'un puits par congélation dans le tertiaire bas-rhénan, on éprouvera plus de difficultés à respecter les délais indiqués au tableau I qu'à ne pas dépasser le devis du tableau II.

Pour les mines de potasse, les circonstances sont autres. Les morts-terrains des gisements potassiques sont, on le sait, extraordinairement variés. Au lieu du caractère régulier du tertiaire bas-rhénan, on trouve dans les gisements potassiques des couches pétrographiquement si diverses du grès bigarré (Buntsandstein) et du Zechstein (grès, grès oolithique, argile, gypse, dolomie, anhydrite, etc.); de plus, les couches ont des allures extraordinairement variables; elles sont tantôt horizontales, tantôt en plateaux, tantôt en dressant. Ces circonstances rendent les travaux de sondage plus difficiles et plus longs; il arrive notamment souvent que le sondage est obstrué par la chute de terrains; à cause de la forte teneur en eau des couches de gypse fissuré et de dolomie, l'installation frigorifique doit avoir une puissance plus forte, peut-être même double de celle employée pour le tertiaire bas-rhénan. Cette plus grande puissance est d'ailleurs déjà rendue nécessaire par le fait de la teneur élevée en sel de l'eau des morts terrains. Ces difficultés de congélation causées par la nature

des morts-terrains font que l'on devra plutôt allonger que diminuer le temps d'attente avant le début du creusement. On a même déjà attendu jusqu'à ce que le cercle entier du puits soit congelé jusqu'à la hauteur de la nappe aquifère, ce qui, non seulement augmente le temps d'attente, mais aussi rend le creusement plus lent. Lors du creusement même, on procède avec beaucoup de prudence, surtout pour le minage, car il est souvent arrivé des ruptures qui ont mis le puits en grand danger. A certains endroits, on a complètement renoncé à l'emploi d'explosifs, ce qui, naturellement, a eu pour conséquence que l'avancement, surtout dans l'anhydrite, était fort réduit. Pour la pose du cuvelage, les principales difficultés résident dans le placement des trousses dans des roches qui sont souvent fissurées et dans la réalisation de la fermeture étanche à la base. On rencontre ainsi, pour le fonçage de puits dans les gisements potassiques, toutes sortes de circonstances qui agissent en sens inverse sur l'avancement et le prix de revient; elles réduisent le premier et augmentent par contre rapidement les dépenses, notamment celles occasionnées par les travaux de sondage, l'installation frigorifique, les frais de congélation et de creusement. Si on doit recourir au procédé du froid intense, l'avancement mensuel est moindre encore et le coût d'un mètre de puits encore plus élevé. Rien que le coût de la congélation a monté, de ce fait, au puits Prinz Adalbert (1), de 8,000 à 14,000 Marks par mois. Une autre circonstance défavorable au point de vue économique est que, dans les gisements de potasse, on n'utilise pas une installation de congélation pour un puits double mais seulement pour un puits simple. Enfin, à cause de la grande diversité des morts-terrains pour un seul puits, les circonstances du creusement ne cessent de varier, de sorte qu'il est difficile de donner des valeurs moyennes pour l'avancement et le prix de revient. Si on voulait se servir des chiffres des tableaux I et II, il faudrait diminuer fortement ceux des avancements et augmenter ceux des prix de revient. D'après Riemer, on a, au puits VI à Leopoldsall (175 mètres de profondeur et 5<sup>m</sup>50 de diamètre) obtenu un avancement mensuel de 5 mètres, mais il remarque : « Ce fonçage peut être considéré comme un modèle de fonçage par congélation car on n'a rencontré aucune difficulté notable et aussi les travaux ont été fort bien conduits. »

(1) Voir *Festschrift zum Aachener Bergmannstage*, vol. III, p. 97.

On pourrait encore se demander s'il est avantageux, pour un propriétaire de mines, d'entreprendre lui-même un fonçage par congélation. Il y trouverait l'avantage d'épargner le bénéfice, certes non négligeable, de l'entrepreneur. Ce bénéfice, il est vrai, aujourd'hui qu'il y a plusieurs firmes concurrentes qui entreprennent ces travaux, n'est plus aussi élevé qu'autrefois, mais il semble qu'il existe un mouvement tendant à unir les firmes concurrentes pour le relèvement des prix. Quoiqu'il en soit, on peut se demander si ce bénéfice serait, pour le propriétaire de mines, suffisant pour le dédommager des risques inhérents, toujours, à cette sorte d'entreprises ainsi que de l'immobilisation du capital exigé par l'installation des appareils de sondage et de congélation. Quand il s'agit de foncer des puits uniques, de profondeur réduite, la réponse doit être, certainement, négative. On sait que le puits 1 de Ronnenberg, dont les travaux de sondage avaient été remis à des entrepreneurs, a été congelé par la direction de la mine elle-même. Il est peu probable que le résultat ait été satisfaisant. La question est autre quand un propriétaire de mines a, dès le commencement, l'intention de foncer toute une série de puits l'un après l'autre, surtout s'il s'agit de puits à grande profondeur. L'appareil de congélation joue, au point de vue des frais, lorsque la profondeur augmente, un rôle de moins en moins important; c'est ce qui résulte d'ailleurs du tableau IV où le coût global de la machinerie intervient pour 10 %; à mesure que la profondeur augmente, la part de ces frais dans les frais totaux du fonçage diminuent de 7.29 % à 4.43 %, 3.12 % et enfin 2.26 %. La situation est la même pour le parc de sondages. Dans ce cas, le propriétaire de mines ne doit pas reculer devant la perspective du capital à engager pour le parc de sondages et de machines, s'il a la perspective de pouvoir revendre avantageusement les installations, et cela même s'il ne s'agit que d'un petit nombre de puits à foncer. La question se réduit alors simplement à ceci : l'économie réalisée en supprimant le bénéfice de l'entrepreneur vaut-elle d'assumer soi-même les risques du fonçage ? L'Etat Hollandais et la Gewerkschaft Deutscher Kaiser se sont prononcés pour l'affirmative et ont entrepris eux-mêmes leur fonçage par congélation (1); il est vrai que dès le commencement, la Gewerkschaft Deutscher Kaiser avait l'intention d'étendre son activité à ce point de vue et d'entreprendre aussi des

(1) Les charbonnages de Beeringen, seuls en Campine, ont entrepris leur fonçage eux-mêmes. N. d. I. R.

des morts-terrains font que l'on devra plutôt allonger que diminuer le temps d'attente avant le début du creusement. On a même déjà attendu jusqu'à ce que le cercle entier du puits soit congelé jusqu'à la hauteur de la nappe aquifère, ce qui, non seulement augmente le temps d'attente, mais aussi rend le creusement plus lent. Lors du creusement même, on procède avec beaucoup de prudence, surtout pour le minage, car il est souvent arrivé des ruptures qui ont mis le puits en grand danger. A certains endroits, on a complètement renoncé à l'emploi d'explosifs, ce qui, naturellement, a eu pour conséquence que l'avancement, surtout dans l'anhydrite, était fort réduit. Pour la pose du cuvelage, les principales difficultés résident dans le placement des trousses dans des roches qui sont souvent fissurées et dans la réalisation de la fermeture étanche à la base. On rencontre ainsi, pour le fonçage de puits dans les gisements potassiques, toutes sortes de circonstances qui agissent en sens inverse sur l'avancement et le prix de revient; elles réduisent le premier et augmentent par contre rapidement les dépenses, notamment celles occasionnées par les travaux de sondage, l'installation frigorifique, les frais de congélation et de creusement. Si on doit recourir au procédé du froid intense, l'avancement mensuel est moindre encore et le coût d'un mètre de puits encore plus élevé. Rien que le coût de la congélation a monté, de ce fait, au puits Prinz Adalbert (1), de 8,000 à 14,000 Marks par mois. Une autre circonstance défavorable au point de vue économique est que, dans les gisements de potasse, on n'utilise pas une installation de congélation pour un puits double mais seulement pour un puits simple. Enfin, à cause de la grande diversité des morts-terrains pour un seul puits, les circonstances du creusement ne cessent de varier, de sorte qu'il est difficile de donner des valeurs moyennes pour l'avancement et le prix de revient. Si on voulait se servir des chiffres des tableaux I et II, il faudrait diminuer fortement ceux des avancements et augmenter ceux des prix de revient. D'après Riemer, on a, au puits VI à Leopoldsall (175 mètres de profondeur et 5<sup>m</sup>50 de diamètre) obtenu un avancement mensuel de 5 mètres, mais il remarque : « Ce fonçage peut être considéré comme un modèle de fonçage par congélation car on n'a rencontré aucune difficulté notable et aussi les travaux ont été fort bien conduits. »

(1) Voir *Festschrift zum Aachener Bergmannstage*, vol. III, p. 97.

On pourrait encore se demander s'il est avantageux, pour un propriétaire de mines, d'entreprendre lui-même un fonçage par congélation. Il y trouverait l'avantage d'épargner le bénéfice, certes non négligeable, de l'entrepreneur. Ce bénéfice, il est vrai, aujourd'hui qu'il y a plusieurs firmes concurrentes qui entreprennent ces travaux, n'est plus aussi élevé qu'autrefois, mais il semble qu'il existe un mouvement tendant à unir les firmes concurrentes pour le relèvement des prix. Quoiqu'il en soit, on peut se demander si ce bénéfice serait, pour le propriétaire de mines, suffisant pour le dédommager des risques inhérents, toujours, à cette sorte d'entreprises ainsi que de l'immobilisation du capital exigé par l'installation des appareils de sondage et de congélation. Quand il s'agit de foncer des puits uniques, de profondeur réduite, la réponse doit être, certainement, négative. On sait que le puits 1 de Ronnenberg, dont les travaux de sondage avaient été remis à des entrepreneurs, a été congelé par la direction de la mine elle-même. Il est peu probable que le résultat ait été satisfaisant. La question est autre quand un propriétaire de mines a, dès le commencement, l'intention de foncer toute une série de puits l'un après l'autre, surtout s'il s'agit de puits à grande profondeur. L'appareil de congélation joue, au point de vue des frais, lorsque la profondeur augmente, un rôle de moins en moins important; c'est ce qui résulte d'ailleurs du tableau IV où le coût global de la machinerie intervient pour 10 %; à mesure que la profondeur augmente, la part de ces frais dans les frais totaux du fonçage diminuent de 7.29 % à 4.43 %, 3.12 % et enfin 2.26 %. La situation est la même pour le pare de sondages. Dans ce cas, le propriétaire de mines ne doit pas reculer devant la perspective du capital à engager pour le pare de sondages et de machines, s'il a la perspective de pouvoir revendre avantageusement les installations, et cela même s'il ne s'agit que d'un petit nombre de puits à foncer. La question se réduit alors simplement à ceci : l'économie réalisée en supprimant le bénéfice de l'entrepreneur vaut-elle d'assumer soi-même les risques du fonçage ? L'Etat Hollandais et la *Gewerkschaft Deutscher Kaiser* se sont prononcés pour l'affirmative et ont entrepris eux-mêmes leur fonçage par congélation (1); il est vrai que dès le commencement, la *Gewerkschaft Deutscher Kaiser* avait l'intention d'étendre son activité à ce point de vue et d'entreprendre aussi des

(1) Les charbonnages de Beeringen, seuls en Campine, ont entrepris leur fonçage eux-mêmes.  
N. d. I. R.

fonçages par congélation pour le compte d'autres propriétaires miniers (1).

Un propriétaire ayant l'intention de remettre à un entrepreneur le fonçage par congélation d'un puits pourrait avoir la pensée, eu égard à l'importance de l'affaire, de solliciter des offres séparées pour les travaux de sondages proprement dits et pour les autres travaux de la congélation. Comme cependant la réussite du procédé par congélation dépend en première ligne des travaux de sondages, il serait très peu habile de vouloir remettre séparément ces deux sortes de travaux (2), sans compter que le fait de traiter et de travailler en même temps avec plusieurs entrepreneurs ne pourrait amener que de nouvelles difficultés.

---

(1) On sait (voir *Ann. des Mines de Belg.*, t. XVII, 1<sup>re</sup> liv., p. 187) que cette firme a entrepris le fonçage de la concession des Liégeois, en Campine.

N. d. I. R.

(2) Cela s'est fait cependant presque partout en Campine, mais avec garantie solidaire.

N. d. I. R.

