

LES POSSIBILITES D'APPLICATION DE LA RECHERCHE OPERATIONNELLE DANS L'INDUSTRIE CHARBONNIERE

par J. SAUCEZ

*Centre de Formation Postuniversitaire pour Ingénieurs de Charbonnages
près la Faculté Polytechnique de Mons*

Avant-propos.

Le fait que la main-d'œuvre intervient pour une bonne part dans le prix de revient du charbon et que nos gisements sont une source constante de difficultés pourrait laisser supposer que les préoccupations de l'ingénieur des Mines se rapportent essentiellement à la gestion journalière des exploitations. L'expérience montre au contraire que la conduite de nos charbonnages est avant tout affaire de coordination, de mise en place d'équipements et de méthodes d'organisation et de gestion. Le caractère vivant des exploitations et les aléas du gisement donnent à ces problèmes plus d'acuité encore.

L'enjeu et les conditions d'application sont telles que le simple jugement ne suffit pas. On fera appel au bon sens uniquement pour contrôler les résultats d'études scientifiques basées sur les techniques d'organisation. Dans certains cas, celles-ci s'inspirent des théories de la recherche opérationnelle.

Nous avons été amenés, dans les charbonnages, à appliquer quelques techniques appartenant au domaine du calcul des probabilités et de la recherche opérationnelle et l'objet de la présente note est de donner la synthèse de cette expérience.

Il existe parfois une solution de continuité entre la science de la recherche opérationnelle et les problèmes industriels concrets. Cela tient à une question de langage et surtout au fait que la réalité industrielle est l'objet de contingences multiples laissant croire que la théorie est inapplicable. En fait, elle est fondamentale en raison de la formation d'esprit qu'elle donne et parce qu'elle contient, en potentiel, les principes de solution ; mais elle doit être considérée comme un modèle de raisonnement et non comme une recette. A l'occasion de chaque application, il convient d'effectuer une transposition destinée à concevoir un modèle concret traduisant bien la réalité.

Notre expérience est encore fragmentaire et il reste beaucoup à faire. Nous nous contenterons d'évoquer des problèmes vécus, sachant bien que d'autres domaines d'application existent. Nous envisagerons ainsi successivement :

- 1) Le transport et l'extraction (théorie des files d'attente).
- 2) La recherche des conditions optimales de marche des chantiers mécanisés d'abattage (études d'optimisation en régime stochastique).
- 3) Le planning des travaux du fond (planning de PERT).
- 4) La gestion des magasins d'approvisionnement (gestion des stocks).
néaire).
- 5) La valorisation des charbons par mélange (programmation linéaire).

Les études qui sont à la base de cette note sont l'œuvre de l'équipe du Centre de Formation postuniversitaire pour Ingénieurs de Charbonnages et il nous plaît de remercier ici notre Administrateur, Monsieur Brison, pour le soutien apporté au Centre par la Faculté Polytechnique de Mons et Messieurs Vanhaesendonck, Directeur scientifique, Delacroix et Van Robays attachés au Centre, pour la grande part qu'ils ont prise à ces travaux. Nos remerciements et nos félicitations s'adressent aussi à Monsieur Godfroid, pour son étude sur les fournitures de charbon aux Centrales thermiques, ainsi qu'aux ingénieurs qui ont eu l'occasion de travailler avec nous.

Il est d'autre part intéressant de savoir que la recherche opérationnelle appliquée à l'industrie charbonnière connaît également à l'étranger d'intéressantes applications dont on trouvera, en note, quelques références bibliographiques pour la France, l'Allemagne et la Grande-Bretagne.

1. — LES PROBLEMES DE TRANSPORT ET D'EXTRACTION

A. Généralités.

Notre propos n'est pas de comparer les méthodes proprement dites d'organisation du transport, qui peuvent aller de la mise à l'horaire au dispatching intégral, mais simplement d'évoquer les méthodes d'analyse et de solution.

La difficulté de l'organisation du transport principal et de l'extraction dans les mines importantes provient de la complexité du réseau lui-même, qui con-

-
- Principes et mise en œuvre des procédés de simulation — Vielledant et Tincelin — Revue de l'Industrie Minérale, novembre 1963.
 - Etude théorique des l'organisation d'une taille mécanisée — Nortier — Revue de l'Industrie Minérale — avril 1964.
 - Aufgaben und Stand der Unternehmensforschung im Bergbau — Wilke — Glückauf, 4 November 1964.
 - Congrès International Minier de Londres — juillet 1965 : 5 communications.

tient de nombreux nœuds et boucles, ainsi que de l'irrégularité de production des chantiers, de l'interférence des circuits des charbons et des pierres et des aléas propres à la circulation des locotracteurs et à l'extraction.

Sous peine d'être inefficace, l'organisation à mettre en place doit tenir compte de toutes ces circonstances et il est évident que l'étude laissera une large place à l'analyse statistique des phénomènes. Il convient de préciser de nombreuses distributions, notamment celles des temps de chargement, de translation et de manœuvre des locotracteurs, du fonctionnement des chaînes avanceuses, culbuteurs, dispositifs d'extraction etc...

A cet égard, il y a lieu d'insister sur la nécessité de dégager des lois générales de façon à donner aux résultats un caractère de permanence, quitte à abandonner un peu d'une précision d'ailleurs illusoire. Citons l'exemple des locotracteurs ; leur vitesse est fonction de leur état d'entretien, de l'état des galeries qu'ils parcourent et du nombre de berlines tractées. On pourrait théoriquement tenir compte de ces facteurs de façon spécifique mais il nous est apparu bien préférable dans la pratique, pour une mine déterminée, de négliger ces distinctions et de majorer quelque peu la dispersion. On obtient alors des résultats qui restent valables dans le temps, puisque l'état moyen d'entretien des machines et des galeries dans un charbonnage demeure à peu près stationnaire.

Il importe également de donner à ces diverses lois une forme adéquate, qui peut dépendre d'ailleurs du type d'organisation envisagé. Pour le chargement au pied de taille par exemple, on recherchera la loi de production pour un temps T s'il s'agit d'un roulage à l'horaire, ou le temps nécessaire pour le chargement de N berlines si les rames ont une charge constante.

La phase analytique et statistique qui vient d'être évoquée est d'une importance capitale car elle constitue la base de l'étude. On est amené à introduire en cours de route quelques approximations de façon à obtenir les formules analytiques les plus simples possible mais cela implique beaucoup de discernement ; les premières études doivent être traitées scrupuleusement, avec une précision exagérée, puis l'expérience montre dans quelle mesure il est licite de procéder aux simplifications.

L'étude d'organisation proprement dite est faite à partir de ces données. Elle correspond à l'élaboration d'un modèle.

La théorie des files d'attente, qui constitue un chapitre classique de la recherche opérationnelle apporte à cette fin une aide efficace. Un réseau de transport comporte en effet tout un ensemble de stations qui sont le siège de

processus d'attente ; l'existence du réseau rend ces stations interdépendantes. On a ainsi affaire à un système complexe qui peut être étudié analytiquement ou par le procédé dit de simulation.

L'étude analytique suppose que certaines conditions soient respectées, en particulier celle du régime permanent, et que le réseau soit relativement simple. Nous avons traité deux cas d'application complets de cette manière.

Cependant dans la mine, nous sommes fréquemment en présence de phénomènes transitoires. Des ruptures d'équilibre peuvent provenir de travaux spéciaux effectués la nuit, d'une discordance dans les horaires de l'extraction et de la production, ou de disparités existant entre les deux postes de production. Si ces circonstances ne peuvent pas être négligées, la simulation par la méthode de Monte-Carlo permet toujours de se tirer d'affaire. Elle présente en outre l'avantage de ne nécessiter aucune hypothèse simplificatrice relative aux caractéristiques des installations. Cette méthode a déjà été appliquée à trois reprises dans nos charbonnages, avec de bons résultats.

On notera en passant que la simulation permet simplement de tester un modèle d'organisation c'est-à-dire d'en prévoir tous les résultats et notamment de déterminer le parc de berlines nécessaires et sa répartition ainsi que la dimension à donner aux stations. Mais en général le temps de travail de l'ordinateur est si réduit qu'il est possible de traiter plusieurs modèles imaginés par l'organisateur ; on acquiert alors une vue complète du problème. A titre indicatif, signalons que lors d'une étude de la liaison transport principal — puits d'extraction, il ne fallait pas plus de 35 secondes pour obtenir la simulation d'un poste de travail complet.

Quelle que soit la méthode qu'il adopte pour résoudre un problème particulier, l'ingénieur se trouve toujours considérablement aidé, dans l'approche de la solution, par la connaissance même des phénomènes, que la théorie des files d'attente permet d'acquérir. Malgré ses hypothèses restrictives, cette théorie met en évidence les facteurs qui conditionnent l'équilibre d'un processus. Certains ordres de grandeur deviennent évidents : le facteur d'utilisation des puits par exemple ne pourra jamais dépasser la valeur de 0,9 sans qu'il en résulte un engorgement de l'envoyage.

Ces principes sont également utiles à l'occasion d'études d'avant-projets ; il s'agit cette fois de fixer les capacités à donner aux installations de façon à minimiser l'ensemble des coûts, y compris l'amortissement du parc de berlines et les frais d'exploitation.

Il ne peut être question de donner ici un résumé des applications faites à ce jour mais nous voudrions compléter ces généralités par quelques observa-

tions à caractère scientifique qui paraissent valables pour l'ensemble des charbonnages.

B. Précisions à caractère scientifique.

1. Loi de chargement des berlines.

Première remarque. Dans les chantiers exploités à une cadence normale, le temps θ de chargement d'une berline de capacité donnée, répond de façon remarquable à la loi suivante, figurée par la courbe (1) du diagramme :

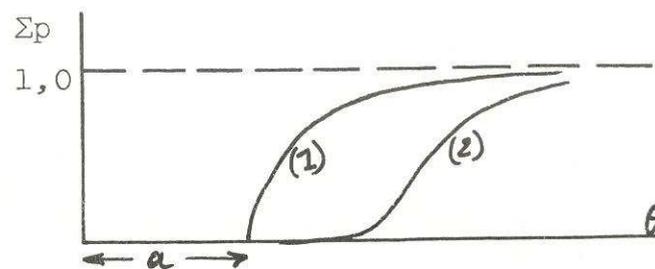
$$\theta = a + \tau$$

avec $a =$ constante

$$\tau = \text{variable aléatoire de densité } \rho(\tau)d\tau = b e^{-b\tau} d\tau.$$

La constante a est fonction de la capacité du convoyeur ; le paramètre b de l'exponentielle dépend de la saturation du chantier.

Si celui-ci est nettement sous-attelé, la loi se déforme et prend une allure gaussienne (courbe 2).



2^{me} remarque. L'application des tests séquentiels à la suite des temps de chargement θ fait apparaître des effets de grappe provoqués par le fonctionnement de l'engin d'abattage. Pour obtenir des variables indépendantes, on est amené à considérer les temps θ_x de chargement d'un nombre x de berlines, la valeur minimum de x dépendant des caractéristiques du chantier.

2. Loi d'arrivée au puits.

En général, et sauf organisation spéciale, l'arrivée des rames au puits peut être considérée comme poissonnienne, le nombre de berlines par rame étant lui-même gaussien.

3. Service du puits.

Dans les installations modernes, spécialement s'il s'agit de skips, le service du puits est assimilable à un service constant ; son écart-type est ridiculement faible. Lorsqu'on a affaire à des mines plus anciennes, la loi de l'extraction est la combinaison de deux distributions : l'une gaussienne avec une dispersion non négligeable, l'autre étant provoquée par des incidents divers. Si ceux-ci ne sont pas trop graves, on peut prendre la loi de Gauss comme base en calculant l'écart-type en conséquence.

4. Circulation des rames.

Les lois donnant les temps de parcours des locotracteurs en fonction des distances parcourues s'obtiennent très simplement par un tracé classique de la ligne de régression. Moyennant quelques hypothèses simplificatrices relatives à l'homocédasticité de la distribution, le temps T de parcours d'une distance D s'exprime par $T = a + bD + t\sigma$ avec $t =$ variable réduite de Gauss et $\sigma =$ fonction de D qu'on peut considérer comme linéaire dans les limites pratiques de variation de D .

5. Traitement du modèle.

La simulation complète d'une méthode de transport n'occasionne aucune difficulté spéciale.

Par contre, une autre méthode de solution s'inspirant de la théorie des chaînes de Markov et consistant à rechercher les probabilités d'état de la file d'attente au pied du puits en fin de poste, à partir de la connaissance de la matrice de transition pour une unité de temps convenablement choisie et de la situation en début de poste, n'a pas donné les résultats escomptés. Le produit matriciel effectué sur ordinateur n'a pas présenté la précision désirée, parce qu'il fut impossible de prendre en considération un nombre suffisant de lignes et de colonnes.

2. — CONDITIONS OPTIMALES DE MARCHE DES CHANTIERS MECANISES D'ABATTAGE

L'organisation des chantiers d'abattage relève partiellement, bien entendu, d'une étude de méthodes appliquée aux divers travaux qui y sont réalisés mais d'autres questions très importantes doivent également être abordées, notamment la détermination des conditions optimales de fonctionnement, compte tenu du

coût des équipements mis en œuvre. Il s'agit de rechercher comment on obtiendra les unités de production les plus rentables.

Les conditions de gisement étant données, le problème revient à fixer la longueur et l'attelée optimales du chantier, pour chaque type d'équipement pouvant être envisagé. L'avancement, la production et le rendement sont liés à ces paramètres.

Comme nous l'avons constaté à l'occasion de deux applications, cet optimum est relativement stable et les résultats restent satisfaisants si on s'en écarte quelque peu ; l'essentiel est de respecter les bons ordres de grandeur.

Si les couches étaient parfaitement régulières, les épontes de qualité constante, et les engins placés dans des conditions de marche semblables à celles rencontrées dans les usines de surface, le problème se ramènerait à l'étude d'harmonogrammes où figureraient en parallèle les travaux des hommes et des machines. Un chantier mécanisé est en effet analogue à une chaîne de production. Mais tout mineur sait à quel point il est indispensable de tenir compte des conditions spéciales du fond si l'on prétend se fixer des objectifs réalisables. Un chiffre permettra d'ailleurs de s'en convaincre : la dispersion des valeurs-travail atteint fréquemment 30 %.

La pratique courante consiste à adopter de façon subjective un coefficient de sécurité plus ou moins élevé pour la fixation des attelées, mais il est intéressant de déterminer l'attelée réelle, c'est-à-dire en fin de compte, la saturation du personnel, sur des bases concrètes, en faisant apparaître les facteurs qui l'influencent.

On obtient ainsi une relation entre le rendement, les conditions de gisement et des facteurs dont nous sommes maîtres, en particulier la longueur et l'équipement de la taille. Les conclusions sont alors faciles à tirer.

Cette relation peut être établie parce que les techniques statistiques permettent de décrire les conditions de gisement et le fonctionnement des engins à l'aide de paramètres simples. En pratique les conditions de gisement interviennent dans la relation indirectement, par le truchement des valeurs-travail requises par les travaux de soutènement, d'abattage etc... analysées conformément aux méthodes classiques de l'organisation. Ces valeurs-travail, les profondeurs de passe de la machine d'abattage, les temps de marche et d'arrêt de celle-ci répondent à des lois élémentaires de probabilité, tout au moins en première approximation (loi de Gauss, distribution exponentielle). Le modèle mathématique qui traduit le fonctionnement global du chantier et dont le traitement conduit aux conclusions évoquées ci-dessus repose ainsi sur un nombre réduit de paramètres.

3. — PLANNING DES TRAVAUX DU FOND

On connaît la méthode de planning dite de PERT dérivée de la théorie des graphes, née aux Etats-Unis il y a quelques années et qui connaît actuellement un succès considérable dans toutes les industries. Mutatis mutandis, cette méthode peut rendre, et rend déjà d'ailleurs, de grands services dans les charbonnages.

Cette méthode vient à son heure. Les fusions de charbonnages, la concentration des travaux du fond en unités de production importantes dont l'arrêt accidentel risque de perturber gravement les résultats, la mise en œuvre d'un matériel coûteux de mécanisation dont les besoins et la répartition sont liés au programme d'exploitation, sont autant de facteurs qui rendent nécessaire une étude serrée du planning. D'autre part, dans les mines plus qu'ailleurs, les incidents d'exploitation dus au gisement imposent de maintenir le planning constamment à jour.

Le Centre postuniversitaire de Mons a introduit la méthode PERT dans plusieurs charbonnages belges.

Dans l'industrie extractive, le planning de PERT porte sur une tranche de travaux équivalant à un an ou un an et demi. Périodiquement, toutes les quinzaines ou tous les mois, le programme est actualisé de telle sorte que l'on obtient un planning mobile. On y fait figurer les travaux d'exploitation, les travaux préparatoires et les immobilisations de matériel de service. Les contraintes sont d'ordre technique (échelonnement de travaux), financier (restrictions sur le matériel disponible), ou humain (limitation des effectifs).

4. — GESTION DES MAGASINS D'APPROVISIONNEMENT

A. Généralités.

Les magasins de charbonnages comportent trois catégories d'articles :

- le matériel dont l'achat est fonction du planning d'exploitation,
- les pièces de réserve entreposées au magasin en prévision de pannes éventuelles d'appareillages essentiels,
- les autres articles (pièces de rechange et articles de consommation) qui constituent le magasin d'approvisionnement proprement dit.

Cette dernière classe d'articles étant la plus nombreuse, il est intéressant d'adopter à son sujet une méthode systématique de gestion, qui assure le respect constant de la politique adoptée par la Direction.

Le processus administratif à mettre au point ne constitue pas l'essentiel du problème ; le choix entre une procédure manuelle, ou le traitement sur machines classiques ou sur ordinateur relève d'une question de volume ; c'est le point de vue économique seul qui guide à cet égard.

Le véritable problème est de mettre au point la méthode de raisonnement systématique qui conduit à savoir quand et combien il faut commander.

Une application complète de gestion de magasin d'approvisionnement a été faite dans un charbonnage. Dans ce cas, la gestion a été basée sur la détermination de deux barrières : le stock potentiel minimum, ou point d'ordre, et le stock potentiel maximum qui règle l'importance des achats. Ces barrières sont calculées en fonction de données simples comme la tendance de la consommation, sa dispersion et le délai d'approvisionnement, et de deux paramètres a et b fixés par la Direction.

L'intervention de la tendance dans la détermination des barrières suscite l'ajustement automatique du stock, si la consommation diminue ou augmente.

Le choix des valeurs de a et b dépend de la rotation et du service à la clientèle que l'on désire obtenir. La Direction possède ainsi les leviers de commande voulus pour déterminer et faire appliquer une politique qui tient compte à la fois de ses ressources financières et de l'importance qu'elle accorde à la sécurité d'approvisionnement.

B. Précisions à caractère scientifique.

1. — Distribution des consommations et recherche des tendances.

Première remarque. Pour les sorties de pièces de rechange, la loi de Poisson n'a pas pu être adoptée parce que les unités étaient mal choisies. Par exemple : le remplacement des roulements d'un crible se pratique le plus souvent 4 pièces à la fois. Nous n'avons pas voulu modifier les unités en vigueur pour des raisons d'ordre pratique.

Deuxième remarque. La distribution bêta et la loi de Gauss conduisaient toutes deux à des résultats satisfaisants ; nous sommes partis de la loi de Gauss car le produit de convolution sur D mois (avec $D = \text{délai}$) tendait de toutes façons vers une distribution normale.

Troisième remarque. Il est apparu que des causes systématiques influençaient les consommations.

Soit $i_1 =$ dispersion des consommations mensuelles.

$i_3 =$ dispersion des consommations trimestrielles.

On observe constamment : $i_1 \geq i_3 \sqrt{3}$.

Lorsque le délai D est supérieur à 3 mois, il s'est donc avéré utile d'établir des statistiques trimestrielles.

D'autre part, quelle que soit la technique de polissage, la tendance C_t des consommations moyennes ne s'est pas toujours révélée être une bonne référence et ceci précisément parce que les pièces sortent souvent par lots. On s'est tiré d'embarras en calculant la tendance C'_t des consommations non nulles existant dans la période de référence. On retombe d'ailleurs sur la méthode classique si la statistique ne contient pas de mois à consommation nulle.

2. — Caractéristiques du modèle.

Nous avons remplacé les notions de frais de stockage et de coût de pénurie qui interviennent dans la théorie par celles de rotation et de service à la clientèle, qui paraissent plus claires à l'industriel, et nous avons déterminé une fois pour toutes, en fonction des paramètres de direction a et b , les expressions de

- la rotation
- l'espérance mathématique de la rupture de stock, en pourcentage ; il s'agit du rapport moyen entre le nombre de pièces manquantes et la consommation
- l'espérance mathématique de la durée de la rupture de stock, lorsque cette rupture se produit.

Ces données permettent à l'industriel de choisir sa politique.

5. — VALORISATION DES BAS-PRODUITS

Une autre application de la recherche opérationnelle se rapporte à la vente des charbons. Nous pensons spécialement à la valorisation des bas-produits — schlamms, poussières, mixtes et éventuellement schistes de terrils — qui peuvent être vendus tels quels ou en mélange.

L'objectif est d'atteindre la recette maximale compte tenu des disponibilités et des contraintes commerciales.

Nous entrons ici dans le champ d'application de la programmation linéaire qui permet précisément de rechercher les valeurs à donner à un certain nombre de variables afin de maximiser une fonction économique donnée de ces mêmes variables tout en respectant un ensemble de contraintes. En programmation

linéaire, il est indispensable que la fonction économique et les contraintes aient une forme linéaire. C'est évidemment le cas des mélanges des charbons, qui se ramène à un problème de pondération.

Aux contraintes de disponibilité, viennent s'ajouter les contraintes commerciales portant, pour chaque client :

- sur les quantités, en tonnes ou en calories.
- sur la teneur en cendres du mélange.
- sur l'humidité du mélange.

La programmation est particulièrement utile si le charbonnage possède sa centrale propre, ou bénéficie d'une priorité absolue dans les fournitures auprès d'une centrale financièrement associée. A titre d'exemple on se référera à une étude faite par Monsieur Godfroid, à paraître dans un prochain numéro des Annales des Mines de Belgique.

CONCLUSION

Ces quelques exemples, que nous avons été obligés de traiter très schématiquement, donnent une idée des ressources pratiques offertes à l'industrie charbonnière par la recherche opérationnelle, considérée comme instrument de gestion et d'organisation. Nous sommes conscients d'avoir laissé dans l'ombre bien des secteurs d'application que nous ne voulons pas énumérer pour éviter toute anticipation ; personnellement, nous pensons que les résultats déjà obtenus sont garants de l'avenir.