

L'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert

World experience in the use of mining milling machines in open- pit mines

Aboubacar Sidiki TRAORE

Doctorant. Enseignant chercheur

Département de Géotechnologie de l'aménagement du sous-sol

Université nationale de recherche et de la technologie « MISiS »

Institut des Mines de Moscou

Date de soumission : 14/10/2024

Date d'acceptation : 01/12/2024

Pour citer cet article :

TRAORE. A. S. (2024) «L'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert», Revue Internationale du chercheur «Volume 5 : Numéro 4» pp : 1095-1123

Résumé

Lors de l'exploitation minière, la méthode traditionnelle de préparation des roches pour les opérations d'excavation et de chargement est la méthode du forage et de l'abattage à l'explosif, mais ces dernières années, l'excavation de roches en couches minces sans explosif à l'aide de fraiseuses minières s'est de plus en plus répandue dans les mines à ciel ouvert, car les opérations de forage et d'abattage à l'explosif présentent un certain nombre d'inconvénients. Cette étude est consacrée à l'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert. Elle est basée sur la réalisation d'une revue de la littérature sur le sujet de la recherche tout en effectuant une analyse et une comparaison de l'expérience d'utilisation des fraiseuses minières à l'échelle mondiale. Elle décrit les marques et les types de fraiseuses minières, les avantages et les inconvénients de l'utilisation des fraiseuses minières, ainsi que les schémas technologiques de fonctionnement et les formules de calcul de la productivité des fraiseuses minières. Les résultats de cette étude permettent de souligner que les fraiseuses minières sont sans aucun doute des équipements rationnels, progressifs et largement utilisés dans le monde.

Mots clés : Mine à ciel ouvert ; Methode d'exploitation minière sans explosif ; Fraiseuse minière ; Schémas technologiques de fonctionnement de la fraiseuse minière ; Calcul de la productivité de la fraiseuse minière.

Abstract

In mining, the traditional method of preparing rock for excavation and loading operations is by drilling and blasting, but in recent years the excavation of rock in thin layers without blasting using mining milling machines has become increasingly common in open-cast mines, as drilling and blasting operations have a number of disadvantages. This study is devoted to the worldwide experience of the use of mining milling machines in open-cast mines. It is based on a review of the literature on the subject of the research and an analysis and comparison of experience in the use of mining milling machines worldwide. It describes the brands and types of mining milling machines, the advantages and disadvantages of using mining milling machines, as well as the technological operating schemes and formulas for calculating the productivity of mining milling machines. The results of this study show that mining milling machines are undoubtedly rational, progressive and widely used equipment throughout the world.

Keywords: Open-pit mining; Method of mining without explosives; Mining milling machine; Technological diagrams of mining milling machine operation; Calculation of mining milling machine productivity.

INTRODUCTION

L'exploitation minière est un facteur clé pour le développement de l'économie de n'importe quel pays. Dans le monde actuel, où il existe d'importantes réserves de divers minerais et minéraux, la technologie de l'exploitation minière à ciel ouvert se développe et s'améliore constamment. Cependant, le renforcement significatif des mesures de sécurité environnementale et sociale pour les travaux de construction et d'exploitation minière limite la réalisation d'opérations de forage et de dynamitage. La destruction des roches à l'aide de ces opérations préparant ainsi les roches à l'excavation et au chargement présente un certain nombre d'inconvénients, à savoir : la nécessité d'arrêter temporairement les travaux et de retirer les équipements et les personnes à une distance de sécurité avant l'explosion ; la violation de la solidité de la masse rocheuse (risque sismique), qui affecte négativement la stabilité du bord de la carrière et nécessite son aplanissement supplémentaire ; la roche dynamitée présente une distribution inégale de la taille des particules, allant de particules surdimensionnées (nécessitant un dynamitage secondaire) à des particules poussiéreuses ; risque de projection de gros fragments ; pénétration des produits de décomposition chimique des explosifs (nitrates) dans les eaux souterraines et les rivières ; impossibilité d'utiliser le transport continu (sans concassage préalable de gros blocs) pour déplacer la roche extraite ; le dégagement de produits de combustion d'explosifs aggrave la situation environnementale en même temps que les travaux (surtout en cas d'explosion massive) ; le minéral est mélangé aux stériles par l'explosion, ce qui entraîne une diminution de la qualité des matières premières extraites ; le minéral ayant une faible puissance ne peut pas être extrait sélectivement et est évacué avec les stériles vers le terroir après les opérations de forage et de dynamitage ; la préparation des roches pour les opérations d'excavation et de chargement à l'aide du forage et de l'abattage à l'explosif est un processus coûteux (allant jusqu'à 1/3 des coûts totaux de l'exploitation minière), ainsi que d'autres inconvénients. Dans le cas où la carrière ou la mine à ciel ouvert se trouve à proximité d'habitations ou d'infrastructures, il est complètement exclu d'effectuer des opérations de forage et de dynamitage, alors que sur un certain nombre de gisements exploités depuis longtemps, les réserves principales et les réserves les plus qualitatives de minerais apparaissent à proximité d'habitations et d'autres infrastructures.

À cet égard, il existe un intérêt croissant dans le monde entier pour l'utilisation d'équipements qui permettent de séparer la roche du massif sans opérations de forage et de dynamitage, de la concasser et de la charger dans des moyens de transport avec une productivité suffisamment élevée.

Par conséquent, l'étude de l'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert est un sujet de recherche important et très pertinent. Elle a pour but d'analyser l'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert en décrivant brièvement, les marques et les types de fraiseuses minières pour l'exploitation minière à ciel ouvert, les avantages et les inconvénients d'utilisation des fraiseuses minières, les différents types de schémas technologiques de fonctionnement des fraiseuses minières et en indiquant les formules mathématiques pour calculer la productivité de ces machines.

Ainsi, un questionnaire résume la problématique de cette étude à savoir :

- ❖ **Quels sont les marques et les types de fraiseuses minières utilisés dans les mines à ciel ouvert ?**
- ❖ **Quels sont les avantages et les inconvénients de leur utilisation ?**
- ❖ **Quels sont leurs différents types de schémas technologiques de fonctionnement ?**
- ❖ **Comment calculer leur productivité ?**

Pour aborder la problématique soulevée, notre méthodologie repose sur une approche visant à réaliser une revue de la littérature pour identifier les théories existantes et les études antérieures sur l'utilisation des fraiseuses minières lors de l'exploitation minière à ciel ouvert afin d'analyser et de comparer l'expérience d'utilisation de ces machines à travers le monde.

L'état des connaissances sur l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert et les différentes réponses aux différentes questions de cette étude constituent les principales articulations de cet article qui se termine par une conclusion.

1. L'état des connaissances sur l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert

La méthode d'exploitation minière à ciel ouvert sans explosif constitue de plus en plus une préoccupation pour la communauté scientifique. Plusieurs auteurs à travers leurs travaux scientifiques ont montré l'intérêt d'étudier cette méthode d'exploitation et l'utilisation de fraiseuses minières qui permettent de séparer la roche du massif sans opérations de forage et de dynamitage.

Selon **Pichler & Pankiewicz**, 2003 ; **Korteleev, et al.**, 2011 ; **Ermakov, et al.**, 2012 ; **Khosoev**, 2016 ; **Cheban**, 2016 ; **Cheban**, 2017 ; **Cheban & Khrunina**, 2024 et **Singh, et al.**, 2024, l'utilisation de fraiseuses minières est très répandue dans l'exploitation de gisements complexes. **Nazarov & Ermekbaev** (2023) ont souligné que des pays européens tels que l'Allemagne, la

France, l'Autriche et les États-Unis ont fabriqué et utilisé activement différents types de fraiseuses minières au cours des dernières années. Ces machines ont une conception modulaire et se déplacent constamment, pendant leur fonctionnement, le long d'une trajectoire rectiligne. Elles peuvent donc être utilisées sur de grandes longueurs de travail. L'utilisation de ces fraiseuses minières est très efficace dans l'exploitation de gisements de charbons, de schistes bitumineux, de bauxites, de gypses, de calcaires, de marnes, etc. Ces équipements sont activement utilisés au Brésil, en Afrique du Sud, en Guinée, en Australie et dans d'autres pays comme le montrent quelques études (**Chenna**, 2011 ; **Dias**, 2017 ; **Yadav, et al.**, 2020 ; **Traore**, 2022). L'avantage de ce type d'équipement est qu'il ne nécessite pas d'abattage à l'explosif, qui est préjudiciable à l'environnement et aux zones d'habitation voisines. La productivité de l'exploitation est accrue grâce à la réduction des temps d'arrêt des machines, et la qualité des matières premières extraites est également améliorée, car les stériles ne sont pas mélangés au composant utile qu'est le minerai pendant l'exploitation minière. Par exemple, **Shemyakin, et al.**, (2003) ont montré dans leur étude que la présence d'une trémie sur la fraiseuse minière permet de gagner en efficacité en réduisant le nombre de moyens de transport. Il est démontré dans cette même étude de **Shemyakin, et al.**, (2003) que l'efficacité des opérations minières à ciel ouvert avec l'utilisation de la fraiseuse minière est multipliée par 1,5 à 2 fois par rapport à la technologie traditionnelle de forage et de dynamitage. Selon **Schwabenland** (2017), il est possible d'appliquer une méthode de contrôle constant de la qualité des matières premières extraites. L'idée de la méthode est la suivante : pour diviser le flux de minerai en portions distinctes, on détermine la taille rationnelle de la quantité de la masse de minerai (en fonction de sa qualité) à charger dans un camion-benne. En même temps que l'exploitation minière, le contrôle de la qualité de la roche extraite est effectué par la méthode radiométrique à rayons X. À cette fin, le complexe de contrôle doit être installé directement au dessus du convoyeur de décharge de la fraiseuse minière. En fonction de l'indicateur moyen de la teneur en éléments utiles de la partie du minerai, le flux est divisé en trois directions : directement vers le stock de l'usine de traitement, vers le stock temporaire et vers la décharge de stériles (téril). Les avantages de cette méthode d'extraction sont les suivants : la qualité de la matière première extraite est nettement améliorée, le champ d'application des fraiseuses minières est élargi et l'impact négatif des opérations minières sur l'environnement est réduit. L'exploitation minière avec l'utilisation de machines à fraisage est très efficace pour les opérations de décapage et d'exploitation minière lorsque l'angle d'inclinaison du gisement est faible et que l'épaisseur de la couche minérale est importante (**Shemyakin, et al.**, 2002 ; **Yakimenko**, 2018). Cela élimine

le temps d'immobilisation de la fraiseuse minière lors du remplacement des moyens de transport.

Trapeznikov (2016) a décrit le principe de conception des fraiseuses minières pour l'extraction des roches. Il s'agit du principe d'extraction de la roche à l'aide de machines à fraisage. L'idée essentielle est la suivante : l'extraction de la roche est effectuée à l'aide de fraises (dents ou pics) de différentes conceptions. Avantages de cet équipement : amélioration de la qualité des minéraux ; réduction de la contamination du minéral obtenu ; réduction des coûts de transport et d'extraction ; possibilité d'extraire des minéraux utiles associés du minerai extrait. **Cheban**, 2012 et **Cheban, et al.**, 2018 ont étayé la technologie du broyage couche par couche lors d'exploitation de gisements à structure complexe et ont conçu un organe de travail combiné, dont l'utilisation permet de réduire le surbroyage des roches. Cette opinion est confirmée par **Ptashnik**, (2015) qui, dans son étude sur la technologie d'exploitation sans explosif pour l'exploitation des gisements de calcaire, prouve que l'utilisation de fraiseuses minières permet de fournir la qualité requise pour l'extraction des minéraux, de réduire les conséquences environnementales et d'assurer la sécurité des opérations minières. **Pytalev** (2022) a décrit le schéma technologique du mouvement de la fraiseuse minière le long de l'axe de déplacement dans les directions avant et arrière. Dans ce cas, la longueur de l'axe de déplacement est égale à la largeur de la couche découpée. Ainsi, tout le volume de la masse rocheuse est impliqué dans l'exploitation minière sans séparation entre les morts-terrains et le minerai. L'avantage de cette technologie est la réduction du temps d'immobilisation des fraiseuses minières grâce à l'absence d'arrêts pendant le chargement des camions-bennes, ainsi que l'augmentation de la productivité de l'équipement. Cette technologie est appelée « excavation couche par couche ». Dans les travaux de **Gubenko, et al.**, 2010 et **Ptashnik**, 2015, des fraiseuses minières à ciel ouvert avec différentes dispositions de l'organe de travail (tambour) ont été étudiées. Les fraiseuses minières avec positionnement central et frontal de l'organe de travail ont fait preuve de la plus grande efficacité, permettant de réaliser des travaux d'excavation couche par couche de roches d'une résistance allant jusqu'à 150 Mpa (**Gubenko, et al.**, 2010 ; **Shteinzaig & Anistratov**, 2005), dont leur schéma technologique de fonctionnement est présenté dans les travaux de **Avraamova**, (2006) et **Prakash**, (2013). **Ermakov & Khosoev**, (2008) ont noté l'application prometteuse de la technologie d'excavation sélective sur la base de fraiseuses du type KSM-2000R. **WIRTGEN GmbH**, 2021 et **Vermeer ACT**, 2021 ont donné respectivement le schéma général de travail d'une fraiseuse minière de l'entreprise allemande «Wirtgen» et de l'entreprise américaine «Vermeer». Les roches concassées d'une taille

moyenne allant jusqu'à 300 mm sont chargées par convoyeur dans des moyens de transport ou sont entasser le long de la bande d'excavation, à partir de laquelle la masse rocheuse est chargée dans les moyens de transport par une chargeuse ou une excavatrice. Ces fraiseuses minières sont utilisées pour l'extraction des roches sédimentaires dures, en particulier pour l'extraction du charbon, de la bauxite et d'autres minerais. Leur avantage réside dans leur mode de fonctionnement universel : l'excavation et le chargement simultanés et continus de la masse rocheuse. Les coûts d'extraction sont presque divisés par deux grâce à ce système d'extraction. **Rosmining** (2021) a présenté les résultats des tests effectués sur les fraiseuses minières de la marque Vermeer. Il est noté que la grande maniabilité de cette fraiseuse minière permet d'exploiter des zones étroites d'une mine à ciel ouvert, ainsi que de travailler sur une surface avec une pente allant jusqu'à 20 degrés. L'avantage de ce type de machine est qu'après son opération, la surface reste suffisamment plate, ce qui permet de consacrer moins de temps à la préparation, à l'entretien et au maintien des voies d'accès en bon état. L'usure des pneus des camions-bennes à l'aller et au retour de la carrière est réduite et le manœuvrement des équipements utilisés au cours de l'exploitation devient beaucoup plus facile.

Raikov, et al., 2002 ont cité dans leur étude l'expérience de l'exploitation de gisements de bauxite à l'aide des Wirtgen Surface Miner modèles 2100 SM et 2200 SM, qui permettent l'excavation en couche mince et sans explosion de roches avec l'obtention de fines particules dans le front de taille. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à un concassage grossier et moyen de la roche, ce qui réduit les coûts ultérieurs de traitement. L'analyse de l'expérience acquise dans l'application de l'extraction en couche mince sans explosifs de la bauxite à l'aide des Surface Miner 2100 SM et 2200 SM de Wirtgen a révélé l'efficacité de la nouvelle technologie dans les conditions des carrières de bauxite, à la fois en termes de réduction du coût des opérations d'extraction et d'augmentation de la productivité de l'exploitation.

Dans son étude, **Avraamova**, (2006) a prouvé la faisabilité économique de l'exploitation sélectif de gisements à structure complexe à l'aide de fraiseuses minières.

Wirtgen GmbH a développé et produit des modèles de base de fraiseuses minières permettant de charger les roches directement dans des camions-bennes ou de verser (WIRTGEN GROUP). **Pichler** (2018) a examiné les particularités technologiques de l'utilisation des fraiseuses minières de la marque Wirtgen Surface Miner. Il note que l'efficacité maximale de l'exploitation minière par la méthode du cycle continu d'extraction et de chargement est possible avec un fonctionnement clair et rythmé des camions-bennes. Le schéma technologique

avec empilement (entassement) des masses rocheuses en piles (andains) et leur transport ultérieur dans des camions-bennes est applicable dans certaines conditions minières et techniques. Par conséquent, ce schéma de fonctionnement de la fraiseuse minière peut être considéré comme un autre avantage de ce type de machine. Les particularités technologiques des fraiseuses minières Wirtgen Surface Miner ont été examinées par **Pichler & Pankiewicz**, 2005 et **Pichler, et al.**, 2011. Les auteurs montrent que pour assurer un fonctionnement continu de la fraiseuse minière, il est possible d'utiliser le schéma d'empilage de la masse rocheuse en piles avec son chargement ultérieure par une chargeuse dans les camions-bennes.

D'après **Ereminev** (2020), les fraiseuses minières utilisées dans les mines à ciel ouvert constituent une alternative importante à la méthode d'abattage à l'explosif. Leur principal avantage par rapport à d'autres types d'équipements miniers est qu'elles permettent d'extraire des roches très résistantes (dureté $f = 2$ à 5 sur l'échelle de M. M. Protodyakonov), qui ne pouvaient auparavant être extraites que par abattage à l'explosif. La société Wirtgen Group est un exemple de mise en œuvre active de fraiseuses minières ; la marque de fraiseuse minière SM Wirtgen fabriquée par cette société est utilisée depuis plusieurs années dans le monde entier.

Les machines de Wirtgen GmbH (WSM) permettent d'obtenir les meilleurs résultats lors de l'extraction de roches très résistantes, qui sont équipées de moteurs puissants. L'expérience de leur utilisation montre une augmentation de la profondeur de fraisage maximale et de la productivité (**Zaitsev & Cheskidov**, 2006).

Grabsky, 2010 ; **Kumar, et al.**, 2016 et **Ordin & Shvabenland**, 2016 dans leurs études ont donné des formules permettant de calculer de la productivité de la fraiseuse minière.

2. Les fraiseuses minières utilisées dans les mines à ciel ouvert

Pendant l'exploitation minière sans explosif, ont utilisé les fraiseuses minières qui, contrairement à la méthode d'exploitation à l'aide de forage et de dynamitage, permettent de séparer la roche du massif rocheux, la concasser et la charger en un seul processus.

La fraiseuse minière est un engin d'exploitation minière utilisé pour le fraisage de la roche à l'aide d'un tambour équipé de pics (dents).

Pour l'extraction sélective sans explosif de minéraux utiles et de stériles, une classe entière de machines (Continuous Surface Miner, CSM) a été créée (Troubetskoy, et al., 1990 ; Troubetskoy & Shpar, 1993 ; Roninson, et al., 1994).

Les marques de machines (fraiseuses minières) les plus connues sont les suivantes :

- ❖ Wirtgen - Série SM ;
- ❖ Vermeer - Série T ;
- ❖ Tenova Takraf - Séries MTS et SM ;
- ❖ Dosco - Série TB ;
- ❖ Weserhütte et Paurat — Fraiseuses SM ;
- ❖ Voest-Alpine Bergtechnik (fait partie du groupe Sandvik) - Fraiseuses VASM, série MC ;
- ❖ Huron Manufacturing - Fraiseuse Easy-Miner ;
- ❖ Krupp Fördertechnik - Série KSM ;
- ❖ Eickhoff - Série ET ;
- ❖ Rahco - Fraiseuse CME ;
- ❖ McNally – Pittsburg - Fraiseuse WL - 50 ;
- ❖ CMI - Séries TR et PR ;
- ❖ Unit Rig - Fraiseuse Unimatic.

En fonction de leur conception et de leur mode de fonctionnement, toutes les fraiseuses minières peuvent être subdivisées en différents types à savoir (Suprun, et al., 2017) :

- ❖ les fraiseuses à tarière ;
- ❖ les fraiseuses de rippage ;
- ❖ les fraiseuses à flèche ;
- ❖ les fraiseuses d'alésage et de chargement ;
- ❖ les fraiseuses à roues rotatives.

Les fraiseuses à tarière, quant à elles, peuvent être subdivisées en deux catégories :

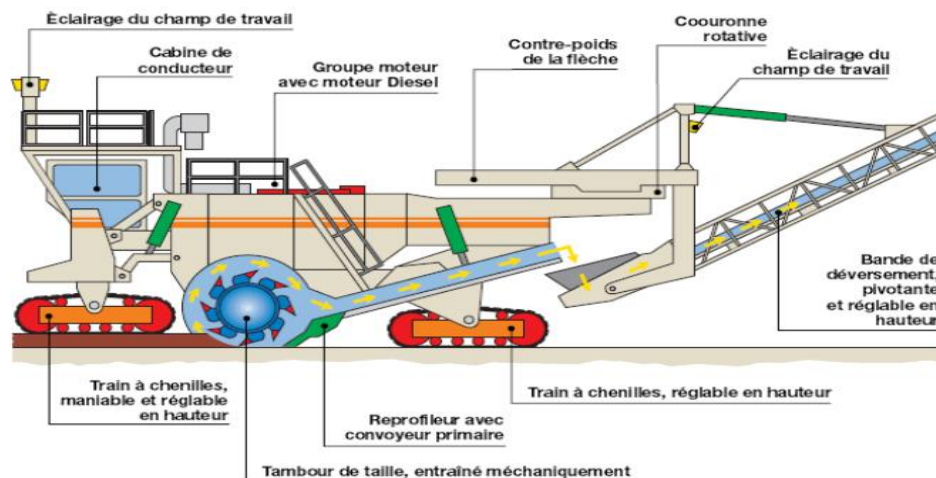
- ❖ Les fraiseuses minières avec positionnement de l'organe de travail au centre (figure n°1) ;
- ❖ Les fraiseuses minières avec positionnement de l'organe de travail soit à l'avant soit à l'arrière (figure n°2).

Les fraiseuses minières avec positionnement de l'organe de travail au centre sont très souvent fabriquées par l'entreprise Wirtgen. Entre les chenilles avant et arrière se trouve un tambour,

c'est-à-dire une tarière sur laquelle sont montées des barres de coupe (pics) et des fraises (figure n°3).

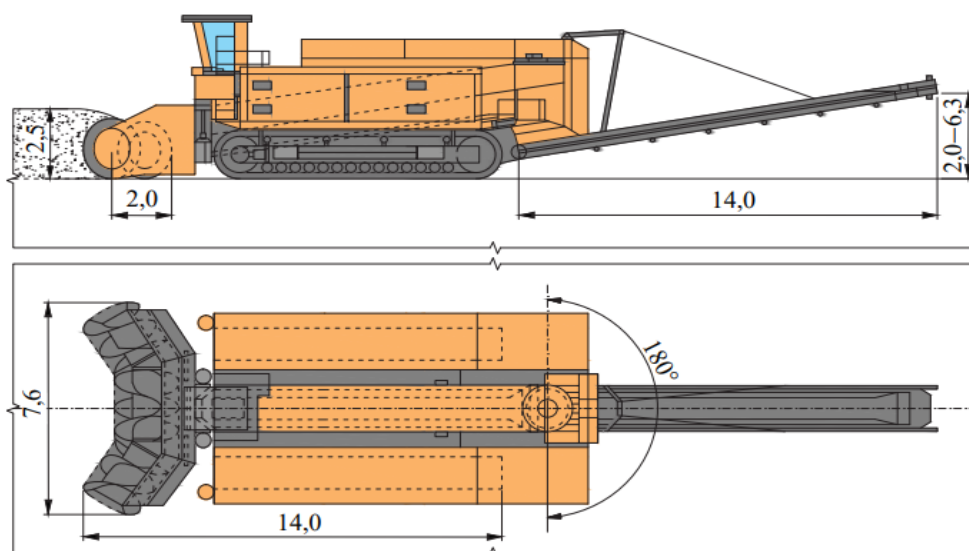
Actuellement, **les fraiseuses de rippage** à haute productivité sont produites par Vermeer (figure n°4). L'organe de fraisage est situé dans la partie avant de la machine. La technologie de fraisage des machines Vermeer est basée sur la méthode Top-Down, qui permet d'utiliser l'énergie d'impact de la dent de fraisage (pic) lorsqu'elle se déplace de haut en bas.

Figure N°1 - Schéma principale d'une fraiseuse minière avec positionnement de l'organe de travail au centre



Source : Wirtgen GmbH (2010). « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual.

Figure N°2 - Schéma d'une fraiseuse minière (Weserhütte « Paurat SM-2000) avec positionnement de l'organe de travail à l'avant



Source : Suprun, et al., (2017) « La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert». Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4

Figure N°3 - Vue extérieure de l'organe de travail (tambour de fraisage) d'une fraiseuse à tarière (Wirtgen 4200 SM)



Source : Wirtgen GmbH (2010). « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual.

Un certain nombre d'entreprises de conception de machines ont conçu des **fraiseuses à flèche** (figure n°5 à figure n°7) et des **fraiseuses d'alésage et de chargement** (figure n°8), qui permettent d'exploiter des massifs rocheux par gradins allant jusqu'à 10 mètres de haut avec la possibilité de charger le matériau extrait sur des convoyeurs tout en maintenant une excavation sélective des couches différentielles séparées du massif sans explosion.

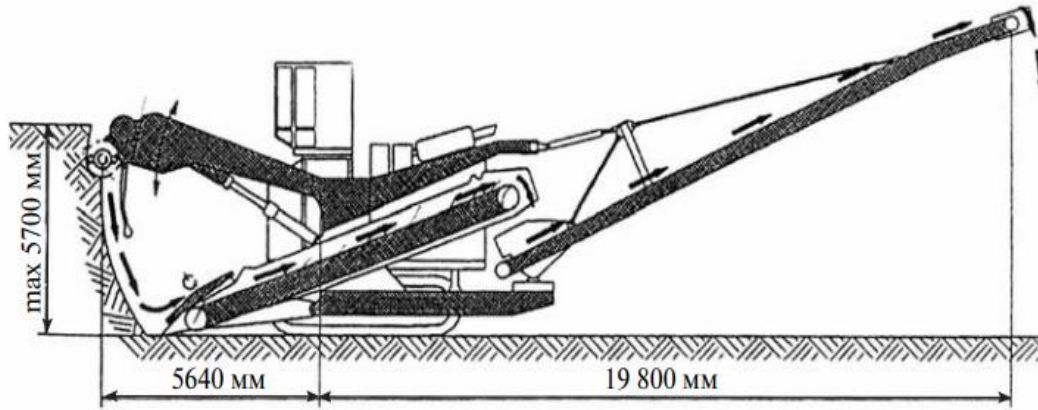
Figure N°4 - Fraiseuse de rippage de la marque Vermeer T1255 TL : a- vue extérieure de la fraiseuse ; b- l'organe de travail de la fraiseuse



Source : Friesen A. P. (2015). « Les engins de terrassement et de fraisage Vermeer » - la base de la sécurité économique et environnementale de la technologie d'extraction des

matières premières dans les carrières de l'industrie du ciment - Mining Industry. № 5. P. 111, 112.

Figure N°5 - Schéma de la fraiseuse à flèche VASM de Voest-Alpine Bergtechnik



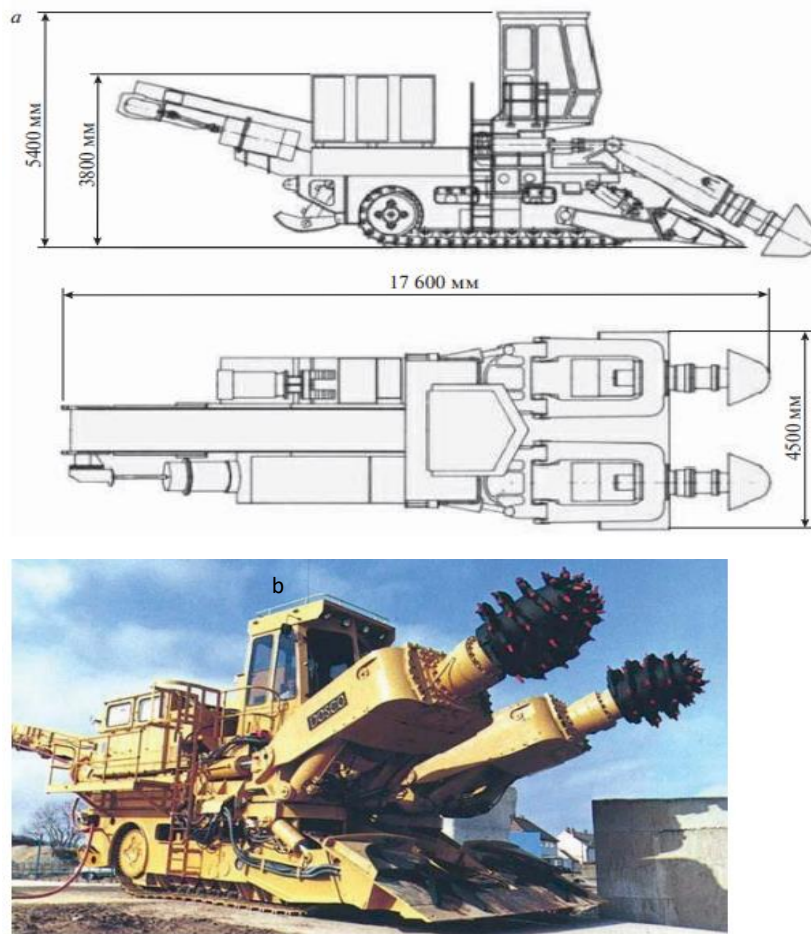
Source : Suprun, et al., (2017) « *La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert* ». *Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4*

Figure N°6 – Vue extérieure de l'organe de travail de la fraiseuse minière Voest-Alpine Bergtechnik



Source : Suprun, et al., (2017) « *La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert* ». *Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4*

Figure N°7 - Schéma (a) et vue extérieure (b) de la fraiseuse minière à deux flèches Dosco TB 3000



Source : Suprun, et al., (2017) « La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert». *Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4*

Figure N°8 – Fraiseuse d'alésage et de chargement CME de l'entreprise Rahco



Source : Suprun, et al., (2017) « La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert». *Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4*

Les fraiseuses à roues rotatives (figure n°9) sont souvent fabriquées par l'entreprise Krupp. Les machines de la gamme paramétrique Krupp Surface Miner (KSM) sont conçues pour exploiter des roches d'une résistance allant jusqu'à 50 MPa. Le principe de fonctionnement des

fraiseuses minières de type KSM se réduit à la continuité du processus d'excavation de la roche réalisé par l'organe de travail du type rotatif et assuré par la force de pression due au mouvement de translation rectiligne de la machine.

Figure N°9 - Fraiseuse à roues rotatives KSM-2000R



Source : Suprun, et al., (2017) « La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert ». Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4

Contrairement aux fraiseuses minières avec positionnement de l'organe de travail soit à l'avant (à l'arrière) ou soit à flèche, pour les fraiseuses minières équipées de l'organe de travail au centre, les forces réactives sur la surface de la couche agissent également en partie dans le sens des forces gravitationnelles. Cela entraîne une augmentation de la force de gravité et de la force d'alimentation qui en dépend. La force d'alimentation, à son tour, fournit la force nécessaire aux fraises en déplaçant l'organe d'extraction dans son ensemble. Par conséquent, des forces plus importantes sont générées sur les extrémités des fraises de l'organe de travail (tambour) situé au centre que sur les organes de travail situé à l'avant ou montés sur la flèche.

Ces mêmes principes ont servi de base à la création de fraiseuses minières modernes pour l'exploitation des roches dures par un certain nombre d'entreprises mondiales produisant des machines d'exploitation minière.

3. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des fraiseuses minières

La technologie de l'exploitation minière à ciel ouvert, avec l'utilisation de fraiseuses minières, répond le mieux aux exigences de la préservation des ressources matérielles dans toute la mesure du possible, permet de minimiser les perturbations environnementales, d'assurer l'exhaustivité de l'excavation et la haute qualité de l'extraction minérale dans les zones où l'abattage à l'explosif est interdit. L'un des principaux avantages des fraiseuses minières de la classe CSM est leur capacité à exploiter les roches dans une large gamme de résistances allant de 50 à 100 MPa, ce qui permet d'éliminer les opérations de forage et de dynamitage lors de

l'exploitation du charbon, du gypse, de la bauxite, de la kimberlite et des roches carbonatées. Parmi les qualités des fraiseuses minières de la classe CSM, on peut citer la maniabilité, la polyvalence, l'extraction sélective, la facilité d'entretien et de maintenance, le concassage des matériaux à une taille permettant leur transport par convoyeur à bande, ce qui permet de se passer de l'installation d'un concasseur dans le front de taille, etc.

Les principaux avantages de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert sont les suivants :

- ❖ l'élimination des opérations de forage et de dynamitage ;
- ❖ l'impact négatif des opérations minières sur l'environnement est très réduit ;
- ❖ la possibilité d'effectuer l'exploitation minière à proximité des zones d'habitation ;
- ❖ l'extraction et le chargement simultanés et continus de la masse rocheuse en une seule opération ;
- ❖ l'absence de nécessité de concasser le minerai ;
- ❖ la qualité du minéral utile est nettement améliorée ;
- ❖ une forte réduction de la contamination du minéral utile ;
- ❖ une réduction de l'enrichissement (traitement) du minéral utile (1,5 à 3 fois) ;
- ❖ une réduction des coûts de transport et d'exploitation minière.

L'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert présente les inconvénients suivants :

- ❖ la nécessité d'utiliser des centrales énergétiques à carburants gazole et des centrales hydrauliques pour assurer le déplacement autonome des machines, ce qui entraîne des coûts d'exploitation élevés ;
- ❖ la nécessité de créer un front d'exploitation d'une longueur considérable (1,5 - 2 km) afin de réduire les pertes de temps liées à la mise en place des machines aux extrémités des bandes à excaver ;
- ❖ la dépendance des indicateurs d'efficacité de l'utilisation des fraiseuses minières par rapport à la disponibilité d'informations fiables sur les propriétés de résistance des roches ;
- ❖ la durée de vie relativement courte des fraiseuses minières. À titre de comparaison, les fraiseuses KSM ont une durée de vie de 9 ans, les WSM de 6 ans. Par contre les excavatrices ont une durée de vie de 15 à 18 ans ;

- ❖ Le processus de travail réalisé par les fraiseuses minières prédétermine l'usure des outils de taille des roches ;
- ❖ la limitation de la dureté des roches extraites ;
- ❖ la nécessité d'utiliser comme moyens de transport des camions-bennes dans les schémas technologiques.

En raison du dernier point des inconvénients de l'utilisation des fraiseuses minières cités, certaines entreprises ont créé des fraiseuses minières à flèche qui utilisent la technologie traditionnelle (par gradins) d'exploitation à ciel ouvert pour l'excavation sélective sans explosifs (Cheban, 2015). Ces machines permettent un fonctionnement stable et un transport de la masse rocheuse avec des camions-bennes tout comme avec des convoyeurs à bande.

4. Les différents types de schémas technologiques de fonctionnement des fraiseuses minières

Sur la base des caractéristiques techniques et technologiques des fraiseuses minières, on peut distinguer deux types de schémas technologiques de fonctionnement suivants (Pankevich & Pichler, 2001 ; Avraamova, 2006 ; Prakash, 2013) :

- ❖ Schéma de flux avec fraisage continu ;
- ❖ Schéma cyclique avec fraisage discontinu.

Le schéma de flux caractérisé par un mouvement de fraisage continu en bouche mobile est illustré à la figure n°10. Ce schéma est applicable pour l'exploitation de grands blocs ou de petites mines à ciel ouvert et qui de par sa forme se rapproche d'une ellipse concentrique avec le déroulement des opérations d'exploitation des flancs vers le centre. La largeur minimale du front de travail doit être égale à un rayon de braquage et à la moitié de la base (largeur) de la fraiseuse minière (Pankevich, 2002). Le temps de travail pour le fraisage d'une boucle pendant l'exploitation par couches comprend :

- ❖ déplacement de la fraiseuse minière depuis le point de départ du fraisage jusqu'au centre du bloc sur la bande 1 ;
- ❖ fraisage de la bande sur la longueur avant ;
- ❖ virement sur la face de fraisage opposée ;
- ❖ passage à la bande 2 et le fraisage de celle-ci dans la direction opposée, après quoi les cycles et la séquence d'exploitation sont répétés.

En général, l'extraction par couches dans le cadre de schémas cycliques, doit être effectuée à partir de déblais prédécoupés au préalable, dont la largeur minimale est déterminée par les dimensions et les paramètres de fonctionnement de la fraiseuse (à partir du bord avant de la fraiseuse à la chenille arrière plus 1,5 à 2 m). Une largeur suffisante de déblais est fournie par trois passages de la fraiseuse minière.

Le schéma cyclique avec fraisage discontinu se subdivise en :

- ❖ schéma cyclique avec marche inversée inactif (schéma de navette) ;
- ❖ schéma avec demi-tour à la fin de la course et fraisage en sens inverse.

Le schéma de navette est applicable à un front de travail court, car le temps nécessaire pour tourner la fraiseuse à la fin de la course de travail est plus long que le temps de la course de retour (figure n°11) (Pankevich, 2001). Avec un tel schéma de travail, les déblais à l'extrémité des blocs sont transportés par la technologie du schéma de flux, et les autres passages sont effectués par le schéma de navette. Le cycle de travail de la fraiseuse minière pendant le schéma de navette comprend :

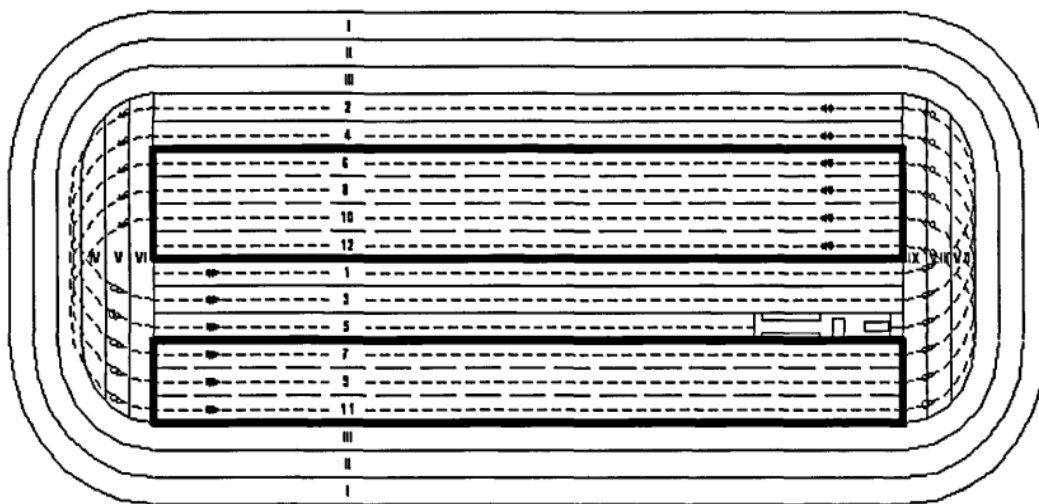
- ❖ course de la fraiseuse depuis le déblai jusqu'à la bande ;
- ❖ fraisage de cette bande jusqu'au début du déblai opposé ;
- ❖ retour à la position initiale, après quoi le cycle est répété.

Le schéma avec demi-tour à la fin de la course de travail et fraisage en sens inverse est raisonnable dans le cas d'un front de travail plus large (figure n°12). Dans ce cas, la largeur des déblais doit permettre à la fraiseuse minière de tourner en toute sécurité et sans interruption avec un rayon de braquage minimum, qui est égal, d'après l'expérience pratique, à environ 6 à 8 fois la largeur du tambour de fraisage. À cette fin, les premières extractions minimales sont effectuées selon la technologie du schéma de flux, puis perpendiculairement à l'axe du long du bloc, des passes de navette selon le schéma de navette sont effectuées des deux côtés, après quoi des passes sont effectuées séquentiellement selon le schéma avec demi-tour à la fin de la course et fraisage en sens inverse et le déroulement des opérations minières d'un flanc à l'autre. Le cycle de travail de la fraiseuse minière pendant ce type de schéma de fonctionnement comprend :

- ❖ course de la fraiseuse depuis le déblai jusqu'à la bande ;
- ❖ fraisage cette bande ;
- ❖ retournement sur le déblai opposé, après quoi les cycles sont répétés.

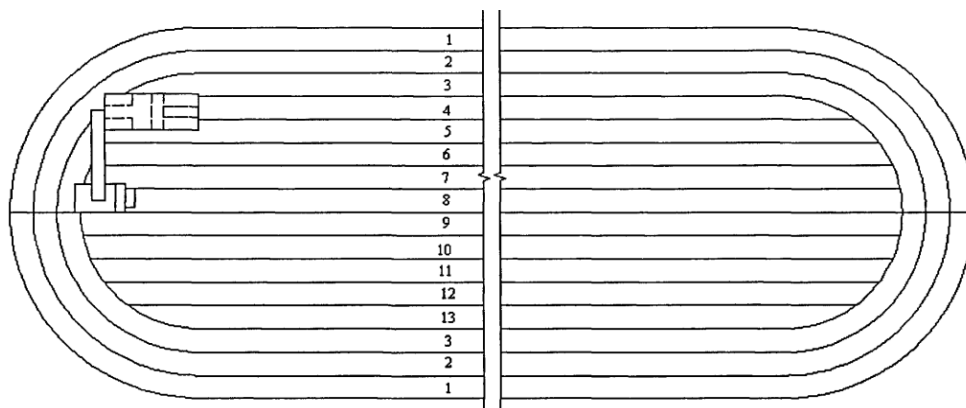
Les paramètres déterminant la nécessité de passer d'un schéma de flux à un système cyclique sont la longueur du front de travail et le rayon minimum auquel la rotation et le temps de cycle de la fraiseuse minière sont effectués. Le rayon spécifié est égal à environ 6 à 8 fois la largeur de l'organe de travail (environ 15 à 20 mètres). Par conséquent, chaque modèle de fraiseuse minière doit avoir son propre point critique rationnel de transition du schéma de flux à schéma cyclique.

Figure N°10 - Schéma de fonctionnement de la fraiseuse en boucle mobile (schéma de flux)
les chiffres romains indiquent l'ordre d'extraction des déblais ; les chiffres arabes indiquent l'ordre de fraisage des bandes.



Source : Avraamova N.S. (2006). « Justification des schémas technologiques de l'exploitation à ciel ouvert des gisements de roches carbonates à l'aide de fraiseuse à couche » Thèse de doctorat.

Figure N°11 – Schéma de fonctionnement de la fraiseuse en navette (schéma de navette)
de 1 à 3 – les fraisages sont effectués selon le schéma de flux, de 4 à 13 – les fraisages s'effectuent selon le schéma de navette.



Source : Avraamova N.S. (2006). « Justification des schémas technologiques de l'exploitation à ciel ouvert des gisements de roches carbonates à l'aide de fraiseuse à couche » Thèse de doctorat.

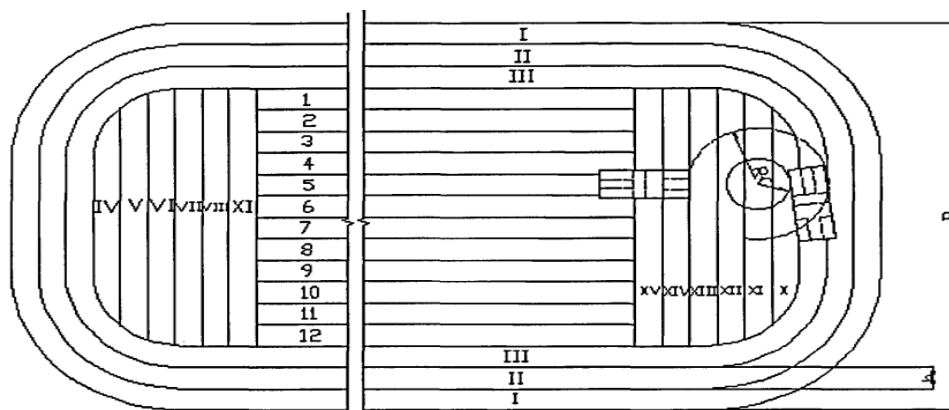
Figure N°12 - Schéma de fonctionnement de la fraiseuse avec demi-tour et fraisage en sens inverse

de I à III - les fraisages sont effectués selon le schéma de flux

de IV à IX et de X à XV – les fraisages sont effectués perpendiculairement à l'axe du bloc par le schéma de navette

du 1er au 12ème - les fraisages sont effectués selon le schéma avec demi-tour et fraisage en sens inverse

B- la largeur du front de travail ; h- la largeur du tambour de fraisage ; Rc- le rayon de braquage de la fraiseuse minière.



Source : Avraamova N.S. (2006). « Justification des schémas technologiques de l'exploitation à ciel ouvert des gisements de roches carbonates à l'aide de fraiseuse à couche » Thèse de doctorat.

Après extraction de la roche par le tambour de fraisage de la fraiseuse minière, la roche extraite peut être :

- ❖ charger directement dans les camions-bennes (figure n°13) ;
- ❖ déverser latéralement en pile, à partir de laquelle la masse rocheuse est chargée dans les camions-bennes par une chargeuse ou une excavatrice (figure n°14);
- ❖ déverser par l'arrière de la fraiseuse pour former des andains, puis empilage de la masse rocheuse et chargement dans les camions-bennes par une chargeuse ou une excavatrice (figure n°15).

Figure N°13 – Chargement direct dans les camions-bennes



Source : WIRTGEN GROUP. « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual. <https://www.wirtgen-group.com/fr-re/applications/mining/surface-mining/>

Figure N°14 - Déversement latéral en pile



Source : WIRTGEN GROUP. « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual. <https://www.wirtgen-group.com/fr-re/applications/mining/surface-mining/>

Fig.15 - Déversement par l'arrière de la fraiseuse pour former des andains



Source : WIRTGEN GROUP. « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual. <https://www.wirtgen-group.com/fr-re/applications/mining/surface-mining/>

5. Calcul de la productivité de la fraiseuse minière

La formule pour calculer la productivité d'une fraiseuse minière varie et dépend du schéma technologique de fonctionnement de celle ci. Voici donc les différentes formules pour calculer la productivité d'une fraiseuse minière en fonction des schémas technologiques :

5.1. Schéma de flux

La formule pour calculer la productivité journalière de la fraiseuse minière pour ce type de schéma est la suivante :

$$P_j = 60 * p * \frac{l_f * L_f + l_f * L_c + l_d * L_d}{(T_d + T_r) * N + \frac{L_f}{V_f} + \frac{L_c}{V_c} + \frac{L_d}{V_d}} * T_p * N_p * C_u$$

Où :

P_j - productivité journalière de la fraiseuse minière, m³/jour ; p - profondeur de fraisage, m ; l_f - largeur de fraisage de la bande, m ; L_f - longueur de fraisage de la bande, m ; L_c - longueur de la partie du cercle le long de laquelle la fraiseuse tourne, m ; l_d - largeur du déblai, m ; L_d - longueur du déblai, m ; T_d - temps de descente du tambour de fraisage, min ; T_r - temps de remontée du tambour de fraisage, min ; N - nombre d'opérations de descente et de remontée du tambour de fraisage ; V_f - vitesse de fraisage de la bande, m/min ; V_c - vitesse de fraisage de la partie circulaire, m/min ; V_d - vitesse de fraisage du déblai, m/min ; T_p - temps d'un poste, heure ; N_p - nombre de poste par jour ; C_u - coefficient d'utilisation de la fraiseuse minière.

Le temps de descente (T_d) et le temps de remontée (T_r) du tambour de fraisage vers ou depuis la masse rocheuse avant le début du mouvement de la fraiseuse, sont égaux respectivement à 30 et 20 secondes.

5.2. Schéma de navette

La formule pour calculer la productivité journalière de la fraiseuse minière pour ce type de schéma est la suivante :

$$P_j = 60 * p * \frac{l_f * L_f + l_d * L_d}{(T_d + T_r) * N + \frac{L_f}{V_f} + \frac{L_i}{V_i} + \frac{L_d}{V_d}} * T_p * N_p * C_u$$

Où :

L_i - longueur de la partie d'inactivité de la fraiseuse, m ; V_i - vitesse de déplacement de la fraiseuse en inactivité, m/min.

5.3. Schéma avec demi-tour à la fin de la course et fraisage en sens inverse

La formule pour calculer la productivité journalière de la fraiseuse minière pour ce type de schéma est la suivante :

$$P_j = 60 * p * \frac{l_f * (L_{f1} + L_{f2}) + l_d * L_d}{(T_d + T_r) * N + \frac{L_f}{V_f} + \frac{L_i}{V_i} + \frac{L_{ic}}{V_{ic}} + \frac{L_d}{V_d}} * T_p * N_p * C_u$$

Où :

L_{f1} - longueur de fraisage lors du mode de fonctionnement en schéma de navette, m ; L_{f2} - longueur de fraisage lors du mode de fonctionnement en schéma avec demi-tour, m ; L_{ic} - longueur de la partie circulaire d'inactivité le long de laquelle la fraiseuse tourne, m ; V_{ic} - vitesse de déplacement de la fraiseuse en inactivité sur la partie circulaire, m/min.

CONCLUSION

Cet article représente une recherche visant à étudier l'expérience mondiale de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert. Cette étude s'est basée sur la réalisation d'une revue de la littérature sur le sujet de la recherche tout en effectuant une analyse et une comparaison de l'expérience d'utilisation des fraiseuses minières à l'échelle mondiale. Les résultats de cette étude montrent que les fraiseuses minières sont sans aucun doute des équipements rationnels, progressifs et largement utilisés dans le monde.

Les fraiseuses minières sont utilisées dans l'exploitation minière à ciel ouvert de bauxites, de charbons, de schistes bitumineux, de gypses et d'autres minéraux. Les résultats de cette étude montrent qu'à l'heure actuelle, plusieurs marques et types de fraiseuses minières pour l'exploitation minière à ciel ouvert sont utilisés dans l'industrie minière mondiale. Les marques de fraiseuses minières les plus connues sont : Wirtgen, Vermeer, Tenova Takraf, Dosco, Weserhütte et Paurat, Voest-Alpine Bergtechnik, Krupp Fördertechnik, etc. En fonction de leur conception et de leur mode de fonctionnement, toutes les fraiseuses minières sont subdivisées en différents types à savoir : les fraiseuses à tarière ; les fraiseuses de rippage ; les fraiseuses à flèche ; les fraiseuses d'alésage et de chargement et les fraiseuses à roues rotatives.

L'un des principaux avantages des fraiseuses minières est leur capacité à exploiter les roches dans une large gamme de résistances allant de 50 à 100 MPa, ce qui permet d'éliminer les opérations de forage et de dynamitage lors de l'exploitation à ciel ouvert des roches. La technologie de l'exploitation minière à ciel ouvert, avec l'utilisation de fraiseuses minières, répond le mieux aux exigences de la préservation des ressources matérielles dans toute la

mesure du possible, permet de minimiser les perturbations environnementales, de réduire des coûts de transport et d'exploitation minière, d'assurer l'exhaustivité de l'excavation et la haute qualité de l'extraction minérale dans les zones où l'abattage à l'explosif est interdit. Parmi les qualités des fraiseuses minières, on peut citer la maniabilité, la polyvalence, l'extraction sélective, la facilité d'entretien et de maintenance, le concassage des matériaux à une taille permettant leur transport par convoyeur à bande, ce qui permet de se passer de l'installation d'un concasseur dans le front de taille, etc. Les inconvénients de l'utilisation des fraiseuses minières dans les mines à ciel ouvert sont : la nécessité d'utiliser des centrales énergétiques à carburants gazole et des centrales hydrauliques pour assurer le déplacement autonome des machines, ce qui entraîne des coûts d'exploitation élevés ; la nécessité de créer un front d'exploitation d'une longueur considérable (1,5 - 2 km) afin de réduire les pertes de temps liées à la mise en place des machines aux extrémités des bandes à excaver ; les indicateurs d'efficacité de l'utilisation des fraiseuses minières dépendent des propriétés de résistance des roches ; la durée de vie relativement courte des fraiseuses minières ; la limitation de la dureté des roches extraites ; la nécessité d'utiliser comme moyens de transport des camions-bennes dans les schémas technologiques, etc.

Les résultats de cette étude montrent que les fraiseuses minières fonctionnent selon deux types de schémas technologiques à savoir : le schéma de flux avec fraisage continu et le schéma cyclique avec fraisage discontinu. Les résultats de cette étude montrent également que la formule pour calculer la productivité d'une fraiseuse minière varie et dépend du schéma technologique de fonctionnement de celle-ci.

Les résultats de cette étude sont en parfaite cohérence avec les résultats des études antérieures qui ont été passées en revue dans cette recherche.

Plusieurs implications peuvent être tirées des conclusions de cette recherche. Premièrement, une meilleure compréhension de la technologie de l'exploitation minière à ciel ouvert sans explosif, avec l'utilisation de fraiseuses minières. Deuxièmement, cette étude peut servir à des fins d'informations et d'éducatives.

Malgré les avantages évidents de l'utilisation des fraiseuses minières, pour l'instant, l'exploitation minière à ciel ouvert reste beaucoup plus basée sur l'utilisation du forage et de l'abattage à l'explosif. La méthode d'exploitation minière sans explosif est dans une mesure limitée, principalement dans l'exploitation des roches sédimentaires. Pourtant, plusieurs entreprises proposent un nombre important de machines (fraiseuses minières) capables

d'extraire des roches très dures. En conséquence, les études futures devraient étudier les différentes possibilités de remplacement de la méthode traditionnelle du forage et de l'abattage à l'explosif par la méthode d'exploitation minière à ciel ouvert sans explosif, avec l'utilisation de fraiseuses minières.

BIBLIOGRAPHIE

Avraamova N.S. (2006). « Justification des schémas technologiques de l'exploitation à ciel ouvert des gisements de roches carbonates à l'aide de fraiseuse à couche » Thèse de doctorat.

Cheban A. U. (2012). « Application des fraiseuses minières dans la construction et l'extraction des matériaux de construction » Vestnik TOGU. - № 3(26). P. 105-108.

Cheban A.U. (2016). « Amélioration des technologies d'extraction minière à flux cyclique sans explosif » -Bulletin de l'Université technique d'État de Magnitogorsk portant le nom de G.I. Nosov. -T.14. -№2. P. 5-9.

Cheban A.U. (2017). « Amélioration de l'équipement et des technologies d'excavation de roches sans explosifs » : monographie - Khabarovsk : IGD FEB RAS. - 260 p.

Cheban A.U., & Khrunina N.P. (2024). « Technologie de développement des gisements de charbon complexes par des fraiseuses à ciel ouvert dotées d'un équipement de travail combiné » - Ugol (4):79-82.

Cheban A. Y., Sekisov G. V., & Khrunina N. P. (2018). «Amélioration des technologies d'exploitation à ciel ouvert de gisements à structure complexe à l'aide de fraiseuses minières » Actes de la VIIe conférence internationale scientifique et technique. « Géotechnologies innovantes dans le développement des gisements de minerais et des gisements non métalliques ». - UGGU. - Ekaterinbourg. - 2018. P.176-181.

Cheban S.I. (2015). « Classification des modèles de fraiseuses minières utilisées dans les mines à ciel ouvert ». Revue « Utilisation du sous-sol XXIe siècle ».

Chenna W. (2011). « Etude du régime de fonctionnement du Surface Miner 2500 SM dans les conditions de la carrière de Ain-Touta ». Faculté des sciences de l'ingénieur. Département d'hydraulique (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar, Annaba).

Dias F. D. (2017). « Étude de mise en œuvre du Surface Miner TL1255 Vermeer à la mine de bauxite de Juruti/PA ».

Eremin A.K. (2020). « Caractéristiques de l'utilisation des machines à fraisage par couche ». Revue « technique de la carrière et de la mine » 2020.

Ermakov S.A., & Khosoev D.V. (2008). « Évaluation des performances des fraiseuses minières KSM@2000R lors de l'excavation sans explosifs des roches du gisement de charbon d'Elga en tenant compte de leur renforcement physique et chimique » - Bulletin d'information et d'analyse minière. - № 4. P. 88-93.

Ermakov S.A., Gavrilov V.L., Khosoev D.V., & Khoyutanov E.A. (2012). « Amélioration de la qualité du charbon grâce au développement sélectif du gisement complexe d'Elga ». - Science et Education. -№ 1. P. 24-29.

Friesen A. P. (2015). « Les engins de terrassement et de fraisage Vermeer » - la base de la sécurité économique et environnementale de la technologie d'extraction des matières premières dans les carrières de l'industrie du ciment - Mining Industry. № 5. P. 111, 112.

Grabsky A. A. (2010). « Productivité technique d'une fraiseuse minière » - GIAB. - P. 206-210.

Gubenko A.A., Le Binh Zyong, Grabsky A.A., & Petrov I.V. (2010). « L'état actuel et les perspectives de développement des conceptions des fraiseuses minières à ciel ouvert pour l'excavation couche par couche sans explosion de roches résistantes ». - Bulletin scientifique de l'université d'État des mines de Moscou. - № 7. P. 24-30.

Khosoev D.V. (2016). « Évaluation des conditions d'exploitation du gisement d'Elga du point de vue de l'application des fraiseuses minières » - Industrie minière. -№6 (130). P.81-83.

Kortelev O.B., Cheskidov V.I., & Norrie V.K. (2011). « Influence des paramètres de la zone de travail sur le mode d'exploitation minière et les limites de la carrière » -Problèmes physico-techniques du développement des ressources minérales. Maison d'édition de la branche sibérienne du RAS (Novossibirsk), n° 5, p. 53-59.

Kumar C., Murthy V. M. S. R., Kumaraswamidhas L. A. & Prakash A. (2016). « Influence des spécifications du tambour de coupe sur la performance de la productivité des Surface Miner dans des conditions de résistance variable de la roche » - Quelques recherches. Journal des Mines. Métaux et Combustibles, 181-186.

Nazarov Z.S. & Ermekbaev U.B. (2023). « L'Application des fraiseuses minières pendant l'exploitation des gisements ». Éditeur : « Université de la République d'Ouzbékistan ».

Ordin A.A. & Shvabenland E.E. (2016). « Justification des paramètres technologiques de la méthode d'exploitation à ciel ouvert des gisements d'apatite à l'aide de fraiseuses minières ». Maison d'édition « Académie Russe des Sciences ».

Pankevich Y.B., & Pichler M. (2001). « Technologie et schémas d'exploitation minière avec les fraiseuses 2100 et 2200 SM de Wirtgen GmbH » - Industrie minière.- P, 13-16.

Pankevich Y.B. (2002). « La nouvelle fraiseuse minière Wirtgen 2200 SM en République de Guinée » - Industrie minière. - №1, - P. 5-7.

Pankevich Y.B. & Pichler M. (2001). « Application de la fraiseuse Wirtgen 2100 SM dans l'exploitation à ciel ouvert du minerai de bauxite » - Industrie minière - №1, P. 30- 32.

Pichler M. (2018). « Quelques caractéristiques technologiques des fraiseuses minières Wirtgen Surface Miner dans l'exploitation minière à ciel ouvert ». Journal « Science et Technologies » N°10.

Pichler M., & Pankiewicz Y.B. (2003). « Wirtgen Surface Miner en Inde. Expérience de développement sélectif des gisements de charbon ». - Industrie minière. - №4. P. 40-47.

Pichler M., & Pankiewicz Y.B. (2005). « Quelques caractéristiques technologiques des fraiseuses Wirtgen Surface Miner utilisées dans les mines à ciel ouvert ». // Industrie minière. - 2005. - №1. P.36-40.

Pichler M., Pankiewicz Y.B., & Pankiewicz M.B. (2011). « Les technologies de Wirtgen Surface Mining dans l'industrie minière ». Actifs fixes. № 1. P. 58-64.

Prakash A. (2013). « Une étude sur l'influence de la roche intacte et des propriétés de la masse rocheuse sur la performance des Surface Miner dans des conditions géo-minières indiennes ». Thèse de PhD, École indienne des mines de Dhanbad.

Ptashnik U. P. (2015). « Justification de la technologie d'exploitation des gisements pour l'utilisation des espaces exploités des carrières de calcaire dans la construction ». - Thèse de PhD, 2015, 137 p.

Pytalev I.A. (2022). « Méthode d'exploitation à ciel ouvert d'un gisement de minerais avec l'utilisation de fraiseuses minières ». Éditeur : « Université des sciences et technologies d'Ufa ».

Raikov A.B., Shevchenko A.B., Panchenko A.M., Kozhevnikov V.A., Vlasov G.A., Pichler M., & Pankiewicz U. (2022). « Nouvelle fraiseuse minière 2200 SM en République de Guinée » - Industrie minière. - № 1. P. 5-7.

Roninson E.G. et al., (1994). « Équipement minier pour la mise en valeur des roches sédimentaires semi-dures et dures » - Problèmes d'extraction, de traitement et d'utilisation des matières premières minérales dans l'industrie des matériaux de construction.

Rosmining (2021). « Exploitation efficace du gisement de bauxite de Boke à l'aide de fraiseuses minières Vermeer – Rosmining ».

Schwabenland E.E. (2017). « L'Application de la technologie par portions de couches pour l'exploitation à ciel ouvert de gisements structuraux complexes ». Bulletin d'information-analyse minière № 5 p.382-388.

Shemyakin S.A., Cheban A.Yu., & Lobanova E.A. (2002). « Mécanisation intégrée des opérations d'extraction à ciel ouvert à l'aide de scrapers » - Interstroy Mekh : Actes de la conférence internationale scientifique et technique - Mogilev : MSTU. 458 p.

Shemyakin S.A., Mamaev U.A., & Ivanchenko S.N. (2003). « Nouvelles technologies de développement des mines à ciel ouvert » -Khabarovsk. - 130p.

Shteinzaig R.M., & Anistratov K.Y. (2005). « L'industrie minière mondiale. Histoire des réalisations, perspectives ».- M. : STC Exploitation minière.- P 298-318.

Singh N. P., Seervi V., Kishore N., & Verma A. K. (2024). « Impact de l'utilisation des mineurs de surface sur l'efficacité de la production dans les mines de charbon à ciel ouvert à l'aide de la méthode des moindres carrés »: Une étude de cas. Journal de l'institution des ingénieurs (Inde): Series D, 105(1), 567-580.

Suprun V.I., Artemyev V.B., & Opanasenko P.I. (2017). « La perspective technique et les technologies pour les travaux miniers à ciel ouvert». Exploitation à ciel ouvert, Vol. 4

Traore A. C. (2022). « Exploitation à ciel ouvert du gisement de bauxite de Balaya ». Mémoire de fin d'étude. Université MISiS – Institut des mines de Moscou.

Trapeznikov D.A. (2016). « Les fraiseuses minières comme alternative à l'abattage à l'explosif dans les carrières ». Journal « Industrie Minière » 2024.

Troubetskoy K.N. & Shpar A.G. (1993). « Technologies à faibles déchets et économes en ressources pour l'exploitation minière à ciel ouvert ».

Troubetskoy K.N., Leonov E.R., & Pankevich Y.B. (1990). « Complexes d'équipements mobiles à l'OGR ».

Vermeer ACT (2021). « Vermeer ACT présente une fraiseuse minière ». Journal « Industrie Minière » 2021 № 4.

WIRTGEN GmbH (2021). « Exploitation minière à l'aide des fraiseuses minières » - Exploitation minière à ciel ouvert. Maison d'édition « Reihard-Wirtgen ».

WIRTGEN GmbH (2010). « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual.

WIRTGEN GROUP. « Guide d'application et de planification » - Wirtgen Surface Mining Manual. <https://www.wirtgen-group.com/fr-re/applications/mining/surface-mining/>

Yadav M., Sahu S. P., Singh N. K., Singh P. & Das A. K. (2020). « Surface Miner : une approche écologique de la production de charbon dans les mines de charbon en Inde ». Dans le domaine de l'innovation verte, du développement durable et de l'économie circulaire (pp. 17-32). CRC Press.

Yakimenko D. V. (2018). « Technologie de mise en valeur des gisements à l'aide de fraiseuses et de scrapers améliorés » - Recueil des actes de la VIIème Conférence scientifique et technique

internationale. « Géotechnologies innovantes au développement des gisements de minerais et des gisements non métalliques ». - UGGU. - Ekaterinbourg. - P.182-186.

Zaitsev G.D., & Cheskidov V.I. (2006). « Évaluation des capacités technologiques et techniques de l'équipement pour l'exploitation minière sans explosion des minéraux». -Bulletin d'information et d'analyse minière (revue scientifique et technique). - № 2. P.220-227.