



HAL
open science

Système interactif d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière

Najoua Alaoui, Ahlam Azzamouri, Selwa Elfirdoussi, Pierre Fenies, Vincent
Giard

► **To cite this version:**

Najoua Alaoui, Ahlam Azzamouri, Selwa Elfirdoussi, Pierre Fenies, Vincent Giard. Système interactif d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière. 13ème Conférence internationale de CIGI QUALITA 2019, Jun 2019, Montréal, Canada. hal-02277642

HAL Id: hal-02277642

<https://hal.science/hal-02277642>

Submitted on 3 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Systeme interactif d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière

NAJOUA ALAOUI¹, AHLAM AZZAMOURI¹, SELWA ELFIRDOUSSI¹, PIERRE FENIES^{1,2}, VINCENT GIARD^{1,3}

¹ EMINES, UNIVERSITÉ MOHAMMED VI POLYTECHNIQUE

43150 Ben Guerir, Morocco

{Najoua.Alaoui, Ahlam.Azzamouri, Selwa.Elfirdoussi, Pierre.Fenies, Vincent.Giard}@emines.um6p.ma

² PANTHEON-ASSAS, UNIVERSITÉ PARIS II

75006 Paris, France

³ UNIVERSITÉ PARIS-DAUPHINE, PSL RESEARCH UNIVERSITY

75016, Paris, France

Résumé - Le processus d'extraction d'une mine à ciel ouvert, composée d'une superposition de couches de minerais de caractéristiques différentes, résulte de l'itération d'une séquence d'opérations élémentaires réalisées sur des cases, par des machines spécialisées ou polyvalentes. La programmation à moyen terme de l'extraction consiste à décider l'affectation des machines disponibles au cours du temps. Ce problème est abordé au travers une simulation à événements discrets, en cours d'implantation dans une mine de phosphate, prenant en compte l'ensemble des contraintes d'extraction et pilotant le processus d'extraction par la combinaison d'un critère d'efficacité (urgence de l'obtention de certaines qualités) et d'un critère d'efficience (déplacements des machines). Le paramétrage du pilotage de la simulation permet d'obtenir rapidement de très nombreux scénarios techniquement réalisables, entre lesquels le choix est difficile, en raison de la nécessaire prise en compte du temps dans la mise à disposition progressive des minerais extraits et dans l'utilisation des machines. Nous décrivons les fondements d'un système d'aide à la décision visuel, en cours de développement, permettant d'exploiter les résultats d'un scénario, de comparer plusieurs scénarios et de piloter le paramétrage de la recherche d'une bonne solution. Ce SIAD, de type *web-based*, est couplé au simulateur via une base de données relationnelle.

Abstract - The extraction process of an open-pit mine, consisting of an accumulation of ore layers of different characteristics, results from the iteration of a sequence of elementary operations carried out on parcels, by specialized or multipurpose machines. The medium-term programming of the extraction consists in deciding the assignment of the available machines over time. This problem is addressed through a discrete event simulation, being implemented in a phosphate mine, taking into account all the extraction constraints and driving the extraction process by the combination of an efficiency criterion (urgency of obtaining certain qualities) and an effectiveness criterion (machine movements). The controlling parameterization of the simulation makes it possible to quickly obtain many technically feasible scenarios, between which the choice is difficult, because of the necessity of taking into account time in the progressive provisioning of the extracted ores and in the use of machines. We describe the bases of a visual decision support system, currently under development, which makes it possible to exploit the results of a scenario, to compare several scenarios and to pilot the parameterization in search for a good solution. This *web-based* DSS is coupled to the simulator via a relational database.

Mots-clés – Système interactif d'aide à la décision (SIAD), Interface graphique, Planification, Mine à ciel ouvert.

Keywords – Decision Support System (DSS), Graphical user interface, Scheduling, Open-pit mine.

1 INTRODUCTION

OCP SA est le leader mondial de l'extraction de minerai de phosphate et de la production d'engrais. Les décisions tactiques à prendre par OCP dans le cadre du problème de sa planification sont liées à l'extraction du minerai et dépendent de deux critères, [Azzamouri *et al*, 2018]: le choix des cases à extraire et l'allocation des machines à utiliser pour effectuer les opérations d'extraction. Le but de la planification est de répondre à une demande connue ou prévue en extrayant les couches demandées du gisement. La mine contient P panneaux et chaque panneau est composé de N_p cases. Dans ce gisement, les cases sont des rectangles de 40 m sur 100 m \rightarrow 4 000 m². Le gisement est constitué d'une alternance de couches de stérile et de Qualités Sources (QS) de phosphate de caractéristiques différentes. Les décisions à prendre portent sur le choix des cases à traiter pour

obtenir en temps voulu les QS désirées, qui peuvent ne pas se trouver à la surface, et l'assignation dynamique des machines disponibles pour obtenir ce résultat. Les caractéristiques de ces QS ne correspondent pas aux besoins de la chimie lesquels se définissent par des Qualités Marchandes (QM) de caractéristiques précises. Ces QM sont obtenues par mélange (*blending*) de QS, sachant qu'une même QM peut être obtenue par des mélanges différents de QS, dont la nomenclature dépend des disponibilités immédiates et à venir des QS et du programme de production des QM, ce qui relève du *blending* dynamique [Azzamouri *et al*, 2018] et complique la définition datée des besoins en QS.

La formulation du programme d'extraction par simulation à événement discret (SED) a été préférée à celle de la programmation mathématique numériquement irréaliste [Azzamouri *et al*, 2018]. Ce modèle de simulation permet de

généraliser rapidement un certain nombre de scénarios alternatifs cohérents, sur la base de valeurs prises par un ensemble de paramètres : indice de priorisation des couches de phosphate, distances parcourues par les machines, spécifications techniques relatives à l'affectation des machines polyvalentes ou spécialisées, nombre minimal de cases contiguës qu'une machine doit traiter avant de pouvoir se déplacer ailleurs, etc.

Certains scénarios doivent être écartés parce que, à une certaine échéance, la demande globale des QM ne peut pas être satisfaite avec les QS extraites. Ce test de rejet est effectué à travers un ensemble de problèmes de *blending*, définis sur plusieurs horizons de planification (1, 3, 6, 9 et 12 mois), avec les mêmes contraintes de composition et utilisant la formulation classique du *blending* par la programmation linéaire [Azzamouri et Giard, 2018] pour vérifier s'il est possible de satisfaire la demande cumulée de QM sur n mois, avec la production cumulée des QS sur ces n mois. Dans cette analyse, certains scénarios qui peuvent sembler intéressants sur un horizon à quelque mois, peuvent être à écarter sur la base des résultats sur un plus long terme.

Si la création de scénarios contrastés est aisée et rapide, la sélection du « bon » scénario est difficile car il n'existe pas d'indicateur synthétique permettant de choisir le bon programme d'extraction parmi les scénarios considérés comme efficaces (c'est-à-dire ayant passé avec succès le test du *blending* décrit ci-dessus). C'est la raison pour laquelle on a choisi d'offrir au décideur un ensemble de représentations des conséquences physiques des différents scénarios acceptables générés par la simulation.

À ce stade, il est important de souligner qu'il n'est pas possible, avec la modélisation retenue, d'obtenir de visualisation de l'évolution de la production dans le système étudié comme c'est normalement le cas avec la SED. Classiquement, la SED décrit le cheminement, dans un système productif composé principalement de stocks et de processeurs, spatialement localisés, d'items entrant dans le système pour faire l'objet de traitements par ces processeurs avant de quitter ce système productif. Ce n'est pas le cas dans notre problème de simulation car les éléments à traiter (cases minières) ne peuvent pas être déplacés et sont occupés successivement par des processeurs mobiles correspondant à des machines spécialisées ou polyvalentes, capables d'effectuer d'une à trois des sept opérations élémentaires nécessaires pour extraire le minerai d'une couche donnée, avant d'être affectés à une autre opération élémentaire sur une autre case. Dans notre cas, avec plus de 500 cases actives (sur plus de deux mille), cette représentation classique conduirait à utiliser un processeur par case (et donc plus de 500 processeurs), lequel mobiliserait successivement les machines permettant de traiter les opérations élémentaires. Cette représentation complexe pose un problème additionnel car les éléments à traiter ne proviennent pas d'un point d'entrée, mais de la case elle-même, via une pile de blocs des différentes couches situées sous la surface de la case. Ce choix de modélisation conduirait à de gros problèmes de gestion des machines dans le modèle de simulation et à une représentation visuelle difficilement exploitable pour suivre l'avancement de l'extraction.

La modélisation retenue privilégie une approche logique, basée sur des ensembles de processeurs parallèles ; chaque ensemble est consacré à une seule opération élémentaire, est relié en amont à un stock d'items (blocs) en attente de cette opération élémentaire ; après traitement, l'item est expédié dans le stock des items qui attendent l'opération élémentaire suivante (qui peut être la

première des huit opérations élémentaires). Ce choix de modélisation facilite le suivi de la simulation mais rend difficile le suivi dynamique visuel de l'extraction dans la mine et des utilisations des machines. La présentation des résultats de la simulation doit nécessairement s'accompagner d'une visualisation interactive simple et claire des conséquences spatiales statiques et dynamiques, facilitant l'interprétation des résultats issus du modèle de simulation. La comparaison des scénarios implique une exploration difficile de toutes leurs conséquences multidimensionnelles. Il a donc été décidé d'encapsuler la simulation dans un système d'aide à la décision (SIAD) permettant de piloter la construction de scénarios et de faciliter l'interprétation dans le temps et dans l'espace de chacun d'entre eux ou en comparaison de deux scénarios. Les caractéristiques de ce SIAD seront exposées dans la section 3.

En section 2, nous allons présenter une revue de la littérature portant sur les SIAD de planification et leurs fondements techniques. En section 3, on exposera les bases fonctionnelles et techniques du système de planification interactif conçu. En section 4, nous illustrerons son utilisation. Pour finir, nous concluons et discutons des perspectives de ce SIAD en section 5.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Au début des années soixante-dix, les bases des systèmes d'aide à la décision ont été posées par [Gorry et Morton, 1971], puis transformées en une approche structurée par [Keen et Morton, 1978]. Le développement des technologies de l'information a conduit à une augmentation considérable du potentiel des SIAD [Shim *et al*, 2002], [Eom *et al*, 2006], [Bhargava *et al*, 2007] sans en modifier les fondements. Fondamentalement, un SIAD peut être décomposé en : *i*) une interface de définition d'un problème structuré à partir d'un problème complexe partiellement structuré ; *ii*) un module de résolution du problème structuré, s'appuyant sur l'optimisation ou la simulation [Power et Sharda, 2007] ; *iii*) une interface capable d'explorer toutes les conséquences d'une solution donnée mais également capable de la valider ou de l'ajuster ; *iv*) et dans le cas où aucune solution satisfaisante n'a été trouvée, les informations trouvées sont utilisées pour redéfinir un nouveau problème structuré (étape *i*).

Nous analysons, en sous-section 2.1, un certain nombre d'articles et communications étudiant des systèmes d'aide à la décision de résolution de problèmes de planification. La plupart de ces SIAD de la planification étant basés sur un modèle d'optimisation, nous analysons de manière plus approfondie, en sous-section 2.2, les SIAD de planification basée sur la simulation. Enfin, en sous-section 2.3, nous examinons la conception de SIAD d'un point de vue technique.

2.1 SIAD orientés planification

Le SIAD décrit dans [Galasso *et al*, 2009] vise à planifier la production d'une chaîne logistique en fonction d'une demande instable. Ainsi, ils ont choisi un modèle dans lequel les paramètres décisionnels sont liés au processus de gestion de la production. [Krishna *et al*, 2009] proposent la conception d'un SIAD tenant en compte la planification des machines et la gestion des stocks pour une industrie de fabrication de produits multiples. D'autres algorithmes sont suggérés dans [Tang *et al*, 2007] pour déterminer un modèle de planification pour la production, prenant en compte plusieurs contraintes. Le SIAD visuel et *web-based* présenté par [Krishnaiyer et Chen, 2015] vise à planifier le processus de

livraison du courrier aux clients tout en tenant compte de la planification du tri. Afin de garantir un bon niveau de service client, la solution optimale n'est obtenue qu'après la collecte et l'analyse des informations provenant de différents systèmes. L'un des avantages de ce SIAD réside dans le choix d'applications *Web* qui constituent une technologie avancée fiable pour modéliser un certain nombre de services. Toutefois, le processus de planification semble inefficace.

Le SIAD d'IBM pour la planification de la production de papier (A-Team) présenté dans [Keskinocak *et al*, 2002] est composé de trois types d'agents fonctionnant de manière asynchrone : les « constructors », « improvers », et les « destroyers ». La tâche de l'agent « constructors » consiste à définir le problème et à créer de nouvelles solutions. L'agent « improvers » améliore l'ensemble des solutions en modifiant et en combinant les solutions existantes. Tandis que l'agent « destroyers » s'occupe de l'élimination des mauvaises solutions et pilote les efforts des « improvers » pour limiter le nombre de solutions. Dispatcher, quant à lui est un SIAD de planification mis en œuvre sur VBA par [Freed *et al*, 2007].

2.2 SIAD de planification basé sur la simulation

Parmi les SIAD de planification, peu d'entre eux sont basés sur la simulation. GeSIM est un système de planification basé sur la simulation, proposé par [Heilala *et al*, 2010] pour planifier la fabrication des produits dans une approche impliquant le client. Sa démarche suit des étapes bien définies : intégration des données, alimentation du modèle de simulation, présentation des résultats et prise en charge de modifications interactives.

[Fanti *et al*, 2014] présentent à leur tour un SIAD basé sur la simulation visant à améliorer les décisions tactiques et opérationnelles de la gestion logistique. Il aide à gérer le transport de marchandises entre un port et une zone de stockage à sec d'une manière plus efficace en gérant en temps réel les systèmes de transport afin de réduire les délais dans les ports et la zone de stockage à sec. Ils proposent également [Fanti *et al*, 2015] un SIAD intégrant dans le problème précédent les transactions commerciales. [Comi et Rosati, 2015] proposent un SIAD permettant de comprendre et de simuler la structure d'un système urbain de transport de marchandises et de calculer des indicateurs niveau de service à comparer à des valeurs-cibles ou de *benchmark*.

2.3 Technologie SIAD associée

Afin de comparer notre approche avec d'autres travaux similaires, nous avons décomposé la conception du SIAD en quatre dimensions analytiques, qui peuvent ne pas être utilisées dans leurs totalités dans un SIAD : *a*) type d'application implémenté pour exécuter le SIAD (application bureautique versus *Web-based*) ; *b*) la résolution du problème ; *c*) l'interface de définition du problème ou de conception de la solution ; *d*) le SIAD proposant un système générique.

a. De nombreux auteurs basent leurs SIAD sur des applications de bureau telles qu'Excel ou Microsoft Access (MA) ; c'est le cas pour [Heilala *et al*, 2010], [Sharma *et al*, 2015], [Freed *et al*, 2007], [Galasso *et al*, 2009], [Tang *et al*, 2007]. Cependant, Excel est limité à 2 dimensions et est utilisé souvent dans le cas d'un simple jeu de données ; il ne permet pas de prendre en charge le concept relationnel. Par ailleurs, MA est limité à la plate-forme Windows et n'offre pas une grande évolutivité

ni une forte sécurité. Suivant la même dimension analytique, d'autres solutions consistent en des approches basées sur le Web permettant l'intégration de données provenant de systèmes différents [Krishnaiyer et Chen, 2015], [Krishna *et al*, 2009].

- b.* Chaque SIAD nécessite des capacités de résolution de problèmes. Les processus d'optimisation proposés reposent sur différentes approches locales : simulation [Camargo *et al*, 2017], [Heilala *et al*, 2010], [Fanti *et al*, 2014, 2015], [Berna Dengiz, 2005], [Freed *et al*, 2007], [Comi et Rosati, 2015] ; optimisation [Sharma *et al*, 2015] ; heuristique ou logiciel général (ERP) et leur APS (Système de planification avancée) [Krishnaiyer et Chen, 2015]. Certains de ces SIAD sont implémentés à l'aide de langages de programmation tels que VB (Visual Basic), VBA (Visual Basic pour Application), Visual C ++. Si VBA et VB sont des langages conviviaux, ils ne sont compatibles qu'avec Windows et n'incluent pas d'approche orientée-objet.
- c.* Peu de systèmes SIAD fonctionnent avec des interfaces capables de transformer un problème semi-structuré en un problème structuré. En aval, l'interface de traitement des résultats est généralement assez basique. Les technologies Web, Visual Basic ou Visual C ++ ou un générateur SIAD sont utilisées dans les systèmes SIAD suivants : [Heilala *et al*, 2010], [Sharma *et al*, 2015], [Krishnaiyer et Chen, 2015], [Freed *et al*, 2007], [Krishna *et al*, 2009].
- d.* Enfin, certains articles proposent des approches basées sur des systèmes génériques afin de prendre en considération les trois premières dimensions (*a*, *b*, *c*) [Keskinocak *et al*, 2002] en utilisant une technologie telle que celle des générateurs IBM ou celle des SIAD. À l'heure actuelle, la solution IBM offre de nombreux avantages, notamment en ce qui concerne le Big Data et la capacité informatique. Cela étant, la plupart des déploiements de packages IBM sont très coûteux et ne fonctionneront que dans des environnements IBM. En ce qui concerne le générateur SIAD, il s'agit d'une approche générale basée sur la modélisation de données structurelles et qui est mise en œuvre à l'aide d'un système de balisage tel que XML (eXtensible Markup Language). En soi, la nature générale de ces générateurs est restrictive, en raison de la nécessité de formaliser les nouvelles données et de définir de nouvelles définitions des contraintes en fonction de l'environnement de travail de chaque demande. De plus, d'un point de vue technique, ces technologies sont à la fois coûteuses en temps et en argent.

À la lumière des articles analysés, nous avons constaté que même si de nombreux problèmes de planification ont été traités, les approches utilisées diffèrent d'un problème à l'autre. La complexité de la formulation mathématique du problème traité a conduit certains auteurs à utiliser des modèles de simulation permettant de décortiquer cette complexité sans perdre la précision recherchée. La prise en compte des contraintes minières conduit à une complexité encore plus élevée. De ce fait, nous avons intégré, contrairement aux approches proposées, un niveau de granularité plus fin dans la modélisation pour pouvoir répondre au problème de planification à court terme de l'extraction minière. Selon notre étude technique, la plupart des SIAD se basent sur des technologies ne garantissant pas une flexibilité et une interactivité dans la définition du problème, la visualisation des résultats et par conséquent l'aide à la prise de décision.

3 DESCRIPTION DU SIAD

Pour répondre à la problématique décrite précédemment, nous proposons un SIAD pour la planification tactique de l'extraction minière. Ce système est basé sur l'approche de [Gorry et Morton, 1971]. Nous allons en détailler l'architecture fonctionnelle (sous-section 4.1) et ses bases techniques (sous-section 4.2).

3.1 Architecture fonctionnelle du SIAD

La conception de ce SIAD suit la répartition fonctionnelle décrite précédemment en introduction de la section 2. Partant d'un problème partiellement structuré, il permet la définition d'un problème structuré qui peut être simulé. La simulation du problème structuré permet de reproduire fidèlement le processus d'extraction, grâce à l'utilisation de règles d'attribution de priorité paramétrées pour les machines libérées, selon un système de pondération tenant compte la disponibilité et la facilité d'accès à la couche souhaitée ainsi que l'allocation des équipements. L'objectif du premier étant l'efficacité et le second l'efficience. Après obtention d'un scénario via le modèle de simulation, si le scénario généré n'est pas réalisable ou satisfaisant, on retourne à l'étape de la formulation du problème structuré et la calibration des paramètres.

L'organigramme présenté dans la (Figure 1) suit le modèle d'origine de conception d'un SIAD, avec ses quatre composants.

3.2 Architecture technique du SIAD

Notre SIAD est basé sur une architecture MVC (*Model-View-Control*) avec des fonctionnalités typiques des SIAD, telles que la gestion des données, la gestion des modèles et l'interface graphique de l'utilisateur. Ce SIAD est une application *Web based* sur Java intégrant différentes API telles que leafJS pour la présentation de cartes (une bibliothèque JavaScript open source pour les cartes interactives conviviales pour les mobiles), JChart (Java Chart) pour la visualisation de la solution et la bibliothèque Simul8 pour lancer le modèle de simulation, Simul8 étant le logiciel de simulation utilisé par le SIAD et également Excel, dont le solveur est utilisé pour résoudre l'ensemble des problèmes PL du blending afin de vérifier si les QS extraites peuvent répondre à la demande en QM, à différents horizons de planification (ces problèmes linéaires de variables continues étant de taille réduite). Le module de visualisation est basé sur Ajax (JavaScript et XML asynchrones) et ceci pour conserver toutes les fonctionnalités de visualisation dans la zone du navigateur sans avoir à demander au serveur une nouvelle page. Comme le montre la (Figure 2), le SIAD proposé pour planifier l'extraction du minerai d'une mine de phosphate comporte trois étapes principales.

- La première étape concerne la gestion des données liées aux activités de l'entreprise. Il existe deux types de données : structurelles et dynamiques. Les données structurelles concernent la structure du gisement (couches présentes dans chaque panneau, tranchées, cases...) ainsi que les spécifications des machines liées à la nature des opérations élémentaires qu'ils peuvent exécuter sur les différentes couches, etc. Les données dynamiques concernent la situation à prendre en compte au début de la simulation (position des machines, avancement de l'extraction...) ainsi que les données de paramétrage d'un scénario. Ces données sont stockées dans une base de données relationnelle.

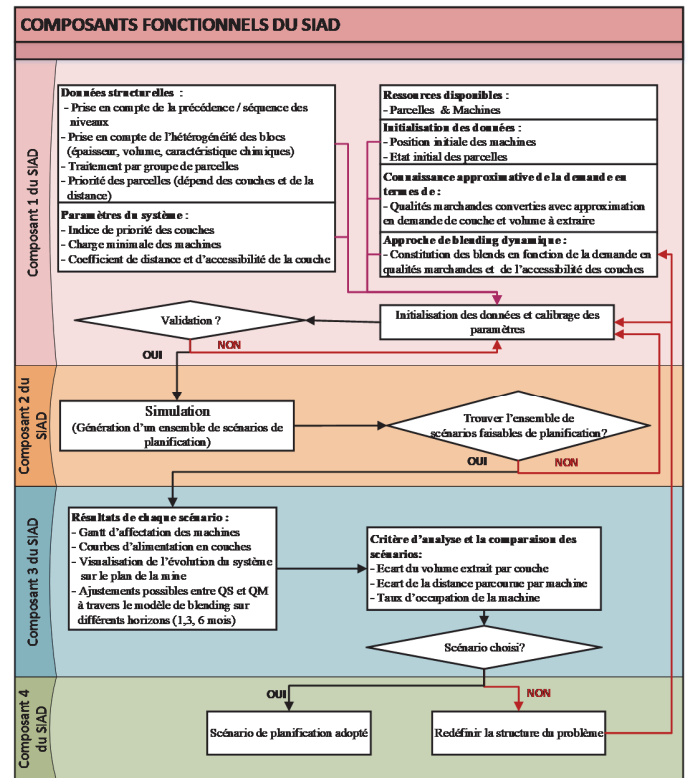


Figure 1. Composants fonctionnels du SIAD

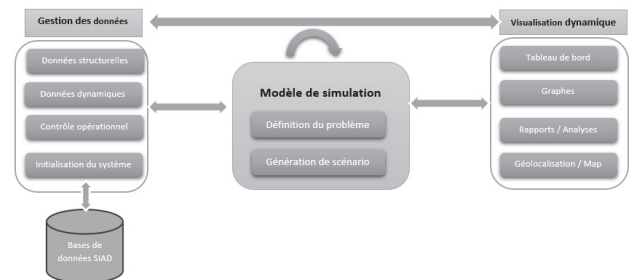


Figure 2. Architecture technique du SIAD

- La deuxième étape est un modèle de simulation à événements discrets qui permet de simuler le processus d'extraction à l'aide des données structurelles et dynamiques [Azzamouri, 2018]. Le modèle de simulation décrit minutieusement l'évolution du processus d'extraction ainsi que l'affectation des machines. Tandis que le solveur PL d'Excel est utilisé pour vérifier la possible adéquation entre l'offre de QS et la demande de QM par l'intermédiaire du programme linéaire continu du blending.
- La troisième étape est une visualisation de données basée sur le scénario proposé par l'étape de simulation. Le SIAD permet aux utilisateurs de visualiser les résultats d'un scénario à l'aide de différents types de présentation, tels que des graphiques, des tableaux de bord, des tableaux et des visualisations d'avancement géographique sur une carte. Cette étape a également une fonctionnalité comparative pour différents scénarios qu'on va expliquer par la suite. Si les résultats sont satisfaisants, la décision est archivée dans la base de données au moyen de l'interface utilisateur, sinon un nouveau scénario est évalué.

Les résultats obtenus de la simulation sont des prévisions horaires d'alimentation de 10 couches de minerai différentes. Les exigences en termes d'extraction horaire dépendent de la production planifiée en QM obtenue en mélangeant les QS. Par ailleurs, ces mélanges sont définis de manière dynamique et dépendent des stocks disponibles des couches extraites, des alimentations ainsi que de la planification de production.

Ces résultats sont préalablement testés par le modèle du blending [Azzamouri et Giard, 2018] qui garantit ou pas que les scénarios résultants sont tous valables en termes de satisfaction de la demande globale. La différence entre les scénarios validés réside uniquement dans l'efficacité de leurs performances, à savoir le choix des cases à extraire et des affectations de machines.

Par conséquent, l'acceptabilité et le choix d'une solution de simulation dans ce problème de planification, obtenu grâce à un système de paramétrage donné, résultent de la cohérence technique de la simulation, de la satisfaction de la demande globale à l'horizon déterminé et de l'analyse de la performance de cette solution en comparaison avec d'autres solutions alternatives vérifiant à leur tour les deux premières conditions.

4.1 Gestion des données

Notre Framework respecte le schéma de base des données relationnelle présenté dans la (Figure 3), ce qui permet aux utilisateurs de définir les données structurelles et dynamiques. Une interface d'utilisateur différente est utilisée pour insérer les données en respectant l'intégrité structurelle. La (Figure 4) illustre un exemple concernant l'interface d'édition des cases.

Figure 4. Interface d'édition des cases

La diversité des cases présentes dans le système est énorme, ce qui complique la planification de leur extraction. Cela dit, il était nécessaire de définir un groupement permettant de mieux structurer les données réelles importées de la mine en termes de variété géologique, à savoir la composition de chaque case, le volume et l'épaisseur de chaque couche, etc. Ces caractéristiques géologiques présentent une grande variabilité d'un panneau à l'autre, d'une tranchée à l'autre et même d'une case à une autre. Ainsi, cette logique de regroupement nous a poussé à créer deux nouvelles notions nécessaires : *i*) le « sous-panneau » définit un regroupement de cases ayant la même structure, à savoir les mêmes couches et leurs alternances. *ii*) le « groupe » traduisant l'ensemble des cases appartenant au même sous-panneau avec la même épaisseur des couches qui les constituent.

Une fois que les données structurelles sont prêtes à être traitées, nous devons initialiser le système pour préparer son lancement, défini précédemment en tant que données dynamiques. Ces données concernent principalement les positions initiales des machines, l'état initial des stocks ainsi que l'état initial du gisement. En raison de l'énorme quantité de données, nous avons mis en place un outil permettant d'importer ces données via un fichier Excel fourni par le responsable de la mine.

Parmi les informations saisies par l'utilisateur, nous avons les cases en cours d'extraction ou à extraire. La (Figure 5) illustre la définition de l'opération élémentaire, de la machine affectée et de

la progression de l'extraction de deux cases avec la précision de l'échelle temporelle.

Case ID	Layer	Block	Machine	Operation	Time	Time	Actions
PIMS-11-6	Couche 2	block2	D11T1	Decapage	1	2	[Icons]
PIMS-11-6	Couche 2	block2	BOULON	recouvrement	1010	12	[Icons]

Figure 5. Exemple de cases en cours d'extraction

Après avoir saisi et importé toutes les données nécessaires, l'étape suivante consiste à calibrer les paramètres de simulation à l'aide de l'interface de définition du problème.

4.2 Modèle de simulation à événements discrets

Pour tester différents scénarios opérationnels, nous avons mis en place une interface de calibrage des paramètres appelée « Problem definition » (Figure 6), qui permet à l'utilisateur d'agir sur plusieurs aspects, tels que les indices de priorité des couches, le nombre minimal de cases successives à extraire avant qu'une machine puisse se déplacer ailleurs, les coefficients de la distance et d'accessibilité des couches. Ainsi, pour un scénario donné, le système permet dans le cas d'un scénario généré non réalisable et / ou non satisfaisant en termes d'efficacité et d'efficience, de redéfinir le problème ou d'en créer un nouveau dans le but de générer un scénario satisfaisant qui peut être adopté comme planification.

Une fois la définition du problème terminée, la simulation est exécutée et les résultats du scénario, générés. Chaque scénario correspond à une proposition de planification des cases à extraire et d'affectation des machines aux cases, pour effectuer une opération élémentaire sur un certain volume, en respectant les paramètres retenus pour le scénario.

Figure 6. Interface de calibrage des paramètres

4.3 Visualisation des données

Dans cette sous-section, nous présentons deux aspects de la visualisation des données : un affichage des résultats d'un scénario et un volet de comparaison entre deux différents scénarios.

4.3.1 Résultats d'un scénario de planification

Le SIAD traite l'évaluation d'un scénario en utilisant 4 onglets principaux avec de la possibilité de filtrer par période.

Le premier onglet concerne les courbes d'alimentation cumulatives des couches, comme illustré sur la (Figure 7). La couche cumulative extraite est présentée par volume et par période. Il est également possible aux utilisateurs d'évaluer la couche produite en fonction de l'indice de priorité, d'évaluer le

scénario proposé en vérifiant s'il répond à la demande et d'identifier si nous sommes en surproduction ou en sous-production. Le deuxième onglet vise à préciser, pour une période donnée, le volume de chaque couche extraite. Globalement, ce graphique permet aux utilisateurs d'avoir des détails sur l'alimentation en couches extraites et de visualiser l'évolution de l'extraction.

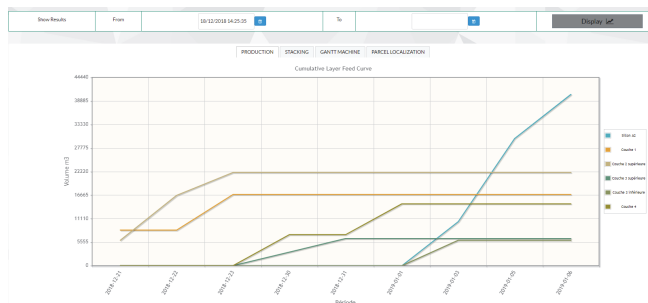


Figure 7. Courbes cumulées d'alimentation en couches sources

Sur l'onglet 3, l'affectation proposée des machines par opération élémentaire est visualisée à l'aide du Gantt machine, comme illustré à la (Figure 8). Pour chaque machine Gantt, l'utilisateur peut visualiser les affectations proposées avec précision en termes de temps, de nature de l'opération élémentaire effectuée et de définition de la case, la tranchée et le panneau sur lesquels la machine travaille pendant différentes périodes. De plus, l'utilisateur a la possibilité de filtrer en fonction d'opérations élémentaires ou d'une machine spécifique pour une meilleure visualisation et analyse de la performance des machines en termes de temps d'occupation et de temps de déplacement.

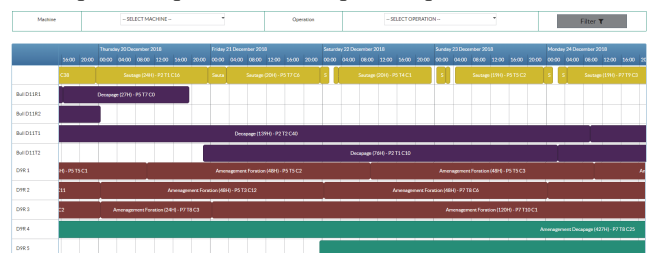


Figure 8. Gantt-machines

Les graphiques présentés précédemment (Figure 7) et (Figure 8) aident les responsables opérationnels à évaluer l'impact du scénario à court et à long terme et permettent d'éviter éventuellement toute solution pertinente à court terme mais pénalisante à long terme.

Finalement, pour une évaluation plus efficace dans le terrain, le dernier onglet utilise le principe de mappage pour modéliser la solution sur une carte réelle. Basé sur des technologies cartographiques, le système marque les différentes cases traitées (Figure 9). La représentation utilise deux couleurs différentes. Rouge pour les cases en cours d'extraction et vert pour les cases extraites. L'utilisateur peut zoomer pour obtenir plus de détails sur la machine effectuant le travail, l'opération élémentaire effectuée ainsi que les informations sur les cases, à savoir l'épaisseur, la tranchée et le panneau (Figure 10). Cette interface donne une vue concrète afin de pouvoir valider visuellement le scénario.

Les vues illustrées dans (Figure 9) et (Figure 10) peuvent être rafraîchies toutes les 2 secondes, chaque étape correspondant à

l'état de la mine 12 heures plus tard, afin de préciser la progression de l'extraction.

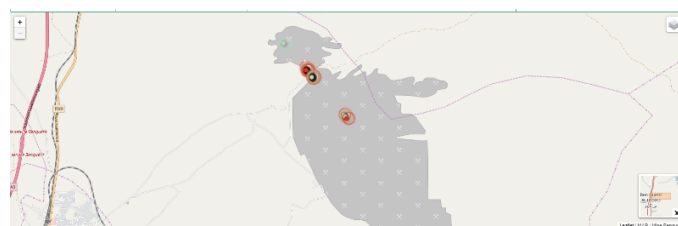


Figure 9. Mapping des cases et des machines

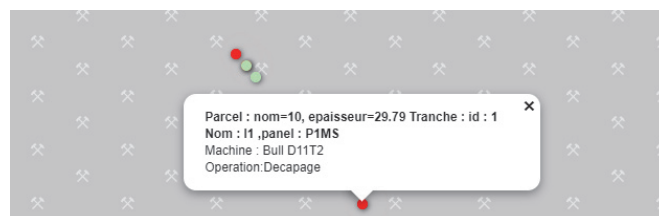


Figure 10. Informations sur les cases en cours d'extraction

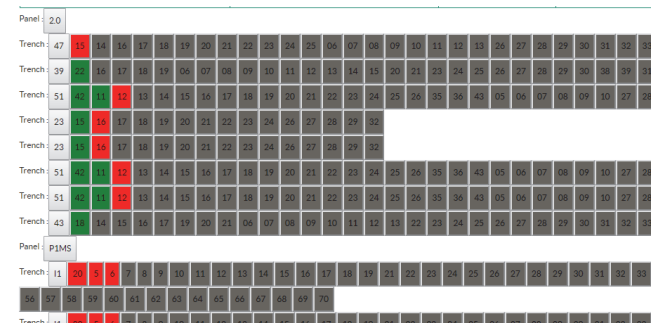


Figure 11. Visualisation des cases traitées par tranchée et panneau

Pour assurer une visualisation plus précise du scénario en les projetant sur la structure géologique de la mine (panneau, tranchée et case). La (Figure 11) illustre les cases à traiter par appartenance à la tranchée ainsi qu'au panneau sur un horizon de planification défini en utilisant les mêmes codes couleurs, expliqués sur la carte (Figure 9 et Figure 10), tandis que les cases non traitées sont présentées en gris. Cette visualisation permettra, ainsi, aux opérationnelles de valider la faisabilité du scénario proposé en tenant en considération les contraintes terrain.

4.3.2 Analyse comparative de deux scénarios différents

Dans cette étude de cas, deux scénarios d'extraction différents basés sur des indices de priorités des couches définis différemment ont été utilisés. Les deux ont les mêmes données structurelles / dynamiques et sont exécutés sur le même horizon de planification. Nous présentons ci-dessous (Figure 12) les graphiques associés pour chaque scénario afin d'évaluer ses performances. Les courbes d'alimentation montrent clairement l'influence du paramètre d'indice de priorité de couche défini différemment pour chaque scénario. Il en résulte des différences en termes de volume extrait de chaque couche et de leur cumul. Cela a également un impact sur le choix des cases extraites afin d'obtenir les couches les plus nécessaires dans un horizon déterminé. Cette influence justifie le choix de cette variable en tant que paramètre de calibrage parmi les paramètres qui pilote notre modèle de simulation, tel qu'il est implémenté dans notre SIAD. Ainsi, le modèle prend en compte l'indice de priorité défini comme

premier critère afin de suggérer une planification d'extraction qui priorise l'extraction de la couche ayant le plus grand indice au plus bas. En fonction de l'état de la mine à l'initialisation, cela peut également impliquer l'extraction d'autres couches.

Avec les résultats fournis, une comparaison des scénarios est possible entre les volumes extraits de chaque couche dans chaque scénario. Soit graphiquement, en choisissant la couche à comparer dans les deux scénarios (Figure 13), soit plus précisément à l'aide de l'écart calculé d'une couche, qui ce défini par la différence entre le volume cumulé extrait d'une couche spécifique dans le scénario 1 et le scénario 2, le calcul des écarts des couches a pour objectif de faciliter le choix du scénario le plus performant entre l'ensemble des scénarios, tous les scénarios vérifiant déjà la condition principale de pouvoir répondre à la demande globale avec leurs alimentations en couches extraites. Cela dit, le responsable opérationnel peut avoir une idée plus précise de la pertinence de chaque scénario dans l'horizon de planification, en fonction des couches extraites et de leurs volumes dans chaque scénario.



Figure 12. Juxtaposition des courbes d'alimentation dans deux scénarios différents

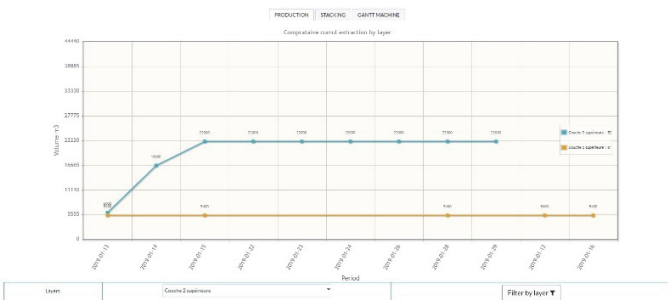


Figure 13. Courbe d'alimentation de la couche 2 dans deux scénarios différents

Dans le même contexte, le responsable opérationnel a la possibilité de comparer les scénarios étudiés en termes de temps d'occupation et de temps de déplacement des machines par période. Comme présenté précédemment, chaque tâche décrit l'affectation d'une machine à une ou plusieurs opérations élémentaires en fonction de la nature de la machine, qu'elle soit spécialisée ou polyvalente.

Cette comparaison peut être faite graphiquement (Figure 14) en observant la différence entre le temps d'occupation et le temps de déplacement de chaque machine ou peut être calculée avec précision à l'aide de l'écart d'occupation de la machine qui est calculé par la différence entre le temps d'occupation d'une machine spécifique dans les scénarios 1 et 2, tandis que l'écart de déplacement des machines est calculé par la différence entre le temps de déplacement de chaque machine dans les deux scénarios. Ces résultats expliquent précisément la fréquence de déplacement de chaque machine et son temps d'occupation dans les deux scénarios, conduisant à un choix simplifié d'un scénario adéquat, non seulement efficace, mais également efficient. Le responsable opérationnel peut donc décider du scénario à choisir à la lumière de cette juxtaposition de Gantt machines et des écarts calculés.

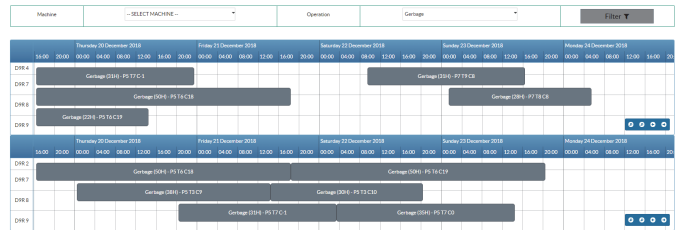


Figure 14. Juxtaposition des Gantt machines dans deux scénarios différents

Comme expliqué dans cette section par des expériences basées sur l'étude de cas de l'extraction de minerai, le SIAD présenté conduit à une prise de décision plus simple qui permet à l'utilisateur de choisir le scénario le plus adéquat qui soit non seulement efficace, mais également efficient. Avec une évaluation précise d'un scénario et / ou de différents scénarios. Ce SIAD aide le décideur à quantifier l'impact des scénarios de planification et à choisir rapidement la meilleure solution à mettre en place en prenant compte du processus aval de la chaîne (constitution des mélanges). Techniquement, le SIAD permet la création d'une boucle rétroactive qui aide à définir / redéfinir le problème afin d'avoir un ensemble différent de solutions qui seront analysées et comparées aux autres scénarios générés. Par conséquent, le décideur peut choisir le scénario à adopter ou bien revenir à l'interface de calibrage des paramètres.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article traite la conception d'un SIAD de planification de l'extraction d'une mine à ciel ouvert, basée sur une simulation à événements discrets, qui aide l'utilisateur à choisir le meilleur scénario de planification parmi l'ensemble de scénarios alternatifs d'extraction du minerai permettant de satisfaire la demande globale en qualités marchandes sur l'horizon de planification tout en étant efficace et efficient. Le modèle de simulation simule le processus d'extraction complexe de minerai au moyen de règles d'attribution de priorité paramétrées pour les machines libérées selon un système de pondération précis. Ce dernier est défini en tenant compte de nombreuses contraintes parmi lesquelles nous citons la disponibilité et le temps d'accès facile à la couche souhaitée et la distance à parcourir par les équipements. Le SIAD conçu a été testé sur des données réelles avec différents paramètres afin de garantir leurs pertinences et leurs robustesses et son utilisation expérimentale avec des décideurs est imminente. Notre vision s'oriente vers un élargissement de l'horizon décisionnel de quelques semaines (court terme) à un an (moyen terme) grâce à certaines modifications du modèle de simulation.

Le couplage entre le modèle de simulation traitant la planification de l'extraction des couches sources en amont de la chaîne et le modèle d'optimisation du Blending dynamique en aval portant sur la constitution des mélanges des couches sources extraites afin de répondre à la demande en qualités marchandes fait également partie de nos perspectives ; cela permettra aux utilisateurs de disposer de plusieurs scénarios prenant en compte à la fois l'aspect d'une planification efficace et efficiente et sa faisabilité en termes de blending. Ceci conduit donc à une amélioration de la cohérence globale des décisions prises localement par différentes entités de la chaîne logistique et à une réponse à la demande connue ou prévue avec flexibilité et exactitude, tout en utilisant l'approche SIAD.

6 RÉFÉRENCES

- Antonio, C., Luca, R., (2013) CLASS: a SIAD for the analysis and the simulation of urban freight Systems. *Transportation Research Procedia*.
- Azzamouri, A., (2018) Construction de méthodes et d'outils de planification pour l'industrie minière du phosphate en contexte de Lean Management. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre (France).
- Azzamouri, A., Giard, V., (2018) Dynamic blending as a source of flexibility and efficiency in managing a phosphate supply chain , *7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference 2018, July 8-11, Lyon, France*.
- Azzamouri, A., Fénies, P., Fontane, F., Giard, V., (2018) Scheduling of open-pit phosphate mine, *International journal of production research* 56(23), 7122-7141.
- Bhargava, H. K., Power, D. J., Sun, D., (2007) Progress in Web-based decision support technologies, *Decision Support Systems* 43(3), 1083-1095.
- Camargo, L.F.R., Rodrigues, L.H., Lacerda, D.P., Piran, F.S., (2018) A method for integrated process simulation in the mining industry, *European Journal of Operational Research*.
- Eom, S., Kim, E.,(2006) A Survey of Decision Support System Applications , *Journal of the Operational Research Society*.
- F. Galasso , C. Mercé & B. Grabot, (2009) Decision support framework for supply chain planning with flexible demand, *International Journal of Production Research*.
- Fanti, M.P., Iacobellis, G., Ukovich, W., Boschian, V., Georgoulas, G., Stylios, C., (2015) A simulation based Decision Support System for logistics management. *Journal of Computational Science*.
- Freed, T., Doerr, K.H., Chang, T., (2007) In-house development of scheduling decision support systems: case study for scheduling semiconductor device test operations, *International Journal of Production Research*.
- Gorry, G., Morton, M., (1989) A framework for management information systems, *Sloan Management Review* 30(3), 49-61
- Heilala, J., Montonen, J., Jarvinen, P., Kivikunnas, S., Maantila, M., Sillanpaa, J., Jokinen, T., (2010) Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning, in: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*.
- Keen, P., Scott Morton, M., (1978) Decision Support Systems: An Organizational Perspective, *Addison-Wesley Publishing, Reading*.
- Keskinocak, P., Wu, F., Goodwin, R., Murthy, S., Akkiraju, R., Kumaran, S., Derebail, A., (2002) Scheduling Solutions for the Paper Industry, *Operations Research*.
- Krishna, L., Janardhan, G., Rao, C., (2009) Web Integrated Decision Support System for Machine Scheduling and Inventory Management, *Operations Management Journal*.
- Krishnaiyer, K., Chen, F.F., (2017) Web-based Visual Decision Support System (WVSIAD) for letter shop, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.
- M.P. Fanti a., G. Iacobellis a, W. Ukovich b, V. Boschian b, G. Georgoulas c, C. Stylios, (2015) A simulation based Decision Support System for logistics management, *Journal of Computational Science*.
- Power, D. J., Sharda, R., (2007) Model-Driven Decision Support Systems: Concepts and Research Directions, *Decision Support Systems* 43(3), 1044–1061.
- Sharma, R.N., Chand, N., Sharma, V., Yadav, D., (2015) Decision support system for operation, scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Shim, J., Warkentin, M., Courtney, J., Power, D., Sharda, R., & Carlsson, C., (2002) Past, present, and future of decision support technology, *Decision Support Systems* 33, 111 –126.
- Tang, L., Liu, G, n.d , (2007) A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex .