

Gestion des ressources en terre et informatique

Jean-François Bouchind'homme¹.

Introduction

La gestion des ressources en terre a pour objectif d'assurer, au meilleur coût, un approvisionnement régulier en matière première, à partir de substances minérales réparties de manière irrégulière au sein d'un sous-sol opaque. Elle couvre toute une série d'opérations allant du renouvellement des réserves par prospection jusqu'à l'élaboration d'un produit par mélange en cours d'exploitation. En mine ou en carrière, la plupart des décisions d'extraction sont prises sur des ressources encore en terre en fonction d'une connaissance du gisement imparfaite car bâtie sur des données éparses.

La gestion des ressources en terre est consommatrice d'informatique, tant pour la mémorisation de données collectées sur le terrain que pour leur traitement : modélisation du gisement, aide à la décision avant extraction. Ce mariage entre l'informatique et la gestion des ressources en terre est né dans les années 60 et 70 notamment à la suite des travaux du professeur G. Mathéron sur l'estimation des gisements et le paramétrage des réserves. Depuis, cet effort d'innovation est retombé avec l'oubli du caractère stratégique de la ressource dans un contexte économique ouvert proposant des matières premières à bon marché.

En 2007, beaucoup de ces techniques pourraient prochainement revoir le jour vu la demande accrue en matières premières. Pour cela, il faudrait que les exploitants arrivent à développer sur site l'usage opérationnel de moyens informatiques réellement adaptés à leur métier. L'informatique doit donc être démystifiée et vue comme un produit destiné à répondre à des besoins clairement exprimés au même titre qu'un camion ou une chargeuse.

Objectifs et méthodes de la gestion des ressources en terre

Le rôle de la gestion des ressources en terre est de ménager un accès permanent à des volumes économiquement exploitables de manière à approvisionner régulièrement une ou plusieurs unités de production avec une matière première ayant la qualité requise.

La gestion des ressources en terre doit concilier deux objectifs :

- un objectif économique : sélectionner les parties

suffisamment riches du gisement ;

- un objectif industriel : planifier l'ordre d'extraction pour assurer une qualité régulière.

Elle gère un processus de décision à long terme car, en général, la production doit être préparée à l'avance par des travaux d'accès souvent longs et coûteux (découverte, galeries, reconnaissance, etc.). Un effort immédiat se traduira donc pas un profit différé, ce qui n'est pas toujours pour plaire à des investisseurs désireux de profits à court terme. Elle se base sur une connaissance très lacunaire du gisement. Le géologue qui gère une ressource doit donc raisonner sur des modèles, en n'oubliant pas qu'un modèle n'est qu'un substitut imparfait à une réalité. Il veillera donc à ne pas utiliser ce modèle pour des actions non adaptées à la connaissance réelle du gisement et devra hiérarchiser son processus de décision en fonction des niveaux d'information disponibles.

La gestion des ressources en terre couvre toutes les opérations stratégiques afférant à l'industrie minière :

- la prospection de nouveaux gisements qui renouvelle les réserves ;
- l'élaboration de projets d'exploitation selon des critères économiques ;
- la planification d'exploitation qui programme l'accessibilité aux différentes qualités ;
- la conduite d'exploitation qui fabrique des produits par mélanges entre fronts et stocks.

Informatique et gestion des ressources de 1960 à 2006

Dans les années 60 et 70, l'informatique se confine, dans des centres de calcul, à des usages bien déterminés : comptabilité de grands groupes, conception assistée par ordinateur de pièces mécaniques, recherche théorique, débuts de l'informatique industrielle. Elle n'est pas vue comme une industrie à part entière mais comme un outil d'appoint pour d'autres secteurs d'activité. L'informatique dite « minière » reste alors bien confidentielle en raison du coût prohibitif des matériels mais, c'est pourtant à cette époque que sont nés la plupart des algorithmes miniers qui permettront bientôt d'optimiser et de planifier des exploitations sur des modèles de gisement.

Or, tout modèle numérique, même élaboré selon

1. CORALIS - BP 90024 - 13 791 Aix en Provence CEDEX 3 / e-mail : info@coralis.com

une méthode bien adaptée, ne vaut que par sa capacité à pouvoir être validé *a posteriori* sur des résultats d'exploitation réels. On l'oublie parfois, mais cette validation *a posteriori* sur le réel est un des piliers de la géostatistique ainsi que l'a toujours clairement énoncé son créateur, le professeur G. Matheron. C'est sur ce point qu'au début des années 80, la **microinformatique**, alors en plein essor, promettait d'être déterminante par sa capacité à pouvoir être délocalisée sur le terrain. Implanté directement sur l'exploitation, le microordinateur était l'outil idéal non seulement pour aider le mineur à sélectionner les fronts à exploiter, mais aussi pour permettre au géologue de valider ses modèles en confrontant sur le terrain ses estimations aux résultats de production.

Depuis, il semble que ce rôle de l'informatique pressenti comme prépondérant pour la gestion des ressources en terre ait mal supporté la crise des matières premières de ces 20 dernières années. Certes, l'explosion de l'industrie informatique a largement répandu l'usage de divers outils informatiques en exploitation et en exploration : « *Global Positioning System* » (GPS), diagraphies, télédétection, aide à la collecte des données, dessin cartographique et géologique assisté par ordinateur, etc. Mais, s'il est question d'informatique, peut-on pour autant parler de gestion des ressources sur une période marquée par des mécanismes économiques à court terme et une segmentation en centres de profit alors qu'une ressource stratégique se gère à long terme dans un contexte industriel intégré verticalement ?

En 2007, l'outil informatique n'est plus vu comme l'auxiliaire d'un géologue minier compétent oeuvrant au plus près du terrain. Les systèmes de management actuels sont très centralisés et, de ce fait, les capacités d'action et de validation méthodologique sur le terrain sont souvent plus réduites qu'en 1980. Il s'agit d'une tendance d'autant plus inquiétante qu'elle s'accompagne d'une certaine prédilection pour des logiciels à fonctionnement opaque difficiles à caler sur la réalité d'une exploitation. Néanmoins, cette tendance pourrait s'inverser si l'augmentation durable des besoins en matière première se double d'une réelle volonté d'efficacité de la part des opérateurs miniers.

Actuellement, pour ce qui est du domaine minier, l'accès aux ressources préoccupe surtout les chinois, les brésiliens, les indiens et les russes. En France, la motivation pour la gestion des ressources se retrouve plutôt chez les producteurs de matériaux de carrière tributaires de gisements proches des installations et confrontés à des difficultés pour obtenir des autorisations d'exploitation.

Les besoins en gestion de données, calcul et imagerie numérique

La gestion des ressources requiert trois catégories de fonctions assurant respectivement :

- la gestion des données de reconnaissance et des résultats d'exploitation ;
- la modélisation du gisement ;
- l'aide aux décisions d'exploitation.

La **gestion des données** doit prendre en compte non seulement une durée d'archivage importante entre la collecte des données et leur utilisation, mais aussi la grande diversité des données à traiter : reconnaissance de terrain, résultats de production localisés, divers logs de sondage.

La **modélisation** repose sur des méthodes d'estimation pour lesquelles l'informatique apporte une aide décisive notamment pour le calcul automatique des modèles numériques krigés². On notera que la qualité d'une modélisation numérique tient non seulement à l'algorithme utilisé, mais aussi aux facilités de remise en cause en fonction d'une réalité qui se dévoile peu à peu au cours de la prospection et de l'exploitation.

L'informatique est **une aide aux décisions** d'exploitation en ce sens qu'elle permet d'anticiper ces décisions sur modèle numérique de façon à en estimer par avance les effets. Quand on procède par tâtonnement on parle de *simulation*. Si les choix sont trop multiples pour être maîtrisés par le raisonnement humain, on parle d'*optimisation automatique*.

L'informatique en prospection

Stratégie et techniques de prospection

Les projets de campagne de prospection sont élaborés sur la base de deux synthèses indépendantes :

- le **modèle géologique**, qui permet d'inférer *a priori* les caractéristiques d'une nouvelle découverte (géométrie, teneurs, réserves possibles) ;
- l'**étude de cible**, qui fait la synthèse des objectifs de l'entreprise et des contraintes liées au contexte (politique, accès, environnement, foncier, marché, etc.).

Les opérations de prospection pouvant s'étaler sur plusieurs années avec de longues interruptions et de fréquents changements d'équipe, l'apport de l'informatique dans la prospection des gisements réside essentiellement dans la mémorisation de l'information et dans la préservation de l'expérience, campagne après campagne, sur un territoire donné. L'information devant être localisée

2. Le krigage a été inventé par le professeur Georges Matheron pour répondre spécifiquement au problème du découpage d'un gisement par une exploitation.

dans l'espace, on fera appel à des systèmes d'information géographique, soit généralistes, soit spécialisés en prospection géochimique, prospection foncière, cartographie géologique, etc.

La plupart des équipes d'exploration dépendant de grands groupes industriels ont disparu dans les années 80, avant d'avoir pu bénéficier pleinement de l'apport informatique.

Dans les pays anglo-saxons, la prospection minière est devenue l'apanage d'entreprises de petite taille opérant dans le but de revendre les découvertes éventuelles à des groupes miniers et ne s'apparente donc plus guère à la gestion des ressources. Néanmoins, les actions développées dans ce contexte ont fortement bénéficié des progrès de l'informatique pour tout ce qui est des techniques de recueil des données sur le terrain : géochimie, géophysique, diagraphies, topographie, etc. Enfin, le réseau Internet permet maintenant d'accéder facilement à diverses images du sol (photos-satellites), à des cartes thématiques, et à une large bibliographie de qualité inégale.

En France, le secteur minier tarde à sortir de sa torpeur et le secteur des carrières (minéraux industriels, matériaux de construction) est traditionnellement moins enclin à investir dans la prospection faute de protection juridique pour le découvreur d'un gisement de matériau non concessible. Néanmoins, pour répondre à une demande en hausse, et en raison de contraintes réglementaires grandissantes, la prospection de nouveaux sites a tendance à se développer. Le recours à l'informatique géographique, d'abord limité aux aspects fonciers, est maintenant étendu aux aspects paysagers, réglementaires, géologiques, etc. (Fig. 1).

La gestion des données en sondage

Les règles de reconnaissance d'un gisement, bien que rarement respectées, sont simples :

- le gisement doit être reconnu de manière uniforme ;
- il doit être fermé par les sondages (c'est-à-dire reconnu un peu au-delà de ses limites) ;
- la géométrie de la reconnaissance doit s'adapter à celle du gisement ;
- les variables recueillies doivent être additives, utiles au regard d'une future exploitation et stables dans le temps ;
- les échantillons (carottes de sondage, géochimie) doivent être préservés.

Le traitement informatique assurera en routine les fonctions suivantes :

- la saisie et le recueil d'informations d'origines diverses disponibles de manière décalée dans le temps : coordonnées provisoires au stade du projet, données de foration et logs lithologiques au stade « réalisation », analyses au stade « retour de laboratoire » ;
- la détection des lacunes d'information et des anomalies ;
- les calculs statistiques courants sur sondages ;
- la localisation géographique interactive des données de sondage.

Les évaluations en cours de prospection

Au stade de la prospection, l'informatique intervient également pour des évaluations préliminaires chiffrées. Les méthodes d'estimation utilisées alors relèvent de la géostatistique. Ces évaluations, non liées à un projet d'exploitation, ont deux usages possibles :

- comparer l'intérêt relatif de plusieurs cibles de prospection sans perturber cette comparaison par le choix de méthodes d'exploitation impliquant différents taux de récupération ;
- établir des valeurs de négociation pour des cessions de droits sur un gisement ou sur une perspective de gisement à divers stades de reconnaissance.

Elles déterminent un classement des ressources sur différentes cibles de prospection. Le classement des ressources est parfois sujet à controverse entre les géologues anglo-saxons pour lesquels les « ressources » caractérisent intrinsèquement la concentration minérale et les géologues français pour lesquels le classement des ressources ne repose que sur des conventions (coupure, support de sélection) propres à chaque groupe minier.

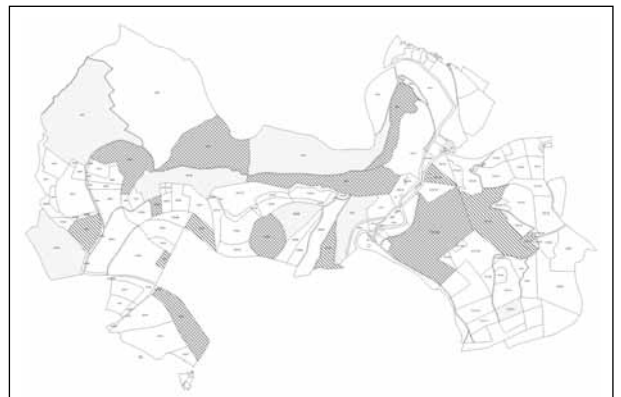
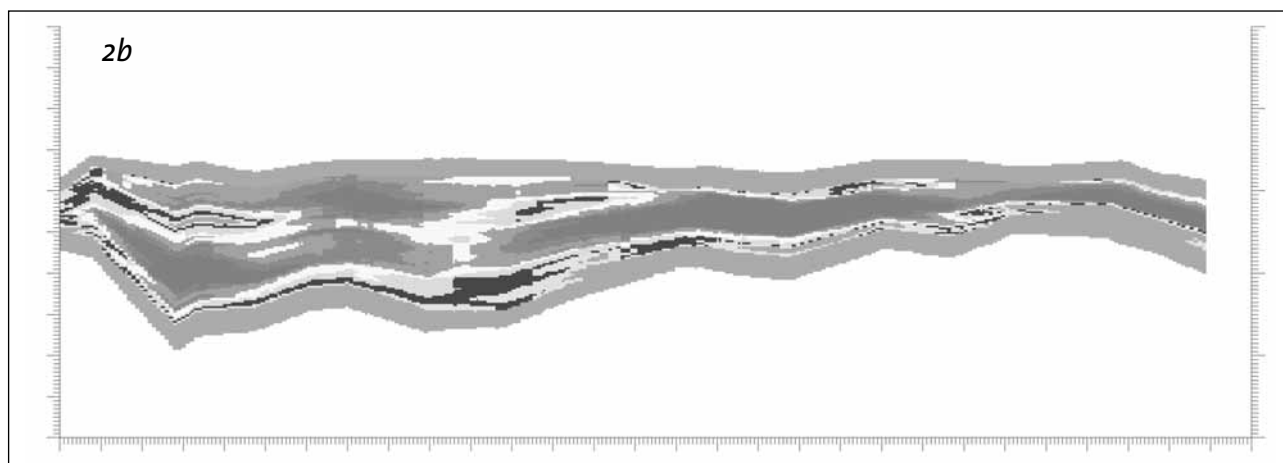
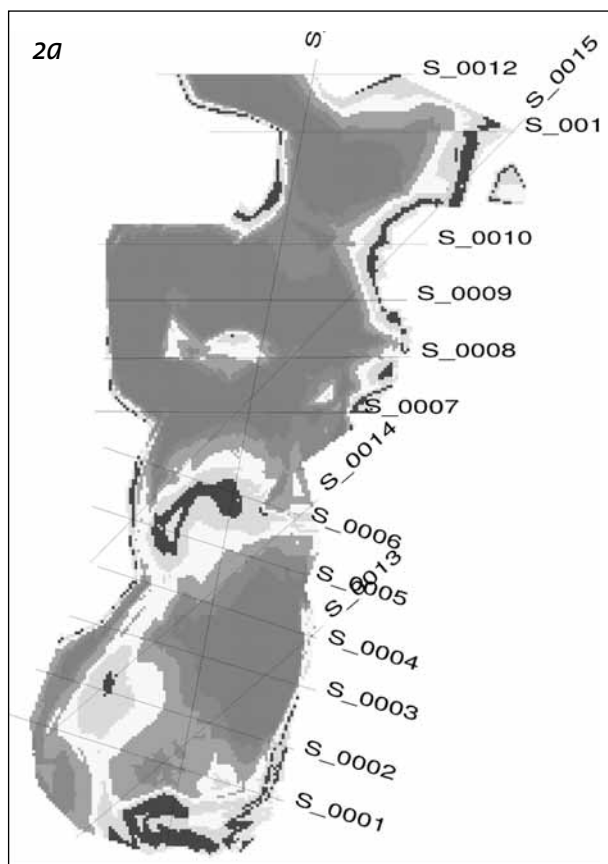


Figure 1. Plan de maîtrise foncière en prospection « carrière »

L'informatique pour les projets d'exploitation

Le modèle numérique de gisement

Un modèle numérique de gisement est un réseau à 3 dimensions de blocs réguliers. Chaque bloc est estimé par *krigeage*, c'est-à-dire par une moyenne pondérée bâtie



sur les teneurs de sondages situés dans un certain voisinage de ce bloc. Le calcul des pondérateurs de krigeage requiert un modèle variogramme c'est à dire une fonction traduisant, en moyenne sur le gisement, l'augmentation de l'écart de teneur entre deux points quand la distance qui les sépare augmente. Le krigeage est une méthode générale, mais sa mise en œuvre informatique doit tenir compte des spécificités géométriques propres à chaque gisement (Fig. 2).

En général, l'information disponible au stade du projet ne suffit en général pas pour sélectionner de manière définitive les minerais récupérables sur le gisement. Dans ce cas, l'estimation des teneurs *in situ* n'a aucun intérêt. On estimera donc des fonctions de récupération qui mesurent le minerai qui sera récupéré à l'issue des sélections qui s'opéreront en cours d'exploitation, sur la base d'une information future beaucoup plus riche : sondages de pré-exploitation, trous de tir, observations en front de taille, etc.

Ces fonctions de récupération sont calculées grâce à un modèle *minier* déduit de comparaisons estimé/exploité réalisées sur des gisements de référence déjà exploités selon une méthode de sélection bien stabilisée. Les grosses erreurs d'estimation sont plus souvent dues à la mauvaise appréciation d'un modèle minier qu'à un mauvais choix de variogramme.

Les spécificités liées à la géométrie du gisement et à la manière de l'exploiter font que chaque modèle numérique constitue un cas particulier qui a peu de chance d'être traité correctement par un logiciel existant. En général, il faut avoir recours à de la programmation et, seul un géologue spécialisé en informatique minière, est en mesure de réaliser ce type de travail.

En bureau d'études, le modèle numérique de

Figure 2. Sections horizontale (2a) et verticale (2b) dans un modèle krige.

gisement est destiné à deux usages :

- l'optimisation économique qui détermine l'enveloppe globale à exploiter ;
- la programmation d'exploitation qui détermine un ordre d'extraction au sein de cette enveloppe.

L'optimisation économique du projet d'exploitation

A priori, le volume retenu pour l'exploitation est formé de l'ensemble des blocs du modèle numérique pourvus d'une valeur économique positive. Néanmoins, deux facteurs compliquent cette analyse :

- l'extraction d'un bloc n'est pas indépendante de celle des blocs qui l'entourent. Ainsi, à ciel ouvert, on ne peut extraire un bloc que si on a extrait le cône inversé qui le surplombe ;
- la valeur économique d'un bloc dépend à la fois du prix unitaire de la substance valorisée et des coûts unitaires d'extraction et de traitement. Or, ces coûts dépendent eux-mêmes de la taille de l'unité de production qui sera retenue. On doit donc dimensionner conjointement le volume à exploiter et l'unité de production à mettre en place.

C'est encore à G. Matheron que l'on doit la formalisation de l'optimisation économique des projets d'exploitation et le développement des méthodes relevant du paramétrage des réserves notamment à ciel ouvert. Pour le moment, ces méthodes ne sont guère implantées ni dans le secteur minier anglo-saxon, ni dans les carrières de substances utiles en France. Pourtant, même pour les granulats, les enjeux économiques liés aux limites d'exploitation en termes de qualité et de ratio de découverte ne semblent pas négligeables.



Figure 3. Projet de fosse généré par conception assistée par ordinateur de terrassement.

Sur le plan informatique, un large éventail d'algorithmes existe ; les plus légers fournissent une simple assistance aux choix de l'opérateur ; les plus lourds calculent directement des projets optimaux comme c'est le cas pour l'« emblématique optimisation de carrière à trois dimensions ». Une optimisation automatique ne fournit qu'un ordre de grandeur et une esquisse grossière pour le projet (Fig. 3).

Pour générer un projet réaliste, il faut corriger cette esquisse en utilisant des logiciels plus graphiques et plus interactifs. On intègre alors des facteurs également déterminants tels que les aspects réglementaires, fonciers, paysagers, le réaménagement, le stockage des stériles, le roulage, etc. Or, un modèle numérique en blocs estimés n'est pas conçu pour enregistrer des projets réalistes, surtout dans les cas à ciel ouvert qui requièrent de maîtriser des pentes de talus, des géométries en gradins, et des pistes d'accès. L'opérateur travaillera donc sur des modèles topographiques qu'il va retailer grâce à des logiciels de conception assistée par ordinateur de terrassement.

Le modèle topographique et le modèle de gisement sont interfacés aux travers de fonctions telles que : le guidage de l'opérateur par des sections sur le gisement, le calcul des quantités et qualités entre deux situations topographiques, l'édition de cartes d'affleurement du gisement sur la topographie, etc.

Le dépôt des dossiers

Outre les diverses demandes de financement, tout projet impose le dépôt d'un dossier de demande d'autorisation. Un tel dossier ne requiert pas de logiciels spécifiques :

- les aspects fonciers découlent de la prospection foncière ;
- les garanties financières sont calculées sur le projet ;
- le projet de réhabilitation est élaboré en continuité avec le projet d'exploitation ;
- les SIG et les logiciels paysagers décrivent l'évolution du site.

Toutefois, la qualité des documents graphiques est importante et peut influencer sur les choix de l'administration.

La planification d'exploitation

L'objectif est d'ordonner la mise en exploitation du volume à exploiter de façon à ce que la gamme des qualités géologiques requises pour assurer les productions prévues soit accessible avec les moyens prévus durant toute la vie de l'exploitation. La planification d'exploitation prend en charge la régulation du roulage et plus

généralement tous les aspects liés aux déplacements de matériaux, avec d'éventuels dépôts et reprises.

Un logiciel de conception assistée par ordinateur de terrassements interfacé à un modèle de gisement permet de définir la séquence d'exploitation à condition de procéder méthodiquement dans le cadre d'une stratégie générale d'exploitation tenant compte des particularités géométriques du gisement.

La notion d'optimisation d'une séquence d'exploitation n'a guère de sens, mais il existe des algorithmes d'aide à la planification dérivés du paramétrage des réserves : le principe consiste à maintenir, dans un espace « tonnage à extraire / métal récupéré » un écart suffisant entre le programme d'exploitation et la courbe donnant le tonnage maximum de métal en fonction du tonnage extrait (Fig. 4).

La mise en œuvre de tels algorithmes fait appel à des partitions³ du plan en tranches d'exploitation. La planification d'exploitation assistée se fait soit à 2 dimensions par interfaçage direct de la partition et du modèle géologique, soit à 3 dimensions en couplant la partition avec les algorithmes de conception assistée par ordinateur de terrassement.

L'informatique en cours d'exploitation

Du bureau d'études à l'exploitation

Au démarrage de l'exploitation, la récupération du gisement n'est pas toujours conforme aux prévisions et les actions sur les terrains s'écartent parfois très vite du scénario préparé en bureau d'études. Le projet d'exploitation n'est plus alors le guide à long terme requis pour assurer une production régulière sur toute la vie de l'exploitation.

Ce constat est l'acte de naissance de l'informatique

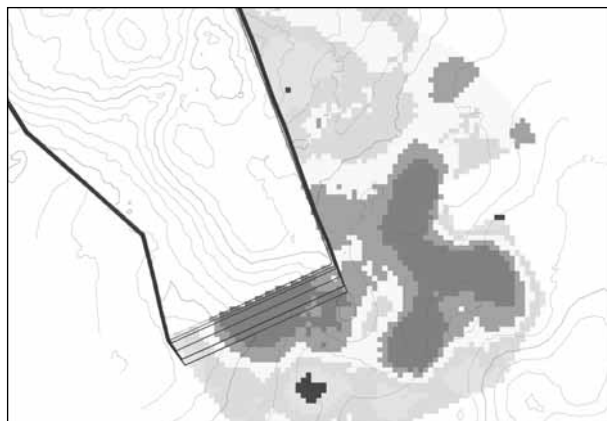


Figure 4. Planification par couplage d'une partition avec la conception assistée par ordinateur de terrassement.

minière au début des années 80. Les logiciels de modélisation de gisement et de planification d'exploitation, jusqu'alors confinés au bureau d'études qui les a développés sont transposés sur le site d'exploitation afin de permettre au géologue minier de réactualiser périodiquement le projet à long terme en fonction de la réalité. La première réalisation de ce type⁴ faisant suite à une étude de projet par une ingénierie française remonte à 1981.

L'informatique devient alors l'outil qui aide le géologue minier à assurer les trois fonctions suivantes :

- la collecte des données d'exploitation ;
- le pilotage de la qualité ;
- le suivi des réserves.

Le passage d'une informatique de bureau d'études à une informatique de terrain ne s'est pas fait sans difficultés compte tenu d'une différence de contexte radicale (voir tableau ci-après).

La collecte des données d'exploitation

Sur une exploitation, on distingue trois catégories de données :

- les données de pré-exploitation acquises avant extraction ;
- la situation de l'avancement ;
- les résultats de production.

Les données de pré-exploitation sont les données des sondages de pré-exploitation, les analyses sur trous de tir, les observations et échantillonnages à front. Après traitement (krigeage par exemple), elles permettront d'affiner la sélection du gisement avant extraction, dans le cadre du pilotage de la qualité.

L'avancement de l'exploitation est le plus souvent enregistré sous la forme d'un modèle topographique.

Les résultats de production n'ont d'intérêt que s'ils peuvent être localisés géographiquement sur le chantier. Or, il n'est pas toujours facile d'affecter la qualité produite sur une période à une zone du gisement car les produits extraits sont souvent analysés après mélange entre fronts. Des outils informatiques spécialisés peuvent aider le géologue minier à résoudre ces problèmes de traçabilité. Le plus souvent la localisation des résultats de production sur le chantier est assurée par des partitions (ex : partition des productions mensuelles par gradins, Fig. 5).

Ces résultats de production, localisés géographiquement, permettent d'effectuer des comparaisons estimé / exploité qui sont au cœur du processus d'amélioration des méthodes d'estimation, mais également des méthodes de sélection du minerai.

3. Une partition est un découpage du plan tel que chaque point du plan appartient à un élément de la partition et à un seul. Une carte géologique, un plan d'occupation du sol, un plan cadastral, un plan d'avancement mensuel sont des partitions.

4. Travaux de Ph. Jacquin (SOGEREM) sur les bauxites du Panchpatmali en Inde.

	Bureau d'études		Terrain	
	Besoin	Outil	Besoin	Outil
Données	Données de sondage limitées et évoluant peu, mais étude de gisements différents.	Fonctions de gestion réduites mais structures de données paramétrables	Données variées, volumineuses, et en évolution rapide sur un seul gisement.	Fonctions de gestion étendues sur des structures de données figées.
Modélisation	Connaître tonnages, qualités et teneurs récupérables selon des variantes d'exploitation.	Estimation du récupérable ; modélisation du gisement et de la sélection future.	Connaître la qualité et les teneurs d'un volume à extraire.	Estimation directe du contenu local du gisement.
Validation	Validation impossible sur les résultats d'exploitation. Exploiter au mieux les sondages.	Outils d'analyse sur sondages : analyse structurale, techniques d'occultation, etc.	Validation directe et immédiate sur les résultats d'exploitation.	Gestion <i>in situ</i> de la production pour comparaisons prévu/réalisé.
Décisions	Beaucoup de variantes à étudier, peu de contraintes a priori.	Outil d'optimisation puissant pouvant traiter automatiquement un grand nombre de solutions.	Beaucoup de contraintes limitant les choix possibles.	Outil interactif visuel permettant une simulation réaliste des actions envisagées.
Utilisateurs	Connaissance ouverte des gisements et des stratégies d'exploitation.	Outils spécialisés dans les différentes techniques requises pour les études.	Connaissance du gisement et de son exploitation.	Outil intégré couvrant en temps réel une large gamme d'opérations.

Le pilotage de la production

Le pilotage de la production gère l'extraction et le roulage de manière à générer des flux de qualité régulière au sortir de l'exploitation. Le géologue sélectionne les fronts à exploiter afin de produire la qualité désirée en utilisant un modèle numérique de gisement bâti sur les dernières données disponibles et en respectant les coupures garantant de la préservation des réserves. L'accessibilité des qualités géologiques requises pour faire les productions en différents produits marchands est garantie, en principe, par la planification d'exploitation. De plus, le pilotage de la production est facilité par des stocks tampon ou des stocks d'homogénéisation.

Sur les mines importantes, le pilotage de la production est souvent très automatisé, parfois un peu trop.

Les aspects purement informatiques deviennent alors prépondérants : communications, réseaux, localisation des engins, etc.

Le suivi des réserves

Le suivi des réserves consiste essentiellement à refaire périodiquement une planification d'exploitation jusqu'à la fin de l'exploitation en se basant sur une connaissance actualisée du gisement et en prenant en compte des contraintes et des objectifs parfois nouveaux.

L'outil informatique utilisé est hérité directement de l'outil conçu en bureau d'études pour le projet initial.

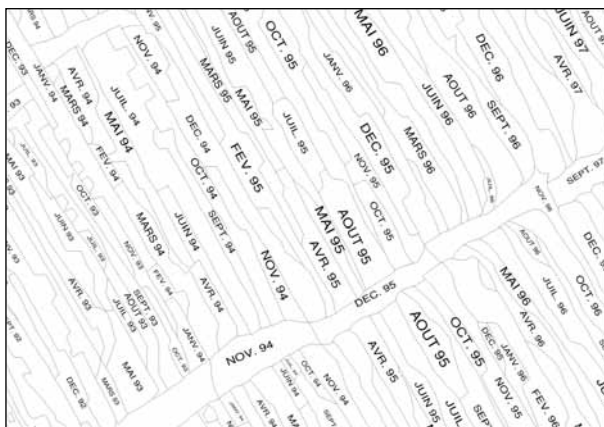


Figure 5. Partition des productions mensuelles sur une couche unique.