



**HAL**  
open science

# ÉTUDE DES TECHNIQUES UTILISÉES DANS LE CADRE DE LA MISE EN VALEUR D'UN GISEMENT A CIEL OUVERT

François Geffroy

► **To cite this version:**

François Geffroy. ÉTUDE DES TECHNIQUES UTILISÉES DANS LE CADRE DE LA MISE EN VALEUR D'UN GISEMENT A CIEL OUVERT. 2007. hal-00595354

**HAL Id: hal-00595354**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00595354>**

Submitted on 24 May 2011

**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.



**RAPPORT D'OPTION**

**ETUDE DES TECHNIQUES UTILISEES DANS LE CADRE DE LA  
MISE EN VALEUR D'UN GISEMENT A CIEL OUVERT**

**François GEFROY**

## RESUME

On décrit dans ce rapport, après une comparaison entre les logiciels Surpac et Whittle, deux méthodes développées pour faciliter la mise en valeur de gisements métalliques à ciel ouvert.

-La première méthode vise à améliorer le transfert de données d'un logiciel à l'autre en permettant une modélisation aussi réaliste que possible du gisement sous Whittle

-La seconde méthode permet avec Whittle de tester différents scénarios d'exploitation de la fosse optimale calculée et de trouver les points d'attaque qui généreront la meilleure valeur actualisée nette.



## Remerciements :

Je tiens à remercier pour le présent rapport,

Juan Carlos Osorio, mon tuteur de stage chez Areva, pour son encadrement, son aide, sa disponibilité et sa bonne humeur,

Jean-Alain Fleurisson, mon tuteur école pour m'avoir accordé de son temps pour prendre en main et comprendre les logiciels utilisés,

Damien Goetz, pour son aide, ses conseils, pour avoir trouvé ce stage et pour tous les enseignements d'option en général,

Gwenaëlle Petit, Olivier Masset, Eléonore Dalmais, Anne Dubille-Auchère, Valérie Langlais, Abdelghani Kheloufi et Claude Demange du SER d'Areva, Jean-Michel Menanteau et Patrick Perez du service technique, pour leur aide et leur disponibilité.

Le Centre de géoscience, pour la mise à disposition de ses locaux, de son matériel et de ses logiciels.

L'école des Mines de Paris, pour tous les enseignements que j'y ai suivis et qui m'ont servi pour ce travail d'option.

Areva, pour la liberté de travail que j'ai eue, autant dans l'accès aux données que dans les choix que j'ai faits.

Enfin, ma famille et mes amis pour leur soutien pendant toute la période du stage.

## Introduction

Leader mondial du cycle du nucléaire, Areva est spécialisé dans l'ensemble des activités industrielles du secteur, depuis l'amont (l'exploration et l'exploitation de gisements d'uranium) jusqu'à l'aval (le retraitement du combustible usé). Sur la phase amont, Areva est engagée dans des projets et des exploitations de gisements de nature très différentes, faisant appel à des techniques très variées : lixiviation in situ pour les gisements de type Roll Front au Kazakhstan, exploitation à distance à l'aide de jets d'eau à haute pression pour les gisements très riches du Canada, techniques minières classiques, en souterrain ou à ciel ouvert, pour les gisements du Niger.

Dans le cas des exploitations classiques à ciel ouvert, l'optimisation de la fosse, qui a pour objectif de concevoir une fosse permettant à la fois une très bonne récupération du gisement et un coût du métal extrait aussi faible que possible, est un des éléments essentiels de l'étude de faisabilité. Cette optimisation est réalisée à l'aide de logiciels spécifiques. Ceux-ci calculent la fosse qui sera économiquement la plus rentable (c'est-à-dire dont la valeur actualisée nette sera maximale) en fonction des données du gisement (enveloppe géométrique du gisement, teneurs, répartition des teneurs au sein de cette enveloppe, ...), de données économiques (coûts unitaires des opérations d'extraction, coûts de traitement du minerai, prix du métal, ...) et de données techniques (pentes maximales assurant la stabilité de la fosse, rendement des usines, dilution lors de l'extraction, ...).

Depuis 2003, le prix de l'uranium a été multiplié par 12, la livre de « yellow cake » (oxyde d'uranium  $U_3O_8$ ) passant de 10\$ à 125\$ en à peu près 4 ans. Les réserves accumulées par les entreprises du domaine du nucléaire, la quasi absence de campagnes d'exploration, l'épuisement des réserves d'uranium militaire, et l'utilisation pendant de nombreuses années de combustible recyclé étaient des causes d'un prix très bas. La fin de ces conditions peut expliquer une telle hausse. Cette augmentation du prix a relancé les politiques d'exploration et d'exploitation de toutes les entreprises du cycle de l'uranium. Areva souhaite développer sa production afin de doubler la quantité d'uranium produite d'ici à 2010. Parmi ses permis d'exploitation, Areva possède le gisement d'Imouraren au Niger, qui était jusqu'à présent trop pauvre pour être exploité mais est devenu rentable grâce à l'augmentation des prix. Ce gisement, par sa teneur particulièrement basse a fait émerger différentes problématiques liées au calcul de la fosse optimale, notamment à cause du fait qu'un nouveau type de traitement du minerai pauvre est envisagé : la lixiviation en tas. Areva n'ayant jusqu'à présent exploité que des gisements plus riches (à ciel ouvert ou en souterrain), les calculs de rentabilité s'inscrivant dans l'étude de préfaisabilité de ce gisement nécessitent des outils nouveaux pour obtenir une modélisation des coûts et bénéfices de la fosse potentielle aussi réalistes que possible.

La première partie de cette étude a consisté à comparer les performances des deux logiciels d'optimisation Surpac® et Whittle® afin de déterminer lequel est le plus adapté aux mines que possède Areva. Areva cherche en effet à limiter le passage d'un logiciel à l'autre dans ses étapes de calcul afin de supprimer des sources potentielles d'erreur, et à simplifier et automatiser ces passages quand ils sont nécessaires. La seconde partie de l'étude est

consacrée à l'analyse avec Whittle® de certains aspects de l'optimisation de la mine d'Imouraren, dont l'exploitation est prévue en 2010.

Seront abordés les problèmes liés à l'optimisation sous Whittle lorsque l'on est en présence de plusieurs méthodes de traitement de minerai, et la nécessité d'une coupure entre les deux types de traitement. Un second point porte sur l'étude du meilleur « point de départ » de la fosse précédemment calculée, permettant d'atteindre le minerai rapidement, tout en conservant un planning d'exploitation techniquement réalisable.



# **PREMIERE PARTIE : Cadre Général du travail d'option**

---

# 1 AREVA

---

## 1.1 Le groupe Areva

Avec un chiffre d'affaire de 10 863 M€ (+7.3% par rapport à 2005), une présence industrielle dans 41 pays et un réseau commercial couvrant plus de 100 pays, Areva est en 2006 le leader mondial de l'énergie nucléaire et le seul groupe présent dans l'ensemble des activités industrielles du secteur.

Areva se divise en 4 pôles couvrant l'ensemble du cycle de l'Uranium :

- Pôle amont : il permet de sécuriser l'approvisionnement des réacteurs nucléaires en développant des activités d'exploration et exploitation de mines d'Uranium, la conversion et l'enrichissement de celui-ci ainsi que la conception et la fabrication du combustible nucléaire.
- Pôle réacteurs et services : il contrôle entretient et modernise tous types de réacteurs nucléaires, se charge de la fabrication et du remplacement des composants lourds ainsi que de centrales nucléaires (dont l'EPR) et de centrales biomasse.
- Pôle Aval : il présente des solutions au traitement du combustible usé et au recyclage des matières valorisables (Plutonium, MOX), ou à leur stockage quand le retraitement n'est pas possible (pour les déchets ultimes par exemple). Il gère également le démantèlement des installations en fin de vie.
- Pôle transmission & distribution : Ce pôle est situé tout en aval de la chaîne, à l'étape de distribution de l'électricité. Il conçoit, fabrique et installe des équipements et systèmes de haute et moyenne tension ainsi que des systèmes de pilotage de réseaux électriques.

Au sein du pôle amont (constitué de l'ancienne société Cogema, renommée Areva NC) se trouve la Business Unit Mines (C.A. d'environ 515 M€ en 2006), chargée de l'ensemble des activités minières du groupe (exploration, planification, exploitation, réhabilitation). Ce travail d'option s'est déroulé en partie au sein du S.E.R. : le service des études et réserves

## 1.2 Le S.E.R.

Le Service des Etudes et Réserves de la Direction Technique de la Business Unit Mines est garant de l'évaluation et de la qualité des ressources et réserves minières du Groupe, en tonnage et en teneur, aussi bien pour l'or<sup>1</sup> que pour l'uranium.

Cette gestion comprend :

- l'estimation des ressources et réserves des projets miniers
- l'actualisation des potentiels existants, en fonction de l'évolution des paramètres technico-économiques
- le suivi des exploitations, avec comparaison réalisé/estimé

SER est amené soit à réaliser l'ensemble des estimations, soit à valider les évaluations effectuées par les équipes opérationnelles spécialisées dans chaque unité.

Les domaines d'intervention sont vastes depuis l'acquisition des données, les processus d'analyses, les sauvegardes et la gestion des données jusqu'aux techniques de modélisation et

---

<sup>1</sup> Areva possède encore quelques mines d'or pour des raisons historiques représentant environ 10% du chiffre d'affaires de la BUMines.

d'estimation les plus avancées. Parallèlement, il faut maintenir une étroite coordination avec les équipes chargées du développement et de l'exploitation sur le terrain.

## 2 Le gisement d'Imouraren

L'ensemble des calculs et les applications des outils développés durant le travail d'option ont été faits sur des données du gisement d'Imouraren, au Niger. Areva possède déjà deux gisements en exploitation à Arlit, Niger. Le premier exploité par Cominak est à une teneur de 3‰ en moyenne, exploité en souterrain. Le second gisement est exploité à ciel ouvert par Somaïr et possède une teneur moyenne de 2‰.

Le gisement d'Imouraren a une teneur moyenne de 0,74‰, on mesure donc la pauvreté relative du gisement (sachant que certains gisements au Canada possèdent des teneurs pouvant aller jusqu'à 20‰).

### 2.1 Situation et cadre géologique

Situé dans le département d'Arlit, le permis couvre une superficie de 313.5 km<sup>2</sup> (Cf. Figure 1).

Sur le permis de recherche d'Imouraren, la pile sédimentaire, appartenant au bassin sédimentaire de Tim Mersoï, s'étage depuis les séries grés-argileuses viséennes des groupes du Térađa et du Tagora communément dénommée Série grise, discordantes sur le socle précambrien, jusqu'aux sédiments argileux Crétacé Inférieur du Groupe de l'Irhazer (Cf. Figure 1 et Figure 2).

Le gisement d'Imouraren est situé dans une cuvette synforme en bordure de la flexure/faille d'Arlit dans les grès de la formation du Tchirezine 2, d'âge Jurassique supérieur, à une profondeur comprise entre 110 et 180 m. Le Tchirezine 2 repose sur les analcimolites de l'Abinky et est surmonté par les siltites de l'Assaouas, elles-mêmes recouvertes par les argilites de l'Irhazer. Les formations de l'Assaouas et de l'Irhazer sont d'âge Crétacé inférieur (Figure 3).

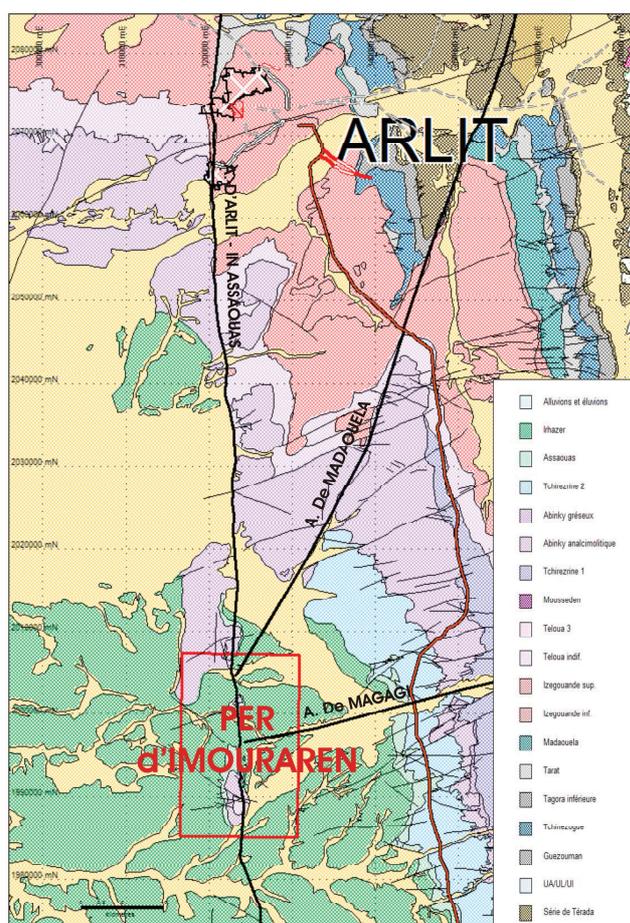


Figure 1: Carte de localisation du permis de recherche d'Imouraren.

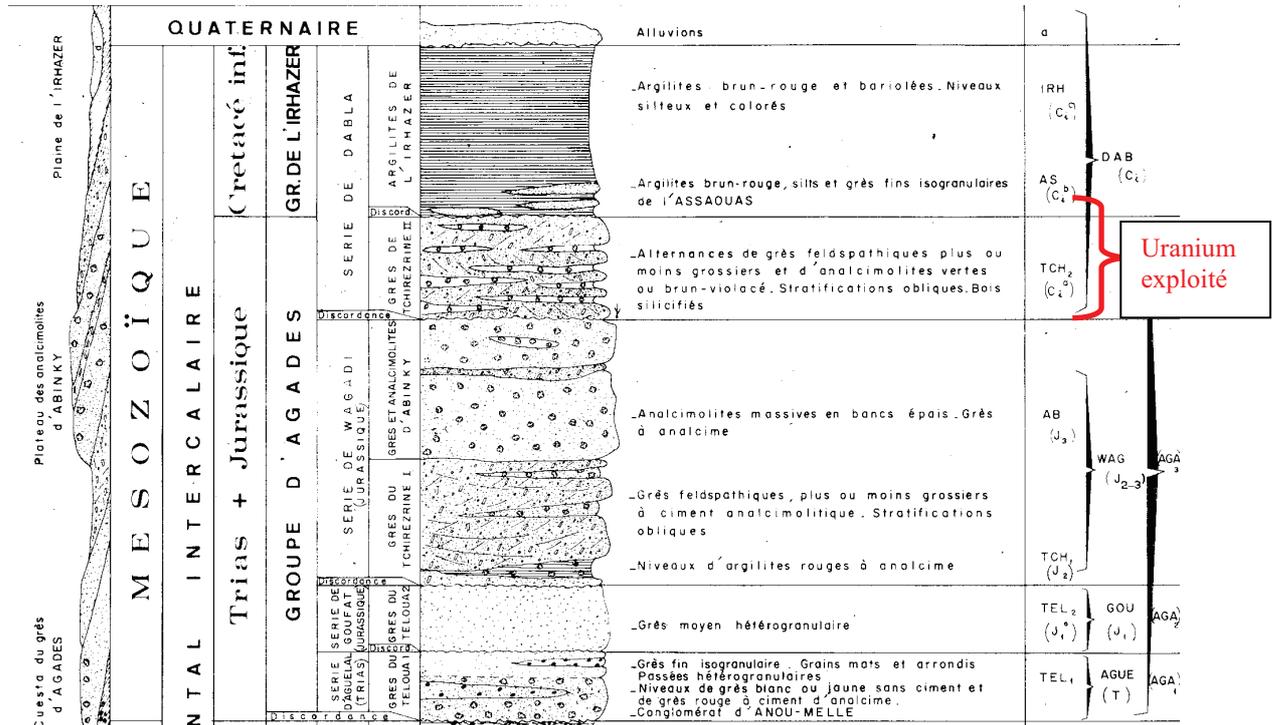


Figure 2 : Log synthétique de la pile sédimentaire. (au 1/200 000)

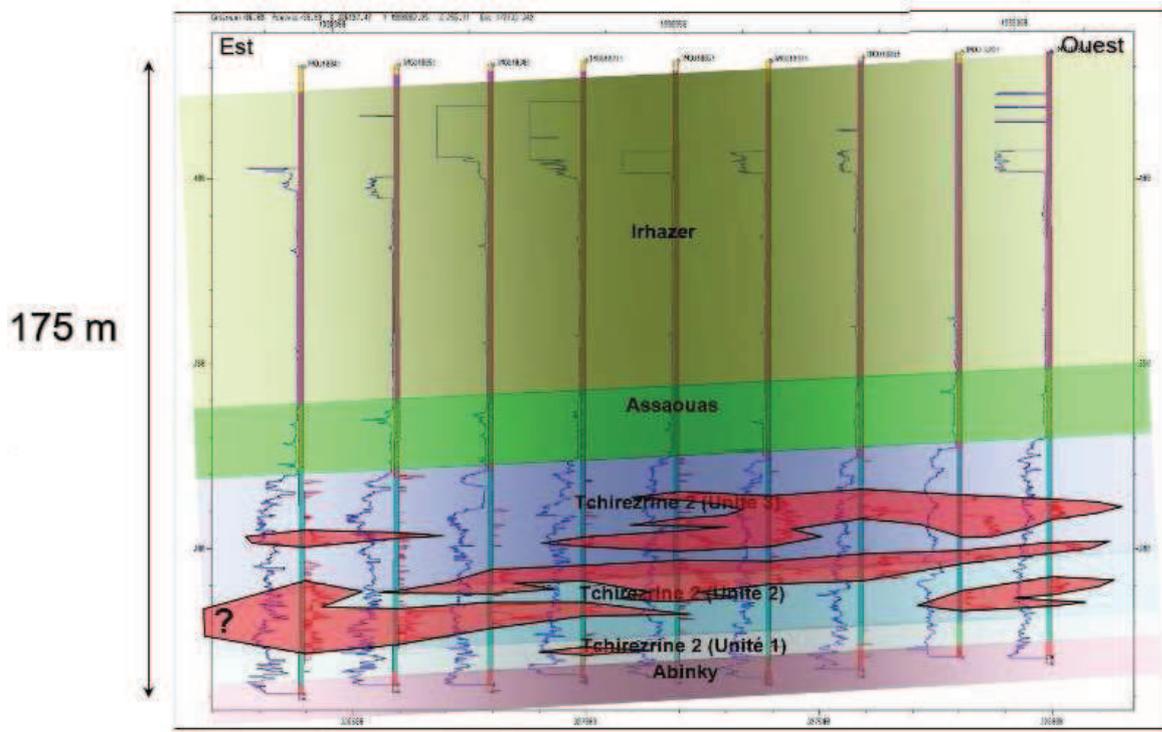


Figure 3 : coupe simplifiée de la zone minéralisée

La partie rouge représente les zones minéralisées en Uranium. Elles sont situées dans des grès (Tchirézrine 2) recouverts par les argilites de l'Irhazer et de l'Assaouas.

Dans les modèles utilisés dans le présent rapport, le gisement est modélisé comme suit :

Il sera constitué souvent de 4 types de roches :

Les 30 mètres sous la surface seront des blocs constitués d'un type de roche appelé IRHA (représentant l'Irhazer).

Tous les blocs situés sous ces 30m et au dessus de la tranche minéralisée seront appelés DEC (pour découverte) et sont naturellement stériles.

La tranche minière est quant à elle divisée en 2 qualités : STM, ou TM sont les blocs de la partie stérile de la tranche minéralisée (donc des grès de Tchirézrine) ne contenant pas d'uranium, alors que MTM ou ORE seront les blocs minéralisés de la tranche minéralisée.

Le gisement est très plat et très étendu (ce qui compense en partie sa faible teneur) : il s'étend sur 8,5 km du nord au sud et sur 2,5 km d'est en ouest.

La répartition des ressources est inégale :

On peut distinguer 3 étages minéralisés pour une puissance totale de 60m. La Figure 4 indique comment sont réparties les teneurs sur les 3 niveaux minéralisés du gisement.

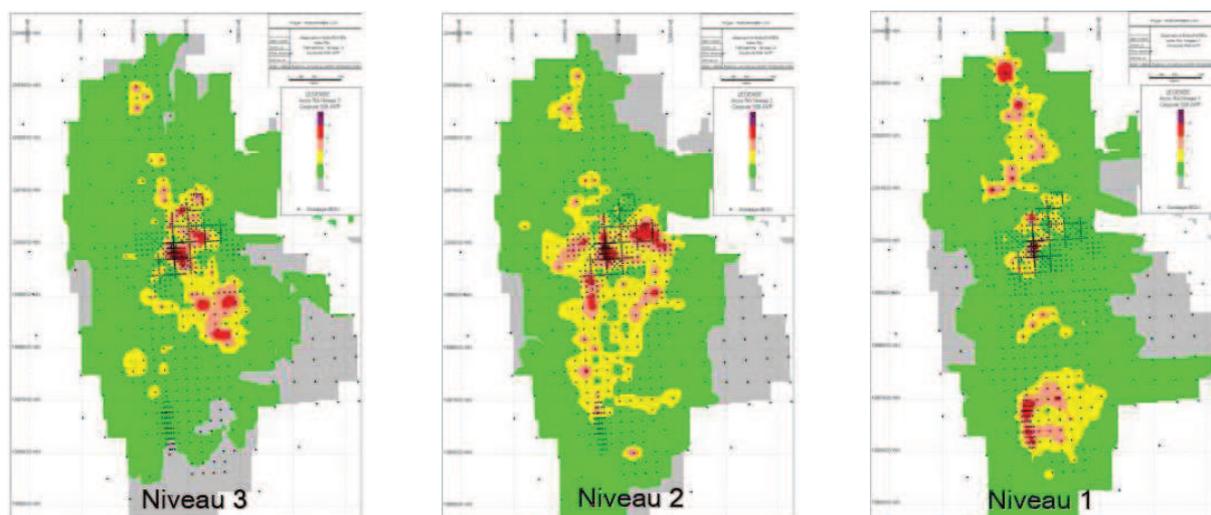


Figure 4 : répartition des teneurs par niveau

### 3 Le traitement du minerai d'uranium

Le traitement par lixiviation est fréquemment utilisé pour récupérer l'Uranium contenu dans le minerai. La lixiviation consiste à passer sous jets d'acide sulfurique du minerai d'Uranium préalablement concassé et broyé, afin que l'Uranium soit dissous et passé en solution. A partir de cet acide chargé en Uranium, on procède à une oxydation et on obtient un oxyde d'uranium jaune appelé communément « yellow cake » de formule  $U_3O_8$ .

Il existe plusieurs façons de lixivier le minerai, parmi lesquelles la lixiviation en tas, dite lixiviation statique qui consiste à simplement déposer au sol, sur une bâche imperméable du minerai grossièrement concassé et à l'arroser d'acide, puis à récupérer celui-ci s'écoulant au dessous, chargé en Uranium. Cette méthode est peu coûteuse mais a un faible rendement

(notamment parce que la taille de grain est importante). Elle est donc adaptée aux minerais pauvres et très pauvres (de teneur en uranium inférieure à 1‰).

La lixiviation dynamique quant à elle est effectuée en usine, ou le minerai est concassé criblé et broyé, puis passé en bain d'acide. Le rendement est bien meilleur (faible taille des grains) mais le traitement est aussi plus cher. Le gisement d'Imouraren, par ses teneurs variables parmi celles adaptées à chaque type de traitement devra faire appel aux deux types de traitements. On appellera dans ce document TD le traitement dynamique et TS le traitement statique.

## **Deuxième partie : Comparaison entre Whittle et le Pit Optimizer de Surpac**

Le lecteur pressé, ou ayant déjà des connaissances en optimisation de fosse pourra passer plus rapidement sur la partie comparant les deux logiciels Surpac et Whittle et se reporter au résumé et aux conclusions en fin de partie. Cependant, afin de mieux comprendre les parties sur les méthodes développées, une connaissance de base de la façon dont fonctionnent les logiciels est nécessaire.

*Note :* Dans tout ce rapport, on appellera optimisation l'action de faire calculer à un logiciel (Surpac ou Whittle) la fosse ou l'emboîtement de fosses correspondant au cash-flow le plus élevé en fonction des critères économiques et techniques saisis. Il ne s'agit pas d'une optimisation absolue, ni de LA fosse optimale (à tout point de vue, au niveau de la V.A.N. en comptant les investissements etc...). La fosse obtenue est seulement optimale au niveau du cash-flow généré pour les critères économiques et techniques saisis.

## 1 L'optimisation de fosse

Il existe plusieurs méthodes pour optimiser la fosse à ciel ouvert d'un gisement. On en distingue 3 particulièrement utilisées : La méthode de Lerchs-Grossman (*Lerchs-Grossman*, 1965) (la plus utilisée dans les algorithmes de calcul, dont ceux de Surpac et Whittle), la méthode du cône flottant (utilisable dans Surpac), et une méthode de paramétrage technique (utilisant une analyse convexe de la courbe *Quantité de minerai = f(Volume de la fosse)*).

### 1.1 L'algorithme de Lerchs-Grossman

#### 1.1.1 Généralités

L'algorithme utilise un modèle de blocs dans lequel chaque bloc a une valeur intrinsèque. Celle-ci peut être calculée au préalable de la façon suivante :

$$\text{Valeur} = \text{Quantité de métal} * \text{Prix du métal} - \text{coût d'extraction} - \text{coût de traitement}$$

L'algorithme vise à trouver la fosse de valeur maximale (c'est-à-dire, qui maximise la différence entre la valeur du métal extrait et les coûts pour obtenir ce métal), avec uniquement des restrictions de nature géométrique. Par exemple les pentes maximales des murs de la fosse assurant la stabilité de ceux-ci et qui ne peuvent excéder un angle maximal. Cet angle peut dépendre de la nature de la roche, de la profondeur. Ceci permet de calculer quels blocs doivent être extraits afin de découvrir un bloc donné.

L'algorithme de Lerchs-Grossman donne en résultat la fosse optimale (si elle existe), telle que chaque bloc non extrait restant dans le sol génèrerait une valeur négative s'il était extrait (soit du stérile, soit du minerai dont le coût de traitement serait supérieur à la valeur du métal qu'il contient).

#### 1.1.2 Principe de l'algorithme

Voici un exemple de la façon dont l'algorithme fonctionne :

Sur la Figure 5-1 le minerai est délimité de façon claire. Les blocs de stérile ont une valeur de -4 (coût d'extraction) et ceux de minerai une valeur  $16-4=12$  (valeur du métal moins coûts d'extraction pour simplifier). On peut voir ces valeurs réparties dans la Figure 5-2. Notons

que la dimension des blocs doit être au préalable définie de sorte que la pente maximale autorisée soit la diagonale de ces blocs. Dans la pratique, les blocs n'ont pas les dimensions appropriées et les logiciels calculent eux-mêmes combien de blocs horizontaux et verticaux il faut pour obtenir la pente voulue.

La valeur  $V$  de chaque bloc est ensuite additionnée à la somme des valeurs des blocs se trouvant dans la colonne située au dessus de lui pour obtenir  $V'$ , une sorte de valeur absolue tenant compte de la couverture du bloc.

$$V'_{ij} = V_{ij} + \sum_{k=0}^{i-1} V_{kj}$$

Dans une colonne, le bloc avec la valeur  $V'$  la plus élevée représente la profondeur la plus rentable. (Figure 5-3).

Un arbre est ensuite créé, en partant de la gauche du graphe afin de relier entre eux les blocs de plus grande valeur absolue  $V'$ . Une ligne de 0 est créée au

dessus du niveau du sol, puis en partant du haut de chaque colonne (et en partant de la colonne de gauche) on relie chaque bloc au bloc qui a la plus grande valeur parmi ceux qui lui sont adjacents à sa gauche. (Donc pour le bloc de valeur  $V'_{ij}$ , on cherche  $\max(V_{i+1,j-1}, V_{i,j-1}, V_{i-1,j-1})$  et on relie les deux blocs comme montré Figure 5-4.

En procédant ainsi jusqu'à la droite du graphe on a créé un arbre, reliant de proche en proche les blocs de plus haute valeur absolue  $V'$ .

Pour chacun de ces blocs, on procède comme pour  $V'$ , en créant  $V''$  qui est la somme de  $V'_{ij}$  et de la valeur de ses antécédents sur le graphe.

En prenant la valeur  $V''$  la plus grande en surface à la fin du graphe (donc au bout des branches de l'arbre) on trouve l'extrémité du chemin qui a le plus de valeur : ici 108. En remontant l'arbre ; on a ainsi le contour de la fosse optimale.

S'il n'y a pas de valeur positive, cela signifie qu'il n'existe pas de fosse rentable.

Cette procédure peut se répéter de façon analogue en 3 dimensions.

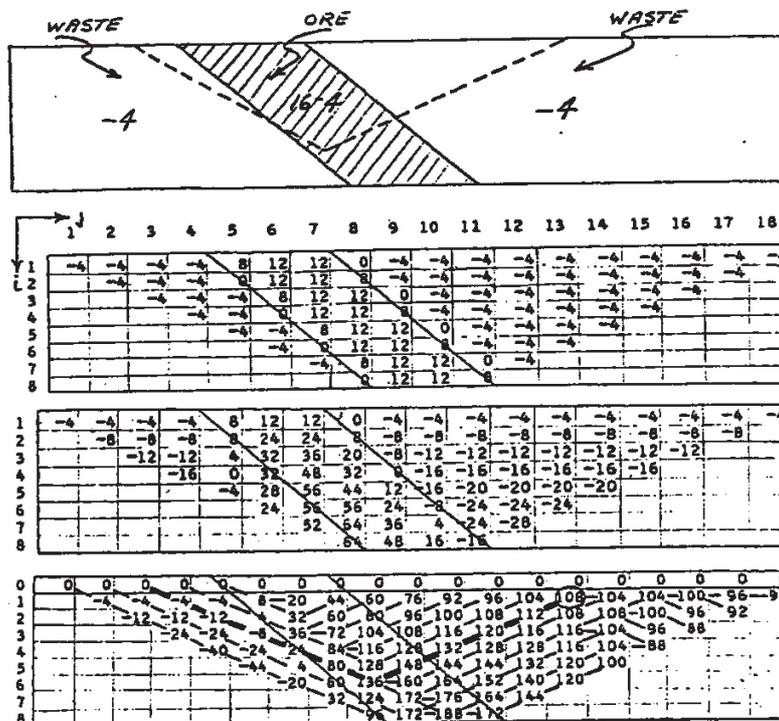


Figure 2.—Dynamic Programming.

Figure 5 : exemple d'exécution de l'algorithme de Lerchs-Grossman

## 1.2 L'algorithme du cône flottant

L'algorithme du cône flottant est une alternative à Lerchs-Grossman.

Il fonctionne avec les mêmes données (pente, valeur du bloc, coûts d'extraction et de traitement). Une fois que chaque bloc a une valeur, l'algorithme cherche un cône avec un bloc

donné comme sommet, de valeur totale positive (Figure 6), puis y ajoute d'autres cônes plus petits, dont la valeur est devenue positive (grâce au grand cône extrait), et retire également des cônes inversés de valeur négative (Figure 7) (zone à ne pas creuser bien que le cône global garde une valeur positive si on les exploite).

|    |    |    |    |      |    |    |    |
|----|----|----|----|------|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | -1 |
| -1 | 2  | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | 7  | -0.5 | 7  | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | -1 |

Figure 6 : calcul du premier cône

|   |    |    |    |      |    |    |    |
|---|----|----|----|------|----|----|----|
| 0 | -1 | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | -1 |
| 0 | 0  | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | 0  |
| 0 | 0  | 0  | 7  | -0.5 | 7  | 0  | 0  |
| 0 | 0  | 0  | 0  | -1   | 0  | 0  | 0  |

Figure 7 : retrait du cône inversé

C'est une méthode qui fonctionne de proche en proche pour terminer avec un cône (Figure 8). Cette méthode présente plusieurs inconvénients, comme la recherche du premier cône (il se peut qu'on ne trouve aucun bloc qui soit le sommet d'un cône positif, dans le cas où c'est plusieurs blocs qui rendent la découverte rentable). Cette méthode donne également une fosse qui est un optimum local, mais pas forcément la meilleure fosse possible.

|       |    |    |    |      |    |    |    |                 |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|------|----|----|----|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|
|       |    |    |    |      |    |    |    | -1              | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1    |    |    |    |      |    |    | -1 |                 | 2  | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |    |
| -1    | -1 | -1 |    | -0.5 |    | -1 | -1 |                 |    |    | 7  |    | 7  |    |    |
| -1    | -1 | -1 | -1 | -1   | -1 | -1 | -1 |                 |    |    |    |    |    |    |    |
| fosse |    |    |    |      |    |    |    | Minerai extrait |    |    |    |    |    |    |    |

Figure 8 : résultat de l'algorithme

### 1.3 Optimisation et paramétrage technique

Cette méthode de paramétrage des réserves ne va pas être décrite en détails (T.Coleou, 1986). On dira simplement qu'en évitant l'utilisation de paramètres économiques (elle n'utilise que la teneur en métal), cette méthode fournit à l'utilisateur une grande famille de fosses qui sont toutes des maximums par rapport à la quantité de métal récupérable qu'elles contiennent, pour un tonnage de minerai donné et un tonnage total de matériau extrait. Pour déterminer cette famille de fosses optimales pour chaque tonnage voulu, un logiciel, appelé MULTIPIT, développé au centre de Géosciences à Fontainebleau peut-être utilisé.

L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit une famille de projets (utile pour que l'exploitant ait des étapes de creusement), qui ne dépend pas de paramètres économiques. La détermination de l'optimal parmi ces fosses emboîtées se fera en donnant une valeur au métal ainsi que des coûts d'extraction et de traitement.

## 2 Les données d'entrée des programmes

Pour la comparaison des deux programmes détaillée, voir ANNEXE 1.

### 2.1 Whittle 3.4

#### 2.1.1 Le bloc modèle

Whittle nécessite un bloc modèle contenant, pour chaque bloc des données sous forme de masse.

Dans le gisement d'Aguas Claras, on a 3 types de minerais de fer :

- LO (Lump Ore)
- SF (Sinter Feed)
- PFF (Pelet Feed Fine)

Chacun avec une teneur en Fer différente. En moyenne dans le gisement :

- 17 % LO à 68.4 %Fe
- 41 % SF à 68.8 % Fe
- 42 % PFF à 66% Fe

On considère dans Whittle que chaque type de minerai correspond à un type de roche (de façon à pouvoir leur affecter plus tard des coûts de traitement différents). Dans chaque bloc, on a pour chaque produit, son tonnage T, et la quantité de Fer qu'il contient.

|              |         |         |        |  |
|--------------|---------|---------|--------|--|
| 3 21 13 4    | 1       | 1       | 28.924 | Le bloc entouré en rouge est situé à la position (X=3, Y= 21, Z= 14), c'est son ordre par rapport aux autres blocs (le bloc 1,1,1 est à l'origine des axes), 1 <sup>e</sup> 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> colonnes. |
| 3 21 13 Wast | 15.862  | 0       |        |  |
| 3 21 13 LO   | 2.86972 | 1.9626  |        |  |
| 3 21 13 SF   | 6.65378 | 4.55984 |        | 4 <sup>e</sup> colonne : le bloc contient 4 types de roches : Wast, LO, SF et PFF.   |
| 3 21 13 PFF  | 3.5385  | 2.27278 |        |  |
| 3 21 14 4    | 1       | 1       | 26.344 |  |
| 3 21 14 Wast | 16.393  | 0       |        | 5 <sup>e</sup> colonne : elle contient les poids (en tonnes par exemple) de chacun des types de roches dans le bloc.   |
| 3 21 14 LO   | 2.46984 | 1.68813 |        |  |
| 3 21 14 SF   | 5.2392  | 3.58885 |        |  |
| 3 21 14 PFF  | 2.24196 | 1.44808 |        | 6 <sup>e</sup> colonne : elle contient le poids de métal contenu dans chaque type de roche dans le bloc.   |
| 3 21 15 4    | 1       | 1       | 23.771 |  |
| 3 21 15 Wast | 15.183  | 0       |        |  |
| 3 21 15 LO   | 2.28698 | 1.56247 |        | 7 <sup>e</sup> colonne : c'est le poids total du bloc.   |
| 3 21 15 SF   | 4.58427 | 3.14344 |        |  |
| 3 21 15 PFF  | 1.71674 | 1.1121  |        |  |

Figure 9, extrait du fichier bloc modèle Whittle

Chaque bloc a donc comme attributs :

Le poids de WAST, LO, SF, PFF qu'il contient, ainsi que les poids de Fer de chaque catégorie qu'il contient : LOPf, SFpf, PFFpf (ces poids sont calculés à partir des teneurs mesurées).

Notons que tous les blocs doivent avoir les mêmes dimensions (ici on donne : 25x25x13 m).

Whittle présente l'avantage de pouvoir attribuer différents types de roches dans un même bloc (alors divisé en autant de parcelles), et de faire les calculs en prenant en compte les pourcentages de chaque roche, ce que ne fait pas Surpac, qui ne peut contenir qu'un type de roche par bloc (avec une teneur variable).

### Calcul :

Avec ce modèle, Whittle calcule différentes données par étage (bench) : nombre de tonnes, nombre de tonnes de fer, teneurs moyennes minimum et maximum.

## 2.1.2 La gestion des pentes

La définition des pentes maximales est beaucoup plus modulable dans Whittle que dans Surpac. On peut les choisir selon des régions rectangulaires du modèle (donc selon la profondeur par exemple), ou selon des types de roche (pour le cas où on aurait des blocs ne contenant qu'un type de roche à chaque fois). Si des blocs contiennent plusieurs types de roche (comme dans notre cas), on peut leur assigner une valeur particulière (Zone Number) selon laquelle Whittle peut affecter des pentes variables.

Au niveau des profils des pentes, pour chaque zone, celles-ci peuvent être définies selon leur azimut. On donne les azimuts et la valeur de la pente maximale.

### Exemple :

**Tableau 1 : exemple de définition des pentes sous Whittle**

| Azimuth | Pente Max |
|---------|-----------|
| 0       | 37        |
| 90      | 60        |
| 180     | 48        |
| 255     | 41        |
| 315     | 37        |

Entre deux azimuts, la pente est calculée linéairement en fonction de la pente des deux azimuts adjacents.

On peut définir le nombre d'étages jusqu'auquel calculer la liste des blocs en amont. Le fait que les blocs soient parallélépipédiques peut poser un problème dans la représentation de la pente de la fosse (celle-ci aura l'apparence d'un escalier). Le nombre de blocs nécessaires à cette représentation dépend de leur taille et de la pente. Whittle choisit par défaut une hauteur de 8 blocs pour calculer les antécédents d'un bloc donné (c'est-à-dire les blocs qu'il faudra extraire avant de retirer le bloc donné). Pour des blocs cubiques, toutes les pentes sont approchables, mais pour des blocs en forme de « biscotte », on se rend compte que des blocs empilés 8 par 8 (8 blocs en hauteur, 1 en largeur) ne parviennent pas à représenter une pente suffisamment raide. Dans ces cas-là, on peut modifier le nombre de bancs sur lequel sont calculées les pentes, mais ça allonge considérablement le calcul.

### Calcul :

A partir de ces données, Whittle calcule, pour chaque bloc, la liste des blocs « parents », c'est à dire les blocs qu'il faut nécessairement extraire pour pouvoir retirer le bloc en question. Un arbre est ainsi constitué, arbre qui est indispensable au calcul de la fosse optimale. Ceci donne

la forme de la fosse obtenue 8 étages au dessus du bloc extrait. La limitation du nombre d'étages permet de limiter les temps de calcul et ne perturbe pas le calcul total.

### 2.1.3 Le calcul des fosses optimales

C'est dans cette partie que l'on donne la majorité des valeurs économiques dont Whittle a besoin pour calculer un ensemble de fosses optimales. Les données d'entrées sont toutes en \$/masse, puisque les données dans les blocs sont en masse. Un inconvénient de Surpac est que certaines valeurs doivent être données en \$/volume, d'autres en \$/masse, ce qui pose des problèmes d'estimation de ces coûts.

#### 2.1.3.1 Coûts d'extraction (\$/t):

On a la possibilité de donner un coût standard d'extraction à Whittle, qui sera le coût d'extraction de tout bloc par défaut (c'est-à-dire tout bloc dont le coût d'extraction ne serait pas défini expressément). Les coûts d'extraction des blocs sont ensuite donnés sous forme de facteur proportionnellement à ce coût. L'unité de ces coûts est en valeur par unité de masse (par exemple, en \$/tonne).

On choisit généralement le coût par défaut comme étant le coût d'un bloc de stérile, et on affecte le facteur 1 aux blocs stériles. Les blocs minerais sont affectés d'un facteur pouvant être supérieur (coûts d'extraction du minerai plus élevé).

Les coûts d'extraction peuvent dépendre du type de roche, de la localisation du bloc, selon des fonctions qui peuvent être déterminées par l'utilisateur. Ainsi un bloc contenant plusieurs types de roche se verra affecter un coût d'extraction proportionnel à la quantité de chaque roche qu'il contient (on peut se demander si dans la réalité, chaque type de roche serait extrait séparément, particulièrement dans le cas d'un mélange Ore/Waste).

Des coefficients de récupération et de dilution peuvent être appliqués (Recovery factor <1, Dilution factor >1) pour modifier la quantité de roche obtenue après extraction et sa concentration en minerai (le facteur de dilution augmente la proportion de stérile).

#### 2.1.3.2 Coûts de traitement (\$/t) :

Les coûts de traitement sont donnés en fonction des roches. Le coût de traitement de chaque bloc sera calculé en fonction des proportions de chaque roche et de leur coût de traitement. L'unité est également en valeur par unité de masse de minerai traité (par exemple le \$/tonne).

La partie stérile du bloc n'est pas considérée comme traitée : dans le cas où le bloc a un certain pourcentage de minerai, seul ce pourcentage sera multiplié par le prix par masse.

Un facteur de récupération peut être introduit, et peut être différent pour chaque type de minerai (Recovery factor <1).

Dans le cas où le métal extrait du minerai doit subir un traitement supplémentaire, il est possible d'ajouter un coût de traitement du métal (qui sera alors en \$/tonne de métal), avec un taux de récupération éventuellement associé (s'il s'agit d'un autre processus).

Ces coûts doivent être donnés par tonne de métal/de minerai à l'entrée du processus. Cela peut avoir de l'importance quand certains industriels calculent leurs coûts par tonne produite. Il faut alors faire une conversion.

On peut donner à Whittle des teneurs de coupure, en deçà desquelles le bloc sera considéré comme stérile, et ne sera pas traité du tout. En règle générale on donne 0 comme teneur, pour que la valeur de tous les blocs contenant du métal soit calculée.

### 2.1.3.3 Prix de vente (\$/t):

On le donne en \$/tonne de métal, et ceci pour chaque métal présent dans le gisement. On peut aussi implémenter un coût de vente, dans la même unité. L'avantage par rapport à Surpac, qui ne demande qu'un prix de vente, est qu'en cas de variation du coût de vente (frais de transports ou autres), celui-ci est visible et modifiable directement, alors que pour le prendre en compte dans Surpac, il faut le soustraire directement au prix de vente.

#### Calcul :

Whittle calcule à partir de ces données, une valeur pour chaque bloc, et calcule la fosse optimale à l'aide de l'algorithme de Lerchs-Grossman. Un inconvénient par rapport à Surpac est que la méthode du cône flottant (plus rapide) n'est pas disponible.

Les paramètres de calcul sont :

La prise en compte ou non des blocs d'air dans le calcul (ne pas les prendre en compte permet d'alléger le calcul, mais peut donner lieu à des erreurs lorsque la pente du terrain est supérieure à la pente maximale définie plus haut : dans un tel cas, ne pas prendre en compte l'air donnerait une fosse qui passe dans l'air.

On fait varier le *revenue factor* (facteur multiplicatif du prix du métal) de façon à simuler une augmentation ou une réduction de prix et à obtenir plusieurs fosses : le calcul est en effet refait pour chaque valeur du prix du fer. Pour un prix plus grand, on obtient une fosse plus grande, et inversement. Cette technique permet d'obtenir des fosses emboîtées, avec un algorithme qui normalement n'en donne qu'une.

Le *revenue factor* peut varier avec une régularité différente sur des intervalles différents :

```
0.86 to 0.88 using 20 fixed factors
0.8801 to 0.979 using 20 fixed factors
0.98 to 1.0 using 20 fixed factors
1.01 to 1.4 using 10 fixed factors
```

Ceci est un gros avantage par rapport à Surpac, qui ne permet au mieux que d'obtenir 10 fosses emboîtées, avec des *revenue factor* que l'on doit définir un par un.

La fosse optimale est évidemment obtenue pour un *revenue factor* égal à 1 (au prix actuel du métal).

Whittle donne en sortie une liste de toutes les fosses (maximum de 83 fosses), avec leurs caractéristiques physiques élémentaires (poids de roche, poids de minerai...).

### 2.1.4 L'intégration du temps, une fonction que Surpac n'a pas

Whittle possède, en tant qu'outil de planification une caractéristique que Surpac n'a pas : il prend en compte le temps.

L'établissement de limites temporelles d'exploitation permet de calculer la durée de vie de la mine pour chaque fosse (par exemple, 6 millions de tonnes de minerai traitées à l'usine par an). Ces limites peuvent elles mêmes varier en fonction du temps.

Il est possible, une fois les fosses calculées, de les analyser, en faisant varier les coûts, les prix, en fonction du temps, en fonction de la géométrie de la fosse, ou des deux. Il est ainsi possible de gérer des stocks, de calculer des taux de rentabilité, des valeurs actuelles nettes, des durées de vie de la mine.

Alors que Surpac ne donne en tout et pour tout comme résultat qu'une petite série de fosses avec leurs volumes et valeurs absolues, Whittle permet de suivre au cours de l'exploitation la variation de toute une série de paramètres (profondeur, quantité de minerai extrait, valeur de la fosse, concentration du minerai extrait ou traité, etc...).

Toutes les données utilisées pour calculer les fosses emboîtées peuvent varier au cours du temps. On entre alors une formule remplaçant l'ancienne (par exemple, un coût d'extraction en fonction du temps), qui permettra de faire varier la valeur des fosses précédemment calculées.

Attention : Les nouvelles valeurs ne donnent pas lieu à un nouveau calcul de fosses. Les fosses optimales existent déjà, et le programme ne fait que modifier la valeur des blocs contenus dans la fosse au cours du temps. Il se pourrait que la fosse optimale soit différente lorsque les coûts de traitement augmentent avec le temps par exemple, si le fond de la fosse est pauvre en métal. Sans la variation au cours du temps, on obtient une fosse assez profonde, dont le fond pourrait ne plus être rentable si les coûts de traitement augmentaient avec le temps. Or ici Whittle conservera la même fosse, mais lui attribuera une valeur plus faible, alors que sa géométrie aurait normalement dû changer. La fosse ne sera certes plus la fosse optimale (au profit d'une plus petite), mais il est légitime de se demander si la nouvelle fosse ayant la valeur la plus petite est bien optimale (puisque sa géométrie a été définie avant les variations temporelles).

Il s'agit ici d'un petit inconvénient de Whittle (pas en comparaison de Surpac évidemment, puisque Surpac ne compte aucune variation temporelle).

La prise en compte du temps nécessite une valeur d'actualisation (discount rate per period), déterminée par l'utilisateur. Cette valeur est très importante, car elle déterminera la fosse la plus rentable. Une forte valeur d'actualisation lisse les variations à long terme.

On peut choisir l'unité de temps (jour, mois, année) selon laquelle on fixe les variations.

La fixation des limites de l'usine, ou de la mine (maximum d'unités que l'on peut traiter par unité de temps) permet d'établir une durée de vie pour la mine, et donc d'appliquer toutes les variations temporelles citées.

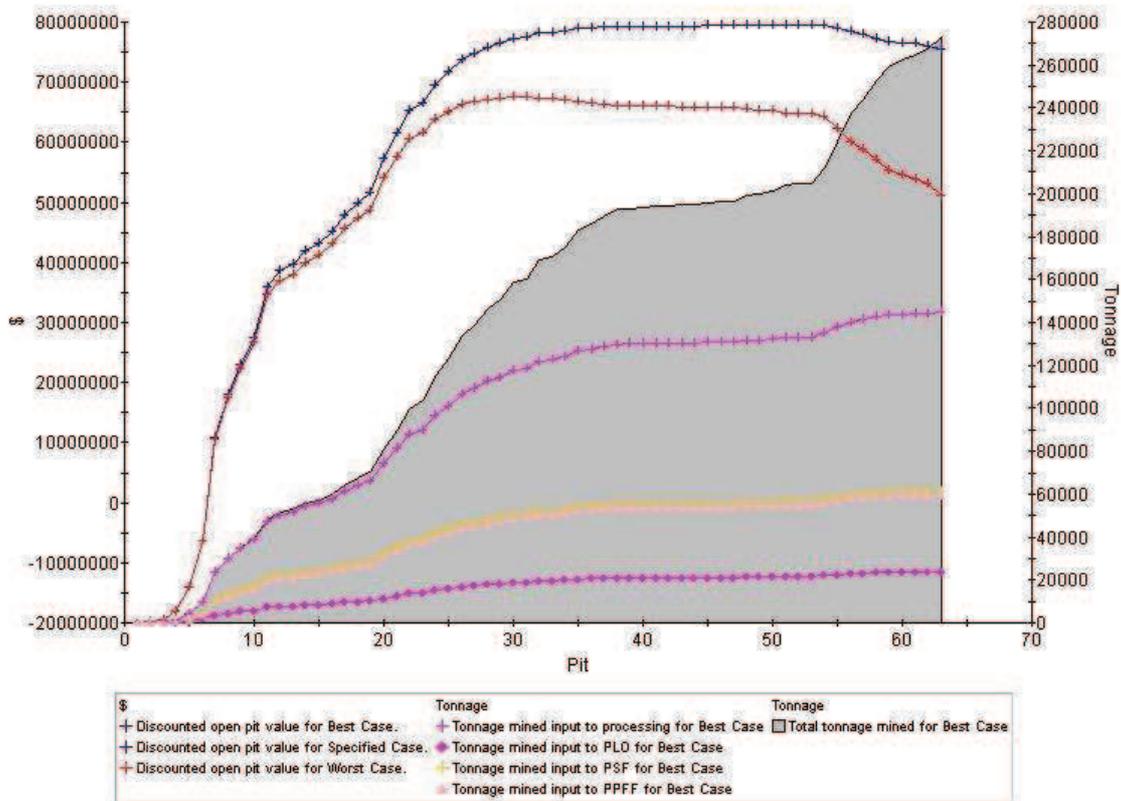
L'avantage, plus qu'une réelle planification plusieurs années en avance, permet de voir l'influence de divers scénarios d'évolution des prix, des coûts des technologies, des stratégies d'exploitation

#### **2.1.4.1 Les stratégies d'exploitation :**

On peut choisir la façon dont la mine sera exploitée au cours du temps, ce qui change la valeur de la mine.

Ceci n'a d'influence que lorsqu'on utilise une valeur d'actualisation. En valeur présente, que l'on exploite selon le best case (fosse après fosse) ou selon le worst case (banc après banc), la valeur totale du minerai extrait sera la même.

Voici un graphique d'évolution de la quantité de métal extraite et de la valeur totale actualisée pour chaque fosse :



On peut mener un calcul selon un cas spécifique (Fixed Lead) : on creuse un certain nombre de bancs avant de passer à la fosse-étape suivante. On donne une liste de fosses (pas plus de 10) qui seront des étapes. Il s'agit d'un intermédiaire entre Best et Worst case.

*Exemple* : Fixed lead, maximum 5, avec les fosses étapes 10, 15, 20... Le programme calcule le creusement de la fosse 10, puis élargit 5 bancs à la fois jusqu'à la largeur de la fosse 15, puis creuse jusqu'à la profondeur de la fosse 15, élargit ensuite sur 5 bancs de haut jusqu'à la largeur de la fosse 20 ...

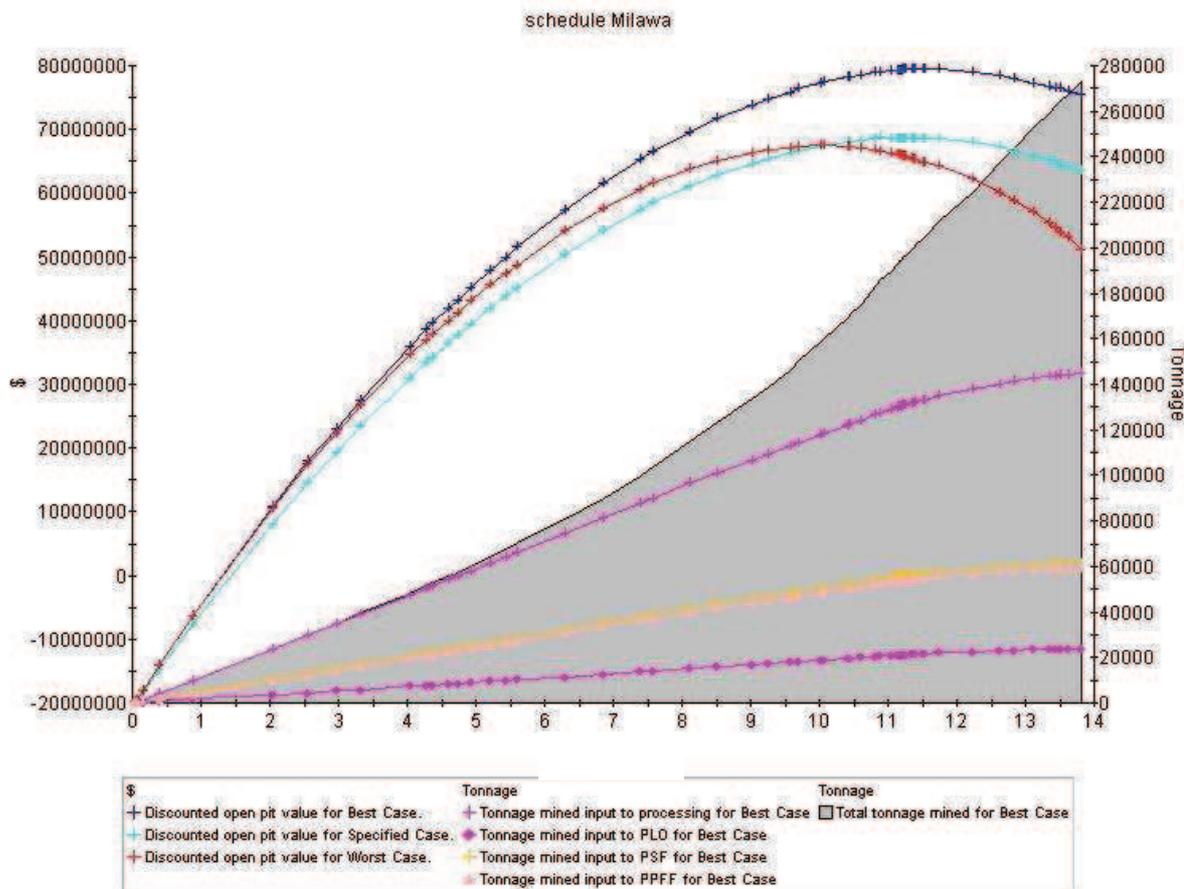
Whittle met à disposition deux algorithmes de Milawa<sup>2</sup> : Milawa Balanced, et MilawaNPV®, creusant de façon à optimiser la valeur absolue, ou la valeur actuelle nette du gisement à chaque étape. Des tests ont montré que leur efficacité est toute relative (notamment à cause du fait qu'il faut au préalable donner les fosse-étapes souhaitées). Voici un exemple de valeurs pour une exploitation selon l'algorithme de Milawa, en fonction des années.

Ces algorithmes d'exploitation ne servent stricto sensu qu'à tracer des graphiques, puisque les calculs ont déjà été faits à l'étape précédente.

<sup>2</sup> Les algorithmes précis ne sont pas disponibles, on ne sait donc pas vraiment comment le calcul est mené

Un inconvénient des algorithmes de Milawa est que le constructeur ne donne pas leur fonctionnement précis. Des valeurs actualisées nettes calculées avec ces méthodes ne sont de plus pas forcément supérieures à des valeurs avec une méthode *fixed lead* (d'après des calculs effectués sur le gisement d'Agua Claras). L'optimisation de la NPV ne paraît donc pas évidente.

De plus, quand bien même cette valeur serait optimale, et proche du best case, l'exploitant ne saura pas comment creuser sa mine puisque l'Algorithme ne dit pas dans quel ordre il exploite les bancs.



## 2.2 Surpac 5.1 avec pit Optimiser

Surpac possède dans son module d'optimisation 2 méthodes principales de calcul :

- \$/unit : elle est la plus adaptée à Surpac, puisqu'elle demande les informations économiques classiques (coûts, prix du métal), ainsi que la teneur et la densité des blocs. Elle calcule directement la valeur des blocs à partir de ces données. Elle se révèle peu précise quand les blocs contiennent deux types de roches différents (ne serait-ce que stérile et minéral) car on doit donner des coûts uniques par type de roche, valides sur l'ensemble du modèle. Donc quand les proportions de deux types de roches varient entre les blocs, les prix ne pourront pas varier, ce qui engendre beaucoup d'imprécisions.
- \$/mass ou \$/volume sont des simples applications de l'algorithme de Lerchs-Grossman, c'est-à-dire qu'on entre une valeur en attribut pour chaque bloc, et que

Surpac calcule alors la fosse optimale. On n'obtient qu'une seule fosse, mais qui a l'avantage d'être un résultat plus précis dans la mesure ou on peut calculer à la main (donc en maîtrisant tous les paramètres) la valeur de chaque bloc, en fonction de sa teneur ou de la quantité de chaque roche qu'il contient. Il n'y a pas besoin de faire de moyenne des coûts sur l'ensemble du modèle, puisque chaque bloc a sa valeur précise. Cela a un inconvénient majeur : pour modifier un prix ou un coût (celui du métal par exemple), il faut reprendre les calculs de tous les blocs.

### 2.2.1 Le bloc modèle

Il ne doit pas nécessairement contenir que des blocs de même taille. Un inconvénient MAJEUR de Surpac est que chaque bloc ne peut contenir qu'un type de roche (attribut `rock_type`). Dans le cas de notre exemple, le gisement contient 3 types de minerais et du stérile. Ces 4 types de roches sont mélangés, et séparés par granulométrie, il n'est donc pas possible de dessiner des blocs contenant chacun un seul de ces types de roche. Chaque type de minerai a un coût d'extraction, une teneur et un coût de traitement qui lui est propre. Whittle prend en charge les coûts pour chacun de ces minerais, mais Surpac n'est fait pour traiter qu'une teneur et un type de roche par bloc (méthode \$/unit).

Surpac travaille en effet avec les volumes, il lui faut donc une densité pour chaque bloc, ainsi qu'une teneur. Surpac à l'aide des dimensions des blocs calcule ensuite les masses de métal. Une autre conséquence est qu'un bloc ne peut contenir que du minerai ou du stérile, pas les deux.

Pour le gisement utilisé, cela a posé beaucoup de problèmes. Il a fallu calculer pour le modèle entier la densité moyenne, la teneur moyenne, les coûts d'extraction et de traitement moyens, et appliquer ces coûts moyens sur le modèle entier qui ne contenait qu'un type de roche.

### 2.2.2 La gestion des pentes

On ne peut pas donner autant d'informations sur les pentes dans Surpac que dans Whittle. Les angles maximums sont limités aux azimuts des points cardinaux (N-S-E-W-NE-NW-SE-SW). Des zones de définition des pentes ne peuvent pas être définies (contrairement à Whittle) de façon géométrique. Les pentes peuvent en revanche dépendre du type de roche (comme dans Whittle) ce qui donne une possibilité de contourner les définitions par zones géométriques. Il suffit d'affecter un type de roche différent (valeur réelle dans les attributs) à des blocs par tranche de niveau par exemple. Cela permettra d'affecter une pente maximum différente à ces blocs selon leur attribut '`rock_type`', et d'obtenir des pentes différentes selon les profondeurs. Cette manipulation n'est cependant possible que lorsqu'on n'a qu'un type réel de roche dans le gisement, cas dans lequel on peut alors utiliser '`rock_type`' pour les pentes. Dans le cas général, on doit donc se contenter d'une pente constante selon la profondeur.

### 2.2.3 Les données économiques

#### 2.2.3.1 Coût d'extraction (\$/m<sup>3</sup>) :

Le coût d'extraction doit être entré en valeur par unité de volume. Il peut dépendre du type de roche, et on peut lui ajouter un coefficient de récupération du minerai (inférieur à 1). On peut définir des « types de roche virtuels », en fonction de la profondeur. Ces types de roches n'ont

rien à voir avec le paramètre «rock\_type» de chaque bloc, ils servent uniquement à faire varier des coûts d'extraction en fonction de la profondeur.

On peut définir un coût d'extraction (avec facteur de récupération) pour chaque type de roche stérile, et un pour chaque type de roche minéral. Il incombe à l'utilisateur de déterminer à l'avance quel type de roche sera stérile et quel type sera minéral. Quand le pit optimiser examine chaque bloc, il détermine d'après son prix de vente si celui-ci est du minéral ou du stérile (la notice ne précise pas, mais tout bloc contenant un peu de métal, et dont le 'Ore\_type' a été déclaré sera considéré comme du minéral).

Les coûts d'extraction, de transport, doivent être ici donnés pour chaque stérile ou minéral et pour chaque profondeur, en \$/unité de volume ! Ceci est une source importante d'incertitude, puisque les coûts de transport et de tir sont en général donnés par unité de masse. Effectuer une conversion oblige à utiliser une densité moyenne sur l'ensemble des blocs contenant un type de roche donnée. L'inhomogénéité des unités de valeurs est une source d'erreur importante.

### **2.2.3.2 Coûts de traitement (\$/t):**

Ils ne sont pas donnés dans la même unité que les coûts d'extraction. On peut en choisir un par type de minéral, avec un rendement propre (en %), et une teneur seuil, en deçà de laquelle le minéral sera considéré comme stérile. La teneur seuil sert à éliminer du calcul des blocs dont on sait qu'ils ne contiennent pas assez de métal pour être considéré comme du minéral. Surpac ne calculera alors même pas leur valeur, et les considèrera par défaut comme du stérile. Lorsqu'un bloc contient par exemple 60% de minéral à 65%, le logiciel calculera la teneur globale (puisque un bloc ne peut contenir qu'un type de roche), donc environ 40%. Si cette teneur rend le traitement rentable (selon le calcul du logiciel), alors le bloc sera traité. Le problème est que Surpac traitera la totalité du bloc (en masse), alors qu'en réalité seulement 60% de ce bloc serait traitée (selon le calcul de Whittle). On se retrouve donc avec un coût trop élevé, dû au fait que la partie stérile du bloc est comptée dans les coûts de traitement. La fosse finale a donc une valeur plus grande avec Surpac qu'avec Whittle (dans le cas où l'on a plusieurs types de roche par bloc).

### **2.2.3.3 Prix du métal (\$/t):**

Le prix du métal est donné en \$/tonne. Il ne varie pas en fonction du temps. Tout comme Whittle, Surpac peut manipuler et optimiser des fosses contenant plusieurs métaux. On peut fixer des prix différents pour des types de minéral différents (si ceux-ci sont dans des blocs différents), contenant le même métal dans le gisement.

## 2.2.4 Les limites verticales

Il faut définir une topographie, qui sera la borne supérieure de la fosse. Surpac nécessite une borne inférieure pour délimiter également la fosse.

Il est important que la topographie s'étende suffisamment en largeur afin de couvrir toute la surface qui sera éventuellement couverte par la fosse optimisée, afin que celle-ci puisse être limitée en hauteur par la topographie.

Des problèmes surviennent tout de même si la fosse sort latéralement du bloc modèle, puisque les blocs extérieurs sont considérés comme de l'air. Voici un extrait d'un rapport de Surpac, après l'optimisation de la fosse d'Agua Claras, en utilisant la méthode \$/unit :

Surpac Minex Group  
Pit Optimisation  
Optimisation Report  
31-Jan-07

Results:

| Discount | Volume        | Value          | Output         |
|----------|---------------|----------------|----------------|
| 0.00     | 64,179,375.00 | 110,365,060.00 | pit_unit0.dtm  |
| 10.00    | 49,651,875.00 | 59,057,126.00  | pit_unit10.dtm |
| 20.00    | 30,005,625.00 | 17,757,608.00  | pit_unit20.dtm |

The topography DTM specified on the Vertical Limits tab does not extend far enough for all slope cones projected from blocks to intersect the DTM. **Areas outside the DTM are considered to be air.** If the horizontal extents of the pit created by the optimiser are close to the extents of the DTM, you should extend the DTM and re-run the optimiser.

### 2.2.5 L'optimisation multi fosse

Dans le cas de la méthode \$/unit uniquement, on a la possibilité de faire varier la valeur du métal, selon des pourcentages (en plus ou en moins) choisis, et au maximum de 10 valeurs. Il faut définir le nom, la couleur et différents paramètres de chacune de ces fosses, pour que Surpac puisse les sauvegarder. C'est le seul moyen d'obtenir des fosses emboîtées (maximum 10). Cela prend du temps à définir, et suppose que l'utilisateur sait à l'avance quels taux de réduction ou d'augmentation du prix lui donneront des fosses emboîtées qui peuvent constituer des étapes de creusement.

## 3 Le calcul des fosses

Les deux logiciels utilisent principalement l'algorithme de Lerchs-Grossman, mais Surpac, par la possibilité qu'il offre d'utiliser l'algorithme du cône flottant est plus rapide dans la pratique. En effet, Surpac utilise une combinaison des deux méthodes, en utilisant d'abord le cône flottant, pour trouver la fosse plus rapidement.

Afin de rendre le calcul encore plus rapide, on peut choisir dans Surpac une option sur la taille des blocs. On peut choisir de calculer la fosse avec une résolution plus faible (par exemple, la fosse pourra ne contenir que des blocs deux fois plus gros que les blocs du modèle), elle aura donc plus « l'air d'un escalier ». Dans ce cas, chaque gros bloc a pour attributs une moyenne des petits blocs qu'il contient.

Une première estimation de la fosse devrait être faite avec Surpac, parce que les paramètres d'entrée sont simples (si le gisement s'y porte, c'est-à-dire s'il n'y a qu'un type de minerai par bloc), et que le calcul est rapide. On aura donc une première estimation de la fosse, qui amènera ou non à élargir le bloc modèle, la topographie, et à définir des paramètres d'entrée ensuite plus précisément. Cette étape n'est cependant pas toujours nécessaire puisqu'une

visualisation du gisement sous Surpac permet d'apprécier la taille d'une fosse qui contiendrait tout le minerai. Il est ensuite facile d'élargir le modèle de bloc.

## 4 Les données en sortie

### 4.1 Whittle

En plus de toutes les données techniques et économiques que l'on souhaite sur les fosses, Whittle assigne à chaque bloc (en attribut) la fosse à laquelle il appartient. Cela permet une bonne visualisation de l'emboîtement des fosses, en exportant le modèle vers Surpac par exemple.

Whittle donne dans ses rapports, des données d'analyse de chaque fosse, comme leur masse, la quantité de métal extraite, la teneur moyenne en métal des roches extraites, tout cela pour chaque fosse, et donc en conséquence, au cours du temps.

Les résultats mathématiques sont bien plus développés que dans Surpac, au détriment des visualisations graphiques (plus développées dans Surpac).

Whittle fournit des rapports sur chaque étape de calcul (calcul des fosses, calculs économiques, gestion des pentes...). On peut ainsi estimer la valeur de la fosse de façon plus détaillée, et plus précise qu'avec Surpac (Figure 10).

```

BEST CASE SCHEDULE : with inner pits always mined out first

Item      Limit  Strip  Input  Output  Costs and  Costs and
Process   /Feed  /Feed  mass   mass    Income     Income
Element  grade  grade  qty    qty     Cash Flow  Discounted
=====
Totals Rock      0.54    204866
  PLO LO          21679
  Fe              0.6856  14863   14239   256305667  147277261
  PSF SF          56889  -149516196  -87749893
  Fe              0.6889  39192   36291   653244518  383538708
  PFFF PFF       54674  -137845349  -80217808
  Fe              0.6612  36152   32356   582413607  339847741
Selling costs          -837157461 -488539082
Total capital expenditure -200000000 -200000000
Internal rate of return %
Total number of periods  11.53  138439526  79431833

Payback in  1.18 periods (10% of project life)
=====

```

Figure 10 : rapport économique de Whittle sur la fosse optimale

Le Cash flow est la valeur de la fosse optimale, et le discounted cash flow, sa valeur actuelle nette (au taux d'actualisation par défaut de 10 %)

Notons que pour les résultats obtenus, certaines contraintes géométriques n'ont pas été prises en compte. Dans le cas de ce gisement, la « montagne » contenant du fer ne peut pas être exploitée, pas plus que des zones hors fosse (quand un bail limite le terrain par exemple). Il n'est pas possible dans Whittle de dire quelles zones ne peuvent pas être creusées.

Une façon artificielle de remédier à cela serait de créer un type de roche particulier pour ces zones et d'y affecter un CAF (*cost adjustment factor*) très élevé, de sorte que extraire ces blocs coûte extrêmement cher, et ne soit donc pas fait.

On a donc obtenu ici une mine trop grande. Ce problème se résout également très bien en utilisant un bloc modèle largement surdimensionné par rapport au gisement.

## 4.2 Surpac

En sortie, Surpac donne une surface graphique représentant la fosse, ou les fosses (dans le cas de la méthode \$/unit, en ayant défini les fosses pour lesquelles on veut faire varier la valeur du métal).

Pour chaque fosse sauvegardée en sortie, Surpac donne son volume (en m<sup>3</sup> et sa valeur absolue (c'est-à-dire directement proportionnelle à la quantité de métal extraite de l'usine)

| Results: | Discount | Volume        | Value          | Output                  |
|----------|----------|---------------|----------------|-------------------------|
|          | 0.00     | 64,179,375.00 | 110,365,060.00 | pit_unit_floating0.dtm  |
|          | 10.00    | 49,651,875.00 | 59,057,126.00  | pit_unit_floating10.dtm |
|          | 20.00    | 30,005,625.00 | 17,757,608.00  | pit_unit_floating20.dtm |

Un problème est qu'avec la méthode \$/unit, le nombre de tonnes traitées est faux (puisque les blocs contenant du stérile seront considérés comme traités entièrement), donc la quantité de métal sortie est également fautive, puisque le rendement de l'usine s'appliquera sur tout le bloc. On trouve parfois dans des blocs des anomalies de calcul :

|  |
|--|
| Block coordinates (Y, X, Z): ( 587.500, 1512.500, 976.500)   |
| Retrieved 1 block.   |
| \$/unit calculations   |
| Block size (Y, X, Z): ( 25.000, 25.000, 13.000)  |
| Block volume: 8125.00 m3   |
| SG from block attribute: 0.00  |
| Ore type: 1  |
| To mine as ore would cost: -24375.00   |
| To mine as waste would cost: -9273.87  |
| Block Grade: 0.675   |
| 0.000 cutoff (7900.00 \$/unit)   |
| Yield: 0.675   |
| Tonnage: 30.63 ( SG: 0.00 x volume: 8125.00)   |
| <b>Recovered tonnes: 30.63</b> (tonnage: 30.63 x mining recovery: 1.00)                                    |
| <b>Milled tonnes: 27.88</b> (tonnage: 30.63 x mill recovery: 0.91) (mill recovery based on Yield of 0.675) |
| <b>Units produced: 18.81</b> (tonnage: 27.88 x Grade: 0.675)   |
| Calculations:  |
| Sale value: 148601.08 ( units: 18.81 x \$/unit: 7900.00 includes discount)                                 |
| Mining cost: -24375.00 (extract: 24375.00 + haulage: 0.00 )  |
| Milling cost: -79035.96 (based on Yield of 0.675)  |
| Block value: 45190.11  |
| Total value of blocks: 45190.00  |
| 5.56 \$/m3   |

La teneur est appliquée à la sortie de l'usine, et le nombre de tonnes traitées est trop important. Il se pourrait en effet très bien que ce bloc contienne 20% de stérile qui ne serait en réalité pas traité alors qu'il est ici compté dans le 'milled tonnes'.

---

## 5 Résumé

---

Voici un bref comparatif des éléments recensés dans Surpac et Whittle.

### 5.1 Surpac

- Ne prend pas en compte le temps (actualisation, durée de vie, limites d'usine, d'extraction).
- Demande parfois une topographie étendue au-delà du modèle (le fichier topographie doit couvrir la fosse en surface, qui pourrait sortir du modèle de bloc)
- Ne peut pas imposer de contraintes géométriques sur l'exploitation (zone interdite par exemple)
- Les différents pourcentages de discount (càd les fosses emboîtées) doivent être donnés à la main et au maximum de 10.
- Ne peut contenir qu'une sorte de minerai par bloc (traite donc le stérile des blocs partiellement minéralisés et contenant plusieurs types de minerais).
- Les pentes ne peuvent pas dépendre de la profondeur
- Changer un coût implique de recalculer manuellement la valeur de chaque bloc dans la méthode \$/mass
- Pas de taux de dilution à l'extraction

### 5.2 Whittle

- La visualisation n'est pas privilégiée
- Long temps de calcul, long temps d'analyse des résultats
- Les fosses sont calculées avant l'introduction des variations temporelles.
- Les fosses-étapes pour les plannings d'exploitation (Milawa) doivent être données à la main (max 10).
- Utilise plutôt des poids (pas des teneurs, ni des volumes), mais possibilité de choisir des teneurs comme valeur unitaire.
- Les blocs doivent tous avoir la même taille (contraintes sur les pentes) alors que Surpac peut créer des Superblocs (économie de mémoire) (voir *Opération de sous blocking*, page 43)
- Pas de contraintes géométriques applicables
- N'utilise que l'algorithme de Lerchs-Grossman

---

## 6 Conclusion

---

Whittle possède une interface graphique simple à prendre en main, et explicite au niveau des étapes de calcul. Bien que ne permettant pas une visualisation correcte du gisement et des

fosses calculées, il permet une bonne analyse et planification des fosses. Il est inévitable au niveau du calcul des fosses optimales grâce aux nombreux paramètres qu'il prend en compte. Surpac permet une bonne visualisation des résultats de Whittle par exemple, ou de fosses qu'il aura lui-même calculées, mais les outils disponibles à l'analyse des résultats sont très limités. Surpac ne donne pas de valeurs actualisées, pas de masse, teneur moyenne, quantité de métal extraites, et surtout Surpac n'accepte pas plusieurs types de roches, ou de minerais par bloc, ce qui est pourtant le cas pour la plupart des gisements d'Uranium, et en particulier celui d'Imouraren.

Surpac est donc plus fiable pour faire des études sur le modèle de bloc lui-même (teneurs moyennes, densité moyenne, et autres statistiques), alors que l'optimisation devra être faite avec Whittle.

## **Troisième partie : Développement d'une méthode d'exportation de Surpac vers Whittle**

# 1 Problème initial d'exportation

## 1.1 Objectif

Le gisement d'Imouraren constitue l'objectif d'exploitation principal d'Areva à l'échéance 2010. Il est connu depuis longtemps : découvert en 1969, il a fait l'objet d'une préféabilité en 1980, qui a montré qu'il n'était pas rentable à l'époque. A cause de sa faible teneur (teneur moyenne de 0,74‰ à la coupure 0,3‰), il n'est rentable que depuis la préféabilité de 2006. L'augmentation des prix de l'Uranium a rendu le gisement rentable à l'exploitation, mais a également fait émerger des problèmes liés à cette faible teneur.

AREVA n'a jamais exploité de gisements si pauvres à ciel ouvert (l'Uranium n'ayant jamais valu autant que de nos jours) et a utilisé actuellement un seul type de traitement pour ses mines du Niger). Le minerai est systématiquement traité en lixiviation dynamique dans une usine dédiée. Traitement onéreux mais avec un bon rendement. L'apparition de minerai pauvre apporte la possibilité d'utiliser un traitement par lixiviation en tas (dite statique), qui a un faible rendement mais est beaucoup moins cher et donc plus rentable pour ce type de minerai.

On cherche donc à traiter les parties les plus pauvres de nos blocs de minerai en traitement statique et les plus riches en dynamique. Pour cela, il faudrait idéalement que chaque bloc, dans Whittle soit divisé en 3 parcelles :

- une parcelle contenant le stérile du bloc (sous la teneur de coupure)
- une parcelle contenant le minerai pauvre (en deçà d'une teneur de transition choisie par l'utilisateur)
- une parcelle de minerai riche (au-delà de cette teneur de transition)

Chaque type de parcelle aurait un code spécifique (un type de roche virtuel) qui indiquerait à Whittle avec quel type de traitement la traiter et donc comment calculer sa valeur.

Or il n'était pas possible avec Surpac de préparer un modèle de bloc sous Whittle, qui contiendrait 3 parcelles. Ceci est dû au fait que dans Surpac, chaque bloc ne peut contenir qu'un type de roche (comme vu dans la partie 2).

## 1.2 Outils présents dans Surpac

Surpac et Whittle étaient à l'origine possédés par deux entreprises différentes, qui ont maintenant été rachetées par un même groupe : GemCom. Un outil d'exportation de données de Surpac vers Whittle a été développé pour permettre aux utilisateurs de bénéficier des spécificités des deux logiciels. Cet outil est cependant imparfait, car trop simple d'utilisation. Cette simplicité nuit à l'adaptabilité requise dans le cas de gisements complexes modélisés de façon de plus en plus réaliste.

L'outil d'exportation de modèle de Surpac vers Whittle se compose de deux parties :

- Une première méthode d'exportation standard (Figure 11)

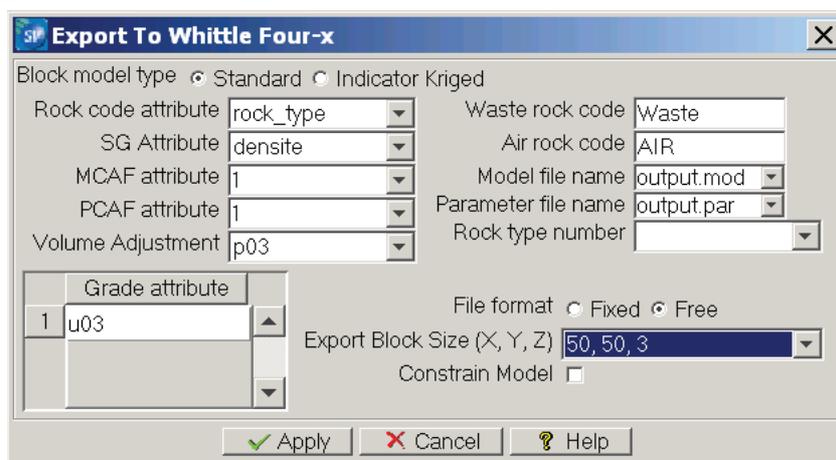


Figure 11 : module d'exportation Surpac vers Whittle

Avec cet outil, on sélectionne parmi les attributs présents dans le modèle lesquels vont correspondre au type de roche, densité, proportion minéralisée à une coupure donnée (*volume adjustment*) et la teneur de cette proportion (*grade attribute*). Il est possible d'ajouter d'autres valeurs de teneur mais celles-ci devront garder la même proportion dans le bloc (on obtient donc au maximum une parcelle minéralisée et une parcelle de stérile). On note que c'est irréaliste dans le cas où on a plusieurs proportions différentes pour chaque coupure.

- Un outil d'exportation par krigeage d'indicatrice (Indicator krige). Cet outil a été conçu pour les modèles possédant plusieurs proportions minéralisées par bloc (une proportion par coupure). Il permet d'exporter vers Whittle plusieurs parcelles par bloc. Chaque parcelle contient alors le minerai compris entre deux coupures à une teneur moyenne entre ces coupures. Les Tableau 2 et Tableau 3 ci-dessous sont un exemple du traitement des données. Les proportions du Tableau 2 représentent la quantité du bloc dont la teneur est située SOUS la coupure donnée (*c'est l'opposé des données qu'on a initialement, à savoir la proportion minéralisée à une coupure donnée*). La quantité de roche située entre deux teneurs est calculée à partir des proportions du Tableau 2 multipliées par la densité du bloc en faisant simplement une différence entre les proportions à deux coupures différentes pour avoir la proportion comprise entre deux teneurs données. Cette quantité est ensuite affectée d'une teneur dite médiane, qui est simplement la moyenne entre les deux coupures utilisées (voir Tableau 3).

Tableau 2 : attributs initiaux

| coupure | proportion |
|---------|------------|
| 0.3     | 0.2        |
| 0.5     | 0.446      |
| 0.8     | 0.666      |
| 1.3     | 1.000      |

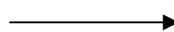


Tableau 3 : attributs après krigeage d'indicatrice

| Teneur médiane | Parcelle Whittle |
|----------------|------------------|
| 0              | 0.2*ρ            |
| 0.4            | 0.246*ρ          |
| 0.65           | 0.220*ρ          |
| 1.05           | 0.333*ρ          |

Cette méthode présente le gros défaut de ne pas tenir compte d'une donnée supplémentaire que l'on a dans le cas d'Imouraren, à savoir la teneur réelle de la

proportion minéralisée (On voit dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** que les valeurs de teneur ne sont pas nécessaires au calcul). Il n'est pas possible dans cette méthode de définir une autre teneur pour l'exportation par *Indicator Kriged*. Cette méthode évalue donc de façon approximative la quantité de métal présente dans chaque bloc. Les calculs de fosses qui en résulteront ne seront donc pas justes. Cette méthode est cependant celle qui est la plus proche de la réalité. Elle est par exemple utilisée sur le site de Somaïr.

### 1.3 Méthodes d'optimisation

#### 1.3.1 Optimisation sur la teneur moyenne des blocs

Cette méthode est la plus intuitive et la première qui vient à l'esprit, mais également la plus fautive.

Lorsque deux types de traitement sont entrés dans Whittle, chacun avec ses coûts et son rendement, et que les deux s'appliquent au même type de roche, alors leurs teneurs de coupure sont calculées ainsi que la teneur de transition à partir de laquelle l'un est plus rentable que l'autre. Lorsqu'on ne peut exporter qu'une seule teneur vers Whittle il semble logique de prendre les teneurs et proportion à 0,3‰ (chiffres contenant tout le métal récupérable). Si ce minerai est ensuite traité en fonction de ces deux traitements, Whittle considèrera alors la teneur moyenne du bloc 50x50x3 à coupure 0,3 pour décider si le bloc entier doit être traité en dynamique ou en statique. Ceci est la source d'une grosse erreur, puisque dans la pratique, les hautes teneurs présentes dans le bloc relèvent la moyenne et font traiter plus de blocs qu'il ne faudrait en dynamique.

En fait, seuls les blocs contenant vraiment peu de minerai ou uniquement du minerai pauvre auront une moyenne suffisamment basse pour être traités en statique. Dans tous les cas, le bloc entier est traité d'une façon unique sans discernement, alors que sur place en pratique, on peut faire des distinctions entre du minerai riche et pauvre à l'échelle du mètre.

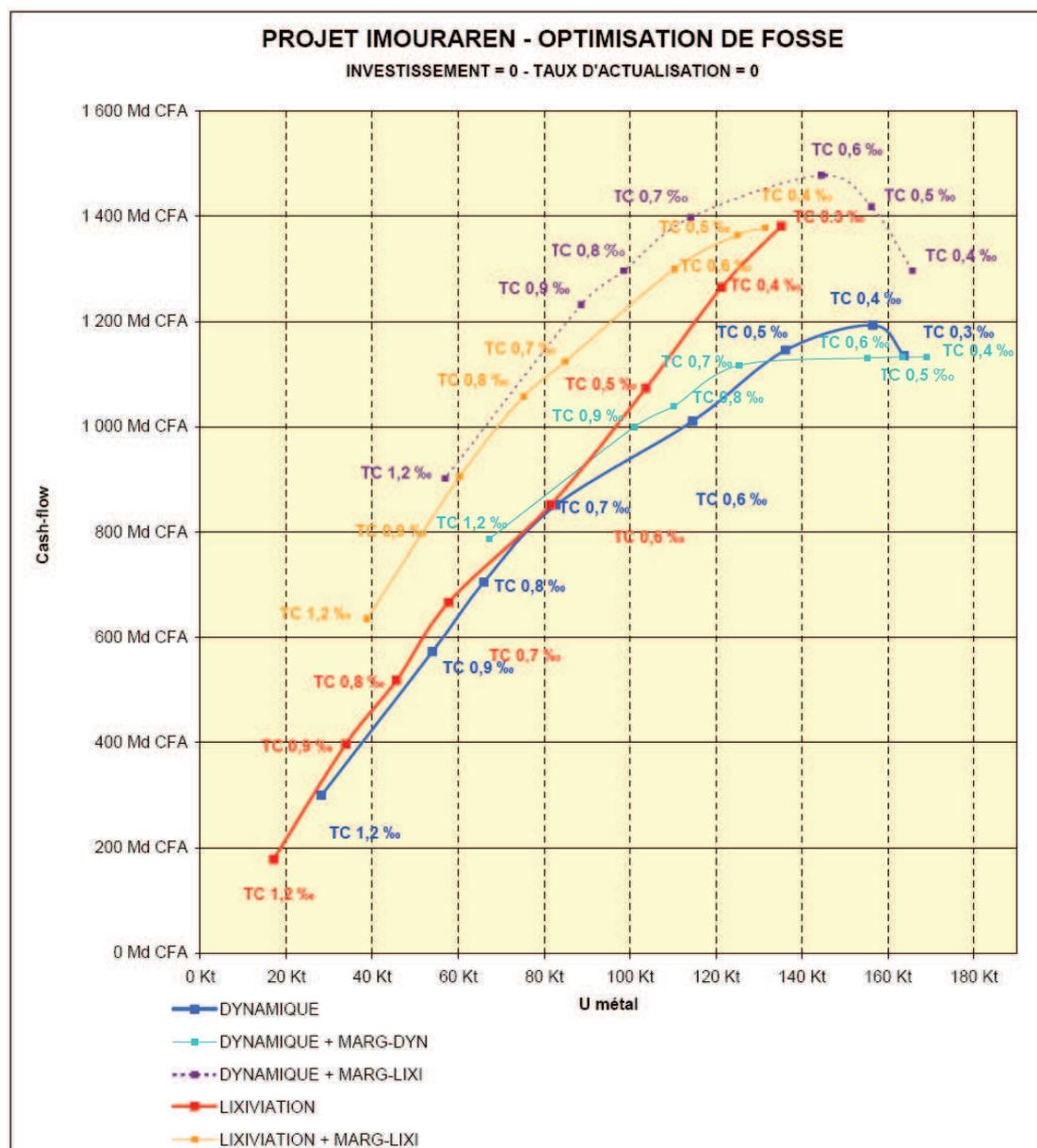
Un tel calcul n'est donc pas possible.

#### 1.3.2 Optimisation de fosse suivie de valorisation du minerai marginal

De façon à ne pas faire de moyenne sur de si gros blocs Areva procède par étapes pour valoriser le gisement.

- Un modèle est chargé sous Whittle avec les chiffres correspondant à une coupure donnée (teneur et proportion à la coupure 0,6‰ par exemple).
- Avec une seule teneur, il est possible de faire une optimisation simple en n'utilisant qu'un type de traitement (traitement dynamique par exemple)
- Une fois cette optimisation faite, la fosse trouvée est exportée vers Surpac, le modèle contenant tout le métal (donc avec toutes les coupures proportions et teneurs en attributs) est chargé. Ainsi on peut calculer la quantité de minerai marginal présent dans cette fosse, c'est-à-dire le minerai qui n'a pas été exporté vers Whittle initialement (la proportion du bloc minéralisée entre 0,3‰ et 0,6‰ dans notre exemple)
- Sous Excel, on calcule ce que rapporterait cette quantité de minerai traitée selon un traitement spécifique (ici le traitement Statique par exemple). On connaît le rendement et les coûts de chaque traitement, ce calcul est donc faisable.
- La valeur de ce marginal est additionné à la valeur de la fosse sortie de Whittle.

- On en déduit ainsi le cash-flow généré
- Le calcul est répété pour chaque valeur de coupure (0.3/ 0.4/ 0.5/ 0.6/ 0.7/ 0.8/ 0.9/ 1.2) et pour chaque combinaison de traitements (principal et marginal).
- On obtient finalement la Figure 12 ci-dessous :

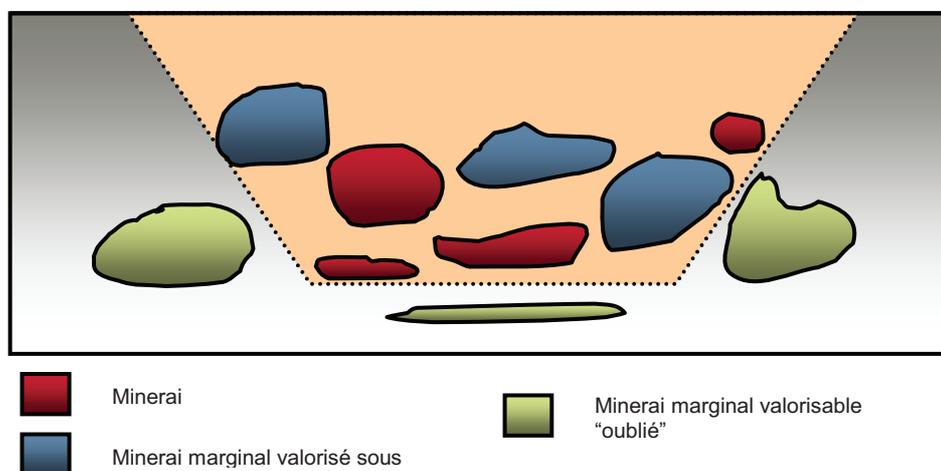


La conclusion que l'on tire de la Figure 12 ci-dessus, si on ne compare que les marges brutes est qu'il faut traiter l'ensemble du minerai au-delà de 0,6‰ de teneur en dynamique et qu'il faut traiter le minerai dont la teneur est comprise entre 0,3‰ et 0,6‰ en lixiviation statique. La fosse la meilleure apparaît être celle obtenue en optimisant sous Whittle un modèle coupé à 0,6‰ avec un traitement dynamique. Cette méthode permet d'obtenir des fosses plus riches, moins grandes et donc moins risquées à l'exploitation (si le prix de l'Uranium vient à chuter). Le marginal à l'intérieur est valorisé en plus mais c'est la fosse calculée sous Whittle qui est

considérée optimale avec cette méthode. L'ensemble des études de pré faisabilité d'Imouraren a été conduit en se basant sur le contour de la fosse TD\_06 (traitement dynamique, coupure 0,6).

Ces calculs ne prennent en compte que le minerai riche et « oublient du marginal », puisque l'optimisation sous Whittle n'a pas été faite avec plusieurs parcelles (Riche et Pauvre) et à traitement unique (la partie 0,3‰-0,6‰ rentable en traitement statique n'a pas été prise en compte dans le calcul de la fosse). Mais surtout, la Figure 12 suggère une teneur de transition TD/TS qui est fautive (un calcul mené plus loin indique que la teneur de transition TD/TS est de **0,74‰**). Ceci est dû au calcul de la fosse par Whittle avec une haute teneur de coupure.

La fosse calculée à 0,7‰ en Dynamique par exemple est trop petite, et le calcul du marginal inclus dans cette fosse sera faux puisqu'il reste encore beaucoup de minerai pauvre hors de la fosse. Les blocs hors de cette fosse, coupés à 0,7‰ ne sont pas rentables et la fosse est donc trop petite.



**Figure 13 : fosse calculée sous Whittle à  $t_c=0,7\text{‰}$**

Le minerai non rentable à coupure 0,7‰ est oublié hors de la fosse, c'est pourquoi on a un cash-flow inférieur pour la fosse TD\_07+Marg\_TS alors qu'en théorie il devrait être supérieur (Figure 12).

D'autres commentaires peuvent être faits sur la Figure 12, comme le fait que le prix d'une usine de traitement dynamique ne soit pas pris en compte. (Dans ce cas, sur la courbe rouge, le point à  $t_c_{03}$  pourrait être plus haut que le sommet violet, car en traitement statique seul, on n'a pas de dépenses liées à l'usine).

Des problèmes de ventilation des coûts fixes sont également posés, puisque l'ensemble des charges fixes, rapportées à la tonne d'uranium n'est appliqué qu'au métal extrait avec Whittle, c'est-à-dire au minerai riche. Le minerai marginal ne supporte pas de frais fixes et est donc trop favorisé. Il faudrait répartir les charges fixes de manière plus fine, mais le projet n'en est encore qu'à la pré faisabilité et cela sera fait dans l'étude de faisabilité.

## 2 Calcul de teneurs de coupure

### 2.1 Données économiques

Les données économiques sont les valeurs les plus sensibles déterminant la forme de la fosse finale et les teneurs de coupure du minerai.

Plusieurs problèmes se posent lorsque l'on doit estimer les coûts d'extraction de traitement et le prix de vente du métal.

L'ensemble des valeurs est tiré de l'exploitation à ciel ouvert de Somaïr. Le projet Imouraren n'en est qu'à l'étape de pré faisabilité et les coûts envisagés pour cette exploitation dépendent de cette même pré faisabilité (décision d'installer une usine, dimensionnement des parcs d'engins d'extraction, etc...). Les coûts sont donc assez imprécis, ce qui n'a pas réellement d'importance vu que l'objet de cette étude est le développement d'une méthode d'optimisation, qui ne dépend pas du modèle de coûts, ni du gisement.

En ce qui concerne le prix du métal, la valeur que l'on doit utiliser est 30 \$/lb de  $U_3O_8$  alors que le cours de l'Uranium en Juin 2007 se situe aux alentours de 120 \$/lb  $U_3O_8$ . Utiliser un chiffre plus proche de la réalité conduirait à avoir des fosses beaucoup plus grandes que toutes celles que l'on a calculées jusqu'à présent (sachant que déjà, à 30\$/lb, la très grande majorité du gisement est rentable). L'étude de faisabilité se fera avec un chiffre de 50\$/lb.

La ventilation des frais fixes peut poser problème lors du calcul des teneurs de coupure puisqu'elle fait varier les prix de chacun des traitements. Les frais fixes s'élèvent à un certain montant par an (voir Tableau 4). Afin de pouvoir les ventiler sur les différentes sources de dépense, on a utilisé le chiffre de 4000 tonnes de production d'Uranium métal par an. Ce chiffre est actuellement une limite que s'est fixé Areva pour la production régulière du site d'Imouraren.

Les coûts qui ont été utilisés dans cette étude sont les suivants :

Tableau 4 : Modèle de coûts utilisé

| opération   | unité   | TD         | TS         |
|---|---------|------------|------------|
| rendement   | %       | 95%        | 70%        |
| coût de traitement minerai                                      | FCFA/t  | 12 291     | 5 741      |
| Frais fixes (on a supposé une prod. de 4000 tU/an)              | FCFA/tU | 2 597 565  |            |
| coût de traitement métal  | FCFA/tU | 2 231 550  | 1 644 300  |
| coût de traitement métal (si frais fixes supportés entièrement) | FCFA/tU | 4 829 115  | 4 241 865  |
| coût d'extraction minerai                                       | FCFA/t  | 723        | 723        |
| prix de vente métal   | FCFA/tU | 37 773 540 | 37 773 540 |
| coût de vente métal   | FCFA/tU | 860        | 860        |

La ventilation des frais fixes s'est faite sur les tonnes de métal produites. C'est le chiffre de 2,60<sup>3</sup> Millions de Francs CFA par tonne que l'on peut lire dans le Tableau 4. Sachant que toute tonne de métal produite devra supporter sa part de frais fixes, on ajoute au coût de traitement du métal la quantité de frais fixes. Ainsi la ventilation se fera automatiquement sur l'ensemble du métal produit au prorata du nombre de tonne produites par chaque traitement.

<sup>3</sup> 37 773 540 FCFA/tU = 30\$/lb $U_3O_8$  - redevances

Si 3000 tonnes sont produites en dynamique et 1000 en statique, alors 75% des frais fixes seront attribués au traitement dynamique et 25% au traitement statique.

## 2.2 Formules utilisées pour les teneurs de coupure

### 2.2.1 Teneur de coupure à l'entrée de l'usine :

On calcule toujours la teneur de coupure une fois le minerai extrait. Il s'agit de savoir à partir de quelle teneur en Uranium le traitement du minerai est rentable. On ne comptera donc dans les coûts que ce qui est lié au traitement du minerai et métal, ainsi qu'à sa vente.

Soit X la teneur seuil à partir de laquelle traiter le minerai extrait sera rentable. On cherche donc à équilibrer les coûts de traitement (qui dépendent de la teneur) et les revenus générés par la vente du métal (qui dépendent aussi de la teneur). Le calcul se fait sur une tonne de minerai :

|   |   |
|---|---|
|   | <b>Coût de traitement = Revenu</b>  |
| ⇔ | $\text{coût traitement Minerai} + X * \text{coût de traitement métal} = X * \text{rendement} * (\text{prix de vente métal} - \text{coût de vente métal})$     |
| ⇔ | $X = \frac{\text{coût traitement Minerai}}{(\text{rendement} * (\text{prix de vente métal} - \text{coût de vente métal}) - \text{coût de traitement métal})}$ |

Cela donne avec les coûts du Tableau 4 pour les traitements statiques (lixiviation *in situ*) et dynamiques :

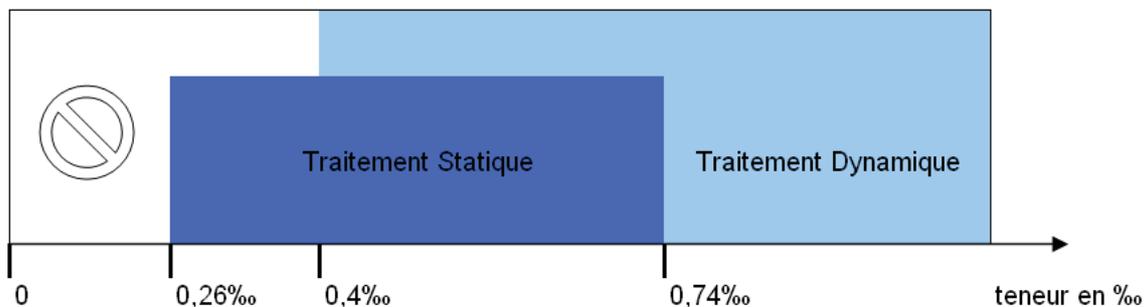


Figure 14: Schéma des valeurs des teneurs de coupure

Le traitement par lixiviation est rentable à partir d'une teneur de 0,26‰ et jusqu'à une teneur de 0,74‰ à partir de laquelle c'est le traitement dynamique qui devient plus rentable. Ce dernier est par ailleurs rentable à partir d'une teneur de 0,40‰.

Pour calculer la teneur à partir de laquelle le TD (Traitement dynamique) est plus favorable, on a appliqué un calcul similaire au précédent :

On cherche la teneur  $X_{lim}$  telle que

$$\text{Revenu TD} - \text{coûts TD} = \text{Revenu TS} - \text{coûts TS}$$

Toutes ces valeurs dépendant de la teneur, on trouve  $X_{lim}$  :

$$X_{\text{lim}} = \frac{(\text{coût trait TD} - \text{coût trait TS})}{[(\text{prix vent.} - \text{coût vent}) * (\text{rend. TD} - \text{rend. TS}) - (\text{coût métal TD} - \text{coût métal TS})]}$$

## 2.3 Calcul Whittle :

Les résultats ci-dessus sont confirmés par les calculs de Whittle. Lors d'une optimisation, Whittle calcule les teneurs de coupure à partir des données économiques et celles-ci sont disponibles dans un rapport exécution

### 2.3.1 Traitement dynamique

Un premier calcul a été fait en n'utilisant qu'une méthode de traitement, la méthode dynamique.

| Ore selection method: <b>Cut-off</b> |            |                                     |         |            |           |        |
|--------------------------------------|------------|-------------------------------------|---------|------------|-----------|--------|
| Processing Paths                     |            |                                     |         |            |           |        |
| Name                                 | Proc.Cost  | Cut                                 | Recov.  | Raised cut | Low'd cut | Thresh |
| TD ORE                               | 12291 f*   |                                     |         |            |           |        |
| u03 (kilo)                           | 4830.07 f* | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.95 f* | 000        |           | 000    |

Figure 15 : coûts implémentés en TD

La fosse optimale, correspondant à un *revenue factor* de 1,00, contient

Tableau 5 : Résultat de l'optimisation en TD

| Pit number | Rock extracted (t) | Ore extracted (t) | Rock/Ore ratio | Metal recovered (kg) | Cash Flow (MFCFA) |
|------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------|-------------------|
| 25         | 1 709 757 937      | 142 121 976       | 11,03          | 101 406 220          | 782 444           |

Dans le rapport de Whittle, on retrouve bien la teneur de coupure associée à la méthode de traitement dynamique calculée<sup>4</sup> :

```

Pit 25 (P)      which is optimal for
=====      a Revenue Factor of          1.00

-----
Rock Process          Cut-off
Type  Method  Element  /over
-----
MTM   TD      u_03    0.41 kilo/tonne
-----

```

### 2.3.2 Traitement Statique

On lance le programme sur le même modèle, avec cette fois le traitement statique :

<sup>4</sup> Comme pour le traitement dynamique, la différence de 0,01% dans la teneur de coupure vient d'un arrondi de Whittle et du fait que les coûts de traitement entrés dans Whittle ne sont pas exactement les mêmes que ceux utilisés pour le calcul de la coupure (la coupure a été calculée ultérieurement avec des frais fixes recalculés à la main)



Ore selection method: **Cut-off**

| Processing Paths |           |   |        |                       |           |        |
|------------------|-----------|---|--------|-----------------------|-----------|--------|
| Name             | Proc.Cost | Cut   | Recov. | Raised cut            | Low'd cut | Thresh |
| TS MTM           | 5741      | <i>f<sub>sc</sub></i>                                     |        |                       |           |        |
| u_03 (kilo)      | 4242.57   | <i>f<sub>sc</sub></i> <input checked="" type="checkbox"/> | 0.70   | <i>f<sub>sc</sub></i> | 000       | 000    |

Figure 16 : implémentation des coûts TS

La fosse obtenue présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 6 : Résultats de l'optimisation TS

| Pit number | Rock extracted (t) | Ore extracted (t) | Rock/Ore ratio | Metal recovered (kg) | Cash Flow (MFCFA) |
|------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------|-------------------|
| 27         | 1 895 578 406      | 152 710 651       | 11,41          | 79 419 136           | 750 965           |

Le rapport Whittle confirme la teneur de coupure calculée plus haut

```

Pit 27 (R)      which is optimal for
=====      a Revenue Factor of          1.00

-----
Rock Process           Cut-off
Type Method Element   /over
MTM   TS      u_03     0.27 kilo/tonne
-----

```

On note que le traitement de la fosse entière est plus rentable en traitement dynamique, ce qui est dû au fait qu'à peu près la moitié du minerai est de teneur supérieure à la coupure TD/TS et qu'il vaut mieux perdre de l'argent sur le minerai pauvre (tout TD) que de traiter en statique du minerai riche (TS a un mauvais rendement)

### 2.3.3 Traitement dynamique + statique

Un troisième calcul enfin a été mené avec les deux méthodes de traitement disponibles, les résultats sont les suivants :

Ore selection method: **Cut-off**

| Processing Paths |           |   |        |                       |           |        |
|------------------|-----------|---|--------|-----------------------|-----------|--------|
| Name             | Proc.Cost | Cut   | Recov. | Raised cut            | Low'd cut | Thresh |
| TD ORE           | 12291     | <i>f<sub>sc</sub></i>                                     |        |                       |           |        |
| u03 (kilo)       | 4830.07   | <i>f<sub>sc</sub></i> <input checked="" type="checkbox"/> | 0.95   | <i>f<sub>sc</sub></i> | 000       | 000    |
| TS ORE           | 5741      | <i>f<sub>sc</sub></i>                                     |        |                       |           |        |
| u03 (kilo)       | 4242.57   | <i>f<sub>sc</sub></i> <input checked="" type="checkbox"/> | 0.7    | <i>f<sub>sc</sub></i> | 0         | 0      |

Les teneurs de coupure sont bien celles attendues

```

Whittle Four-X                               OPTIMIZATION                               Page 80
Rev 3.40                                     Licensed for use by Compagnie Generale   10:29
                                             Des Matieres Nucleaires                04-MAY-07
-----

Pit 27 (R)  which is optimal for
=====    a Revenue Factor of          1.00

-----
Rock Process      Cut-off
Type Method Element /over
MTM   TD   u_03    0.74 kilo/tonne
      TS   u_03    0.27 kilo/tonne
-----

```

Les valeurs et quantité d'Uranium et de roche contenus dans la fosse obtenue après cette optimisation ne sont pas pertinentes puisque l'optimisation réalisée n'est pas correcte. Elle avait pour but de confirmer que les teneurs de coupure utilisées par Whittle étaient les mêmes que celles calculées.

Calculer la forme de la fosse la plus rentable avec les deux types de traitement sous Whittle (et avec un modèle à une seule parcelle par bloc) n'aurait pas de sens puisque le choix de traiter le bloc de façon statique ou dynamique se ferait par sélection sur la teneur moyenne de ce bloc (qui a une taille de 50x50x3m). Une sélection beaucoup plus fine doit être faite pour obtenir un chiffre réaliste.

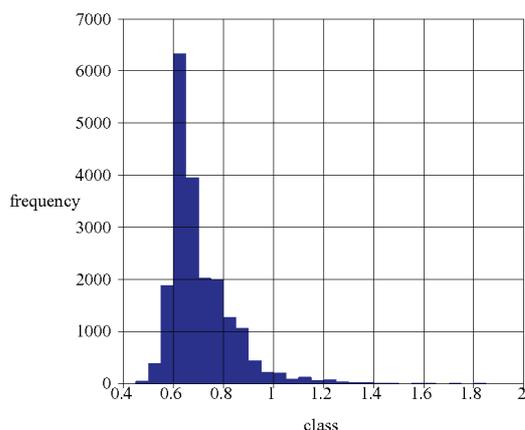


Figure 17 : répartition des teneurs en Uranium sur Imfout à la coupure 0,3‰

| File                     | Imou Infout.mdl |
|--------------------------|-----------------|
| Variable                 | u_03            |
| Number of samples        | 20290           |
| Minimum value            | 0.450           |
| Maximum value            | 1.830           |
| 25.0 Percentile          | 0.620           |
| 50.0 Percentile (median) | 0.670           |
| 75.0 Percentile          | 0.750           |
| Mean                     | 0.705           |
| Variance                 | 0.017           |
| Standard Deviation       | 0.130           |
| Coefficient of variation | 0.184           |

Tableau 7 : données statistiques sur Imfout à la coupure 0,3‰

La teneur moyenne sur le gisement étant de 0,70‰ et plus de la moitié des blocs a une teneur inférieure à cette moyenne comme le montre la Figure 17. Cela signifie que les teneurs au dessus de la moyenne sont hautes. Les traiter en traitement statique, dont le rendement est 0,7‰ fait perdre beaucoup de métal et donc d'argent. On remarque également que la grande majorité des blocs a une teneur comprise entre 0,6 et 0,8 : d'après le Tableau 7, 50% des blocs sont de teneur moyenne supérieure à 0,62 et inférieure à 0,75. Une variation de la teneur de coupure aura donc des effets très sensibles sur le résultat car la variance de la teneur est faible.

### 3 Principe de la méthode d'exportation par parcelles

**Note : sous-blocs et parcelles**

Dans toute cette partie la dénomination sous-bloc fera référence à des blocs Surpac issus de plus gros blocs par la méthode de « reblocking ». Pour Surpac, il s'agit de blocs normaux. Ils sont appelés sous-blocs car ils sont un simple découpage géométrique du bloc d'origine.

Dans toute cette partie la dénomination parcelle désignera une partie d'un bloc Whittle, sans signification géométrique. Pour Whittle, un bloc ne peut être composé que de fractions massiques, dont les teneurs peuvent être différentes. Une parcelle n'est donc pas localisée dans l'espace.

Les sous-blocs Surpac sont destinés à devenir des parcelles sous Whittle une fois l'exportation faite.

La méthode s'appuie sur le fait que lors d'une exportation standard de Surpac à Whittle, si on exporte des petits blocs en blocs plus grands, alors ceux-ci deviennent des parcelles de ces grands blocs dans Whittle. Par exemple, si on a un modèle dont les blocs font 25x25x3 m dans Surpac, et qu'on exporte ce modèle vers Whittle en demandant des blocs de 50x50x6, alors chacun des 8 blocs 25x25x3 formera une parcelle du bloc 50x50x6 formé par les 8 petits blocs. On peut faire cette opération avec plus ou moins de blocs, selon le nombre de parcelles dont on peut avoir besoin pour chaque bloc de Whittle<sup>5</sup>.

On découpe donc au préalable tous les blocs de minerai dans Surpac, grâce à la fonction de sous-blocking. C'est une division artificielle, dans la mesure où les sous-blocs ont exactement les mêmes caractéristiques que le gros bloc dont ils sont issus. Le but de cette opération est souvent d'obtenir un découpage plus précis d'une fosse, ou de mieux modéliser les pentes de la fosse. Ici on utilise les petits blocs formés afin de séparer les différents types de minerai qu'ils contiennent. Si le bloc d'origine contient plusieurs proportions et teneurs en fonction d'une coupure, on peut séparer dans chacun des petits blocs la quantité de minerai contenue dans chaque tranche de teneur.

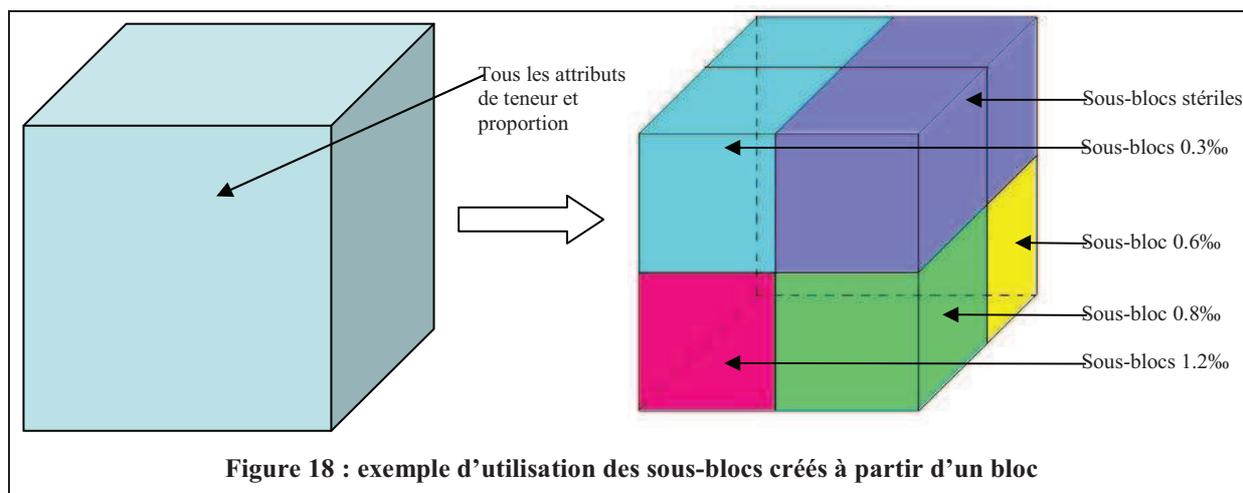


Figure 18 : exemple d'utilisation des sous-blocs créés à partir d'un bloc

<sup>5</sup> Cependant, le nombre de parcelles par bloc est limité à 50 pour Whittle 4D et à 99 pour 4X.

Dans le cas d'Imouraren, on se retrouve dans une situation du type de la Figure 18 : on découpe le bloc en 8 blocs qu'on « remplit » de ce que l'on veut séparer (ici, on fait des tranches de teneur). Chacune des parcelles a une densité différente, dépendant de la quantité initialement présente dans le gros bloc (car Whittle utilise des données de masse).

Une fois cette division faite et les parcelles créées, on exporte le modèle vers Whittle avec une taille de bloc égale à celle des gros blocs d'origine. Ainsi, l'exportateur de Surpac va réunir les sous blocs en parcelles de plus gros blocs.

On obtient le résultat voulu, à savoir 8 parcelles de poids différents composées de roches du choix de l'utilisateur pour chaque bloc. Dans le cas d'Imouraren, on divise chaque bloc en 3 parcelles :

1. Une parcelle contenant tout le stérile du bloc
2. Une parcelle contenant le minerai pauvre dont la teneur est inférieure à 0,74‰ qui sera traitée en lixiviation statique
3. Une parcelle contenant le minerai riche (teneur supérieure à 0,74‰ qui sera traité de façon dynamique)

Les parcelles 2 et 3 ont des types de roches différents, et il suffit ensuite de déclarer à Whittle un type de traitement pour chaque type de roche. Dans la pratique, on fixe la limite à 0,7, car les tranches de minerai ne sont définies que par pas de 0,1‰.

## 4 Différentiation des sous blocs dans Surpac

Toutes les valeurs chiffrées sont tirées de l'exemple du gisement d'Imouraren, mais sont bien entendu généralisables à tout modèle de blocs conçu de la même manière.

### 4.1 Modèle initial

Le modèle de blocs initial est composé de blocs de taille 50x50x3 mètres. Les attributs de chaque bloc dans Surpac sont :

- densité (ou specific gravity) : 2,15 dans tout le modèle
- proportion03 : proportion du bloc qui est minéralisée à la coupure 0,3‰
- proportion04, proportion05, ..., proportion12. (les proportions sont décroissantes avec la coupure)
- u03 : teneur moyenne de la proportion minéralisée du bloc à la coupure 0,3‰
- u04, u05, ..., u12 (les teneurs sont croissantes avec la coupure)
- rock\_code : code d'un maximum de 4 lettres représentant le type de roche du bloc. Ici, soit MTM (minerai tranche minéralisée), STM (stérile tranche minéralisée), DEC (découverte), IRHA (terrains superficiels)

### 4.2 Opération de sous blocking

Surpac possède un outil « Reblock » permettant de redéfinir la taille de bloc par défaut. Il existe deux tailles de blocs : user block size et minimum block size. La taille minimum est définie au moment de la création du modèle et ne peut plus être modifiée. Il faut bien faire attention au moment de la définition du modèle à définir une taille minimum au moins deux

fois inférieure à la taille par défaut, de façon à pouvoir faire un sous-blocking exportable (Figure 19).

Il s'agit ici d'un gros problème de Surpac : on ne peut pas modifier la taille minimum des blocs dans le modèle, on ne peut ni ajouter ni retirer de blocs au modèle, on ne peut pas le faire pivoter (pour l'orienter sur les axes du repère de Surpac par exemple), ni le déplacer dans l'espace. Le modèle est figé, ce qui oblige à en créer un nouveau quand on veut faire une modification. (voir :Attribut « parceltype » et différenciation des sous-blocs)

| Block Model Geometry |         |            |     |            |        |     |
|----------------------|---------|------------|-----|------------|--------|-----|
| Min Coordinates      | Y       | 1997710.85 | X   | 324308.519 | Z      | 200 |
| Max Coordinates      | Y       | 2001460.85 | X   | 329308.519 | Z      | 701 |
| User block Size      | Y       | 50         | X   | 50         | Z      | 3   |
| Min. block Size      | Y       | 25         | X   | 25         | Z      | 1.5 |
| Rotation             | Bearing | -3.25      | Dip | 0          | Plunge | 0   |

Figure 19 : extrait d'un résumé de modèle Surpac (Imfout)

Il faut que la taille minimum de blocs soit 8 fois plus petite (2 fois dans chaque direction) car au moment de l'exportation vers Whittle, on ne pourra choisir les tailles que parmi des multiples de 2 de la taille par défaut en cours (Figure 20). On ne peut donc pas faire de sous blocs de 25x25x3 à partir des 50x50x3.

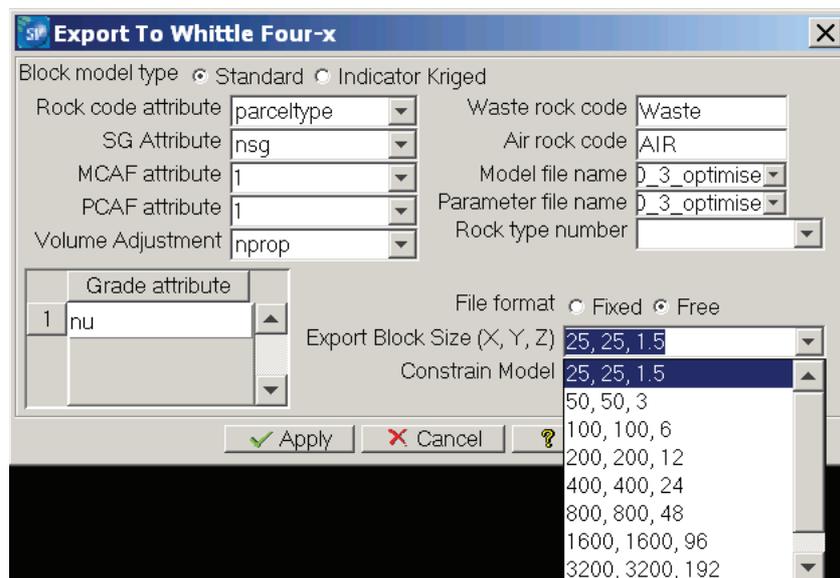


Figure 20 : tailles disponibles à l'exportation

Si on n'a besoin de que de 4 parcelles dans le modèle Whittle, on peut réunir les sous blocs deux par deux.

Tous les sous blocs créés possèdent exactement les mêmes attributs que le bloc d'origine dont ils sont issus, dimensions exceptées évidemment.

Problème posé :

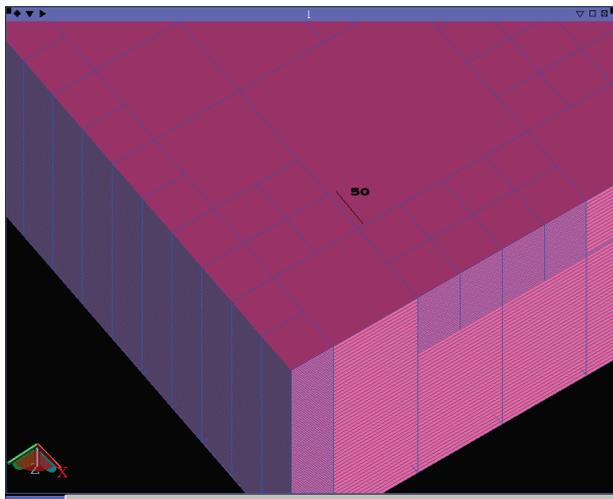


Figure 21 : Superblocks dans Surpac

Afin d'économiser de la mémoire, Surpac crée automatiquement des « Superblocs » dès lors que les caractéristiques de blocs juxtaposés sont identiques (Figure 21). Si huit blocs ont les mêmes caractéristiques (comme c'est souvent le cas dans le stérile, avec une masse volumique par défaut), un superbloc est créé : il contient  $2^3$ ,  $4^3$ ,  $8^3$ ,  $16^3$  etc... blocs et a les caractéristiques des blocs qu'il contient. Il devient alors impossible de faire référence à un des petits blocs contenus dans un tel superbloc car ils n'existent pas pour Surpac. Ce problème se pose lors de l'opération de sous blocking. En effet, les sous blocs créés (souvent 8) sont rassemblés en un superbloc de la taille initiale que l'on a voulu diviser (puisque

leurs caractéristiques sont communes). Toute référence à un bloc par ses coordonnées d'origine par exemple renvoie au superbloc, ce qui rend toute opération sur les sous blocs impossible.

Pour résoudre ce problème, on exporte une donnée du modèle sous forme de fichier \*.str (string = fil) qui contient, lui, tous les centres des petits blocs. On modifie ensuite ce fichier pour ajouter à chacun des centres une valeur qui sera différente de celle de ses 8 voisins (l'abscisse par exemple), puis on réimporte le fichier dans le modèle en créant un attribut fictif (appelé différenciation) qui sert uniquement à ce que Surpac ne groupe plus les blocs en superblocs.

### 4.3 Séparation du minerai en tranche de teneur

Afin de créer les parcelles adéquates pour Whittle, il faut au préalable connaître les teneurs de coupure des traitements du minerai. Ici on a un traitement dynamique et une lixiviation statique. Les teneurs de coupure sont expliquées dans la partie qui leur est consacrée, voici un rappel :

| Traitement du minerai          |       |
|--------------------------------|-------|
| Teneur seuil de rentabilité TD | 0,4‰  |
| Teneur seuil de rentabilité TS | 0,26‰ |
| Teneur limite TD/TS            | 0,74‰ |

Un fois ces teneurs calculées, on voit que seulement 3 parcelles seront nécessaires par bloc : une parcelle pour le minerai stérile, une pour le minerai dont la teneur est comprise entre 0,3‰ et 0,7‰ et une pour le minerai plus riche.

On suppose à partir de maintenant que tous les blocs ont été découpés (c'est-à-dire qu'on est parvenu à éliminer les superblocs de Surpac).

### 4.3.1 Attribut « parceltype » et différenciation des sous-blocs

Afin de différencier les sous-blocs les uns des autres, on leur attribue une valeur, appelée « parceltype », qui sera exportée sous Whittle à la place de l'attribut rock-type. On peut par exemple attribuer la valeur STE à la partie stérile, MINR au minerai riche et MINP au minerai pauvre.

On choisit ensuite la localisation de chacune des parcelles dans le bloc de Surpac. Le choix fait ici est le suivant :

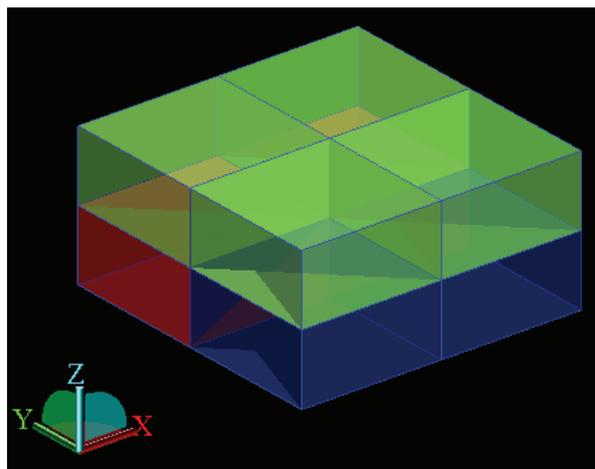


Figure 22 : localisation des sous blocs minéralisés

En prenant ce bloc à l'origine du modèle et de dimensions 50x50x3 on assigne à parceltype les valeurs suivantes :

- dans les sous-blocs bleus ( $Y < 25$ ,  $Z < 1,5$ ) **MINR**
- dans les sous-blocs rouges ( $Y > 25$ ,  $Z < 1,5$ ) **MINP**
- dans les sous-blocs verts ( $Z > 1,5$ ) **STE**

Pour effectuer cette opération de manière automatique sur tous les blocs et les localiser, on utilise les coordonnées (X, Y, Z) de leur origine (l'origine d'un bloc est le point inférieur gauche, de coordonnées les plus basses). L'origine du modèle a pour coordonnées ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ). Il est nécessaire que les blocs soient parallèles aux axes de référence, pour que les coordonnées d'un bloc au suivant puissent être utilisées de façon simple. Si le modèle est désaxé, on a deux possibilités :

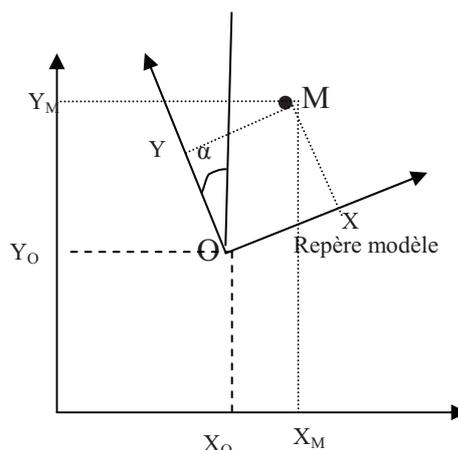
- Soit changer de repère. Il faut exporter les données du modèle dans un fichier string (\*.str) qui contiendra toutes les informations relatives aux attributs des blocs du modèle d'origine. Puis créer un modèle vierge, de même dimensions situé à l'origine des axes de Surpac et aligné sur ceux-ci. Ensuite, on modifie le fichier \*.str en le faisant tourner de l'angle approprié, puis en le translatant vers l'origine, puis on l'intègre au modèle de bloc vierge afin d'y incorporer les données. Cette manipulation peut prendre un peu de temps. Surpac n'est en effet pas capable de modifier un modèle de blocs. (ni changer sa taille, ni sa position...).

- Soit utiliser les formules de changement de base pour passer du repère du modèle (axes selon le modèle, origine au coin inférieur gauche) au repère de Surpac (repère dans lequel sont données toutes les coordonnées). On ajoute ces formules à celles présentées plus loin. Soit un point M de coordonnées ( $X_M, Y_M, Z_M$ ) dans le repère Surpac. On suppose que le modèle a pour origine  $O(X_0, Y_0, Z_0)$  et est orienté d'un angle  $\alpha^6$  par rapport au repère de Surpac.

Coordonnées d'un point M( $X_M, Y_M$ ) dans le repère du modèle :

<sup>6</sup> **Attention** : Surpac utilise les angles géographiques. Quand un angle de  $-10^\circ$  est indiqué par Surpac, cela correspond à  $\alpha=10$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (X_M - X_O) \cos(\alpha) - (Y_M - Y_O) \sin(\alpha) \\ (Y_M - Y_O) \cos(\alpha) - (X_M - X_O) \sin(\alpha) \\ Z_M - Z_O \end{pmatrix}$$



On travaille ici dans le repère du modèle. Les valeurs X et Y ci-dessus sont à remplacer par celles ci-dessus dans le cas où l'on n'a pas procédé à l'opération de changement de repère.

Ayant un nombre pair de petits blocs dans toutes les directions du modèle, on peut écrire :

$Y \equiv 0 \pmod{50}$  pour les blocs bleus.

C'est-à-dire que le reste de la division de la distance du petit bloc à l'origine selon l'axe des ordonnées par 50 est nul.

En cumulant ces expressions, on arrive à désigner tout sous bloc d'un bloc initial.

#### Généralisation :

Si tous les blocs (de dimensions  $a*b*c$ ) sont divisés en  $n^3$  sous blocs, alors le sous-bloc situé en position  $(i,j,k)$  dans le bloc et dont l'origine a pour coordonnée  $X_i, Y_j, Z_k$  vérifie :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i \equiv \frac{a(i-1)}{n} \pmod{a} \\ Y_j \equiv \frac{b(j-1)}{n} \pmod{b} \\ Z_k \equiv \frac{c(k-1)}{n} \pmod{c} \end{array} \right.$$

On écrit ainsi l'algorithme suivant pour affecter les valeurs souhaitées à l'attribut parcelltype de nos sous-blocs (on crée l'attribut parcelltype dans Surpac, puis on utilise la fonction Block Maths pour entrer l'expression) :

| Langage simple  | Langage Surpac   |
|---|--|
| <pre> pour (tous les blocs de mineraïs) faire   si [ Z ≡ 0 (3) ]     alors si [ Y ≡ 0 (50) ]       alors parcelltype vaut MINR       sinon parcelltype vaut MINP     fin si   sinon parcelltype vaut STE   fin si fin pour </pre> | <pre> iif(rock_type == "MTM",   iif(MOD(_zorg,3) == 0,     iif(MOD(_yorg,50) == 0,       "MINR","MINP"),     "STE"),   rock_type) </pre> |
|   | * dans ce cas, on a pris 0 pour origine du   |

*pour* (les autres blocs) *faire*  
 parceltype vaut rock\_type  
*fin pour*

modèle (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub> = 0)

### Langage Surpac

*\*Voici à titre d'exemple une formule avec un changement de repère.*

```
iif(rock_type=="MTM",
  iif(MOD((_zorg-200),3)==0,
    iif(MOD(((_yorg-1997710.85)*COSD(3.25)-(_xorg-324308.519)*SIND(3.25)),50)==07,
      "MINR","MINP"),
    "STE"),
  rock_type)
```

Une fois ces valeurs attribuées, on peut répartir le minerai du bloc initial par tranches de teneur par exemple, selon l'attribut parceltype des sous-blocs.

### 4.3.2 Nouvelle teneur

La limite de teneur est fixée à 0,7 par approximation à cause de la limite de précision du modèle. Les valeurs de teneur et proportions sont données pour chaque coupure par pas de 0,1%.

Voici l'exemple pour un bloc des attributs initiaux :

| Attributs initiaux |      |              |      |
|--------------------|------|--------------|------|
| proportion03       | 0.22 | proportion07 | 0.07 |
| u03                | 0.65 | u07          | 1.04 |
| Masse vol. : ρ     | 2.15 | rock_type    | MTM  |

**Tableau 8:valeurs initiales du bloc Surpac**

Soit p<sub>x</sub> la proportion du bloc minéralisée à la coupure x.

Soit u<sub>x</sub> la teneur moyenne de cette partie.

Soit p<sub>xy</sub> la proportion du bloc minéralisée entre les teneurs x et y

Soit u<sub>xy</sub> la teneur moyenne de cette partie.

Alors la masse de métal dans le bloc à la coupure x est :

$$M_x = u_x p_x \rho V$$

On a donc, (si  $x < y$ ) :

$$M_{xy} = u_x p_x \rho V - u_y p_y \rho V$$

⇔

$$u_{xy} p_{xy} = u_x p_x - u_y p_y$$

<sup>7</sup> Attention : en pratique, à cause des arrondis que fait Surpac sur les fonctions trigonométriques, le résultat ne fait jamais exactement 0 mais est souvent compris entre -1 et 1. Pour que les blocs de MINR soient créés, on peut changer la condition [Expression]==0 en [Expression]+0.1<1 par exemple. Les arrondis qui auraient donné un reste de 49,999 dans la division par 50 par exemple vont maintenant donner un reste de 0,0999.

On a aussi logiquement :

$$p_{xy} = p_x - p_y$$

On en déduit :

$$u_{xy} = \frac{p_x u_x - p_y u_y}{p_x - p_y}$$

On peut ensuite définir dans Surpac ces valeurs pour chaque sous-bloc en fonction de la valeur de l'attribut « parceltype »

On crée un nouvel attribut que l'on nommera par exemple « nu » (pour Nouvelle teneur d'Uranium) qui sera la teneur moyenne de la partie du bloc initial contenue dans le sous bloc.

Cela donne l'algorithme suivant :

| Langage simple  | Langage Surpac   |
|---|--|
| <pre> Si parceltype vaut MINR Alors nu = teneur07 sinon si parceltype vaut MINP     alors nu = <math>\frac{\text{proportion03} * u03 - \text{proportion07} * u07}{\text{proportion03} - \text{proportion07}}</math>     sinon nu = 0     fin si fin si </pre> | <pre> iif(parceltype == "MINR",u_07, iif(parceltype=="MINP",(proportion03*u03-proportion07*u07) /(proportion03-proportion07), 0)) </pre> |

### 4.3.3 Nouvelle proportion

Il reste ensuite à conserver les proportions de chacune de ces futures parcelles. En effet, on a ici créé des sous blocs avec un type de roche spécifique et une teneur spécifique mais chacun constitue une proportion spécifique du bloc d'origine, non représentative de la « vraie » proportion massique de la tranche de teneur.

On ne peut pas affecter de nouvelle valeur de proportion aux blocs car une fois exportée dans Whittle elle signifierait que seule une portion de ces sous blocs est minéralisée, et créerait une partie de stérile dans chacun des sous blocs. On crée donc un nouvel attribut, que l'on pourra par exemple nommer nprop (pour nouvelle proportion) dont la valeur sera 1 pour tous les blocs du modèle.

Cela signifie que tous les blocs seront constitués d'un unique matériau. Cela ne pose pas de problème pour les blocs de stérile de tranche minière, de découverte, de superficie (IRHA) ou d'air, car ils étaient déjà uniformes. Si cela n'est pas le cas, et qu'on a besoin de garder les proportions existantes dans les autres blocs, on peut simplement utiliser une expression de ce type :

```

Si rock_type vaut MTM
Alors nprop=1
Sinon nprop=0

```

La meilleure façon de garder les proportions de nos parcelles est donc de faire varier la masse volumique de celles-ci afin que leurs masses réelles soient conservées.

#### 4.3.4 Nouvelle densité

On suppose que la masse volumique ne dépend pas de la teneur en Uranium. Elle est la même pour le stérile et le minerai :  $\rho$ .

Supposons qu'on a un groupe de sous bloc représentant 25% du volume du bloc initial (dans ce cas la partie bleue de la Figure 22 par exemple) :  $\frac{V_i}{V} = 0,25$

Pour notre groupe de blocs on cherche la densité  $\rho_i$  à affecter à ce groupe telle que :

$$\rho_i V_i = M_i \text{ (où } M_i \text{ est la masse de ces parcelles).}$$

La densité étant constante, on a :

$$M_i = M * \textit{proportion massique de la tranche de teneur} = \rho V * p_{xy}$$

Soit dans le cas du minerai pauvre :

$$M_i = \rho V (\textit{prop03} - \textit{prop07})$$

Cela nous donne une densité :

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i} = \frac{\rho V (\textit{prop03} - \textit{prop07})}{V_i}$$

On implémente cette formule dans Surpac, après avoir créé un attribut « nsg » (pour New Specific Gravity) par exemple :

| Langage simple  | Langage Surpac  |
|---|---|
| <pre> si parceltype vaut MINR alors nsg = prop07*ρ*1/0.25 sinon si parceltype vaut MINP alors nsg = (prop03-prop07)*ρ*1/0.25 sinon si parceltype vaut STE alors nsg = (1-prop03)*ρ*1/0.5 sinon nsg = ρ fin si fin si </pre> | <pre> iif(parceltype == "MINR",p7*sg*4, iif(parceltype == "MINP",(p3-p7)*sg*4, iif(parceltype == "STE",(1-p3)*sg*2,sg))) </pre> |

## 5 Exportation vers Whittle

Une fois tous ces attributs créés, reste à les exporter vers Whittle en les substituant aux valeurs normales de la densité, teneur, etc....(voir Figure 23)

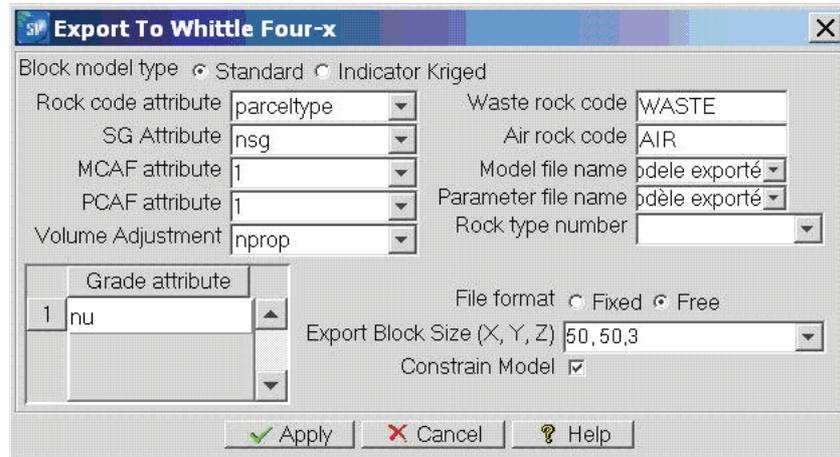


Figure 23 : Aperçu Surpac du module d'exportation vers Whittle

Tous ces attributs sont conçus pour conserver les valeurs de leurs équivalents initiaux (sg pour nsg, rock\_type pour parceltype, etc..) pour les blocs qui ne sont pas concernés par la création de parcelles Whittle (toute la découverte, le stérile de la tranche minière, la couche IRHA et l'air).

On obtient ainsi un fichier lisible par Whittle (en \*.mod) de cette forme :

```

...
2,2,2,8,1.000,1.000,68.8
2,2,2,MINR,2.4,2.5
2,2,2,STE,13.4,0.0
2,2,2,MINP,5.2,2.4
2,2,2,STE,13.4,0.0
2,2,2,MINR,2.4,2.5
2,2,2,STE,13.4,0.0
2,2,2,MINP,5.2,2.4
2,2,2,STE,13.4,0.0
1,1,3,0,0.000,0.000,0.0
1,2,3,0,0.000,0.000,0.0
2,1,3,0,0.000,0.000,0.0
2,2,3,0,0.000,0.000,0.0
1,3,1,4,1.000,1.000,68.8
1,3,1,STM,8.6,0.0
1,3,1,STM,8.6,0.0
1,3,1,STM,8.6,0.0
1,3,1,STM,8.6,0.0
...

```

Le bloc 2,2,2 contient 8 parcelles :

- 2 de MINR de teneur  $t=2,5\text{kg}/2,4\text{t} = 1,04\text{‰} = \text{teneur07}$
- 2 de MINP de teneur  $t = 0,46\text{‰} (= \text{nu}(\text{MINP}))$
- 4 de stérile de teneur  $t=0$
- La somme des masses des parcelles fait bien 68,8 (identique au bloc stérile 1,3,1)

L'air a été conservé (blocs 1,1,3 à 2,2,3)

Les blocs de STM ont également été conservés (stérile de tranche minière)

Figure 24 : extrait du fichier \*.mod avec parcelles

Le bloc 2,2,2 qui sert ici d'exemple faisait une taille de 4m\*4m\*2m ce qui d'après le Tableau 8 donne une masse de métal contenu de :

$$M_{\text{initiale}} = \text{teneur03} * \text{proportion03} * \rho * V = 9.84 \text{ kg}$$

Dans le bloc exporté que l'on a ici, on a une masse d'Uranium :

$$M_{\text{exportée}} = 2,4+2,4+2,5+2,5=9,8 \text{ kg}$$

La différence vient des arrondis faits par Surpac dans ses calculs. Par exemple les véritables valeurs d'une parcelle de MINR devraient être 2,408 et 2,504 (calculées à partir des valeurs contenues par le sous-bloc dans Surpac). Surpac ne laisse qu'un chiffre après la virgule dans les exportations qu'il fait vers Whittle. Ce paramètre ne peut pas être modifié, toutefois, pour des blocs de plus grande taille (ici on a un petit bloc de 4\*4\*2), on obtiendra une masse totale de 16125 pour laquelle un arrondi ne causera qu'une erreur d'environ  $\frac{1}{100000}$ . On peut de plus multiplier toutes les valeurs par  $10^n$  pour augmenter la précision si on le souhaite (on les divisera par la suite dans Whittle).

## 6 Erreurs d'approximation lors de l'exportation

### 6.1 Contenu du modèle sous Whittle

On a créé à partir d'un modèle Surpac un nouveau modèle Whittle à parcelles. On doit normalement retrouver les mêmes quantités de matériaux :

- Dans le modèle multiparcelles exporté depuis Surpac
- Dans le modèle monoparcelle à coupure 0,3‰ exporté depuis le même modèle Surpac.

| Num. | Rock-Type | tonne         |           |           |
|------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| 1    | STM       | 4 026 446 058 |           |           |
| 2    | DEC       | 3 772 658 678 |           |           |
| 3    | MTM       | 177 833 069   |           |           |
| 4    | IRHA      | 1 209 375 350 |           |           |
| Num. | Element   | Total Units   | Min.Grade | Max.Grade |
| 1    | u_03      | 130 088 881   | 0         | 1,83      |

Figure 25 : Quantité de roches présentes dans le modèle (monoparcelle)

| Num. | Rock-Type | tonne         |           |           |
|------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| 1    | STM       | 4 031 443 500 |           |           |
| 2    | DEC       | 3 768 751 125 |           |           |
| 3    | MINR      | 67 074 668    |           |           |
| 4    | STE       | 149 343 364   |           |           |
| 5    | MINP      | 110 758 652   |           |           |
| 6    | IRHA      | 1 209 375 000 |           |           |
| Num. | Element   | Total Units   | Min.Grade | Max.Grade |
| 1    | nu        | 130 088 802   | 0         | 2,04      |

Figure 26 : quantité de roches présentes dans le modèle (multiparcelles)

Sur l'ensemble du modèle d'Imfout exporté en multiparcelles, on retrouve les valeurs du modèle original à 0,3‰ exporté depuis Surpac en monoparcelle.

La différence principale se situe dans le minerai, puisque les blocs de nature MTM ont été séparés en parcelles STE, MINR et MINP. La somme de ces trois minerais n'équivaut pas au poids de MTM initialement présent dans le modèle.

Ceci s'explique par le fait que quand Surpac fait l'exportation monoparcelle simple vers Whittle, seule la partie minéralisée des blocs MTM (leur « proportion ») est considérée être en effet du MTM. Le reste, la partie stérile du bloc n'est pas définie dans le fichier modèle de

Whittle et n'apparaît pas dans le contenu Figure 25. Les blocs d'un poids P dans Surpac sont exportés dans Whittle en une seule parcelle de poids  $p < P$  avec une teneur propre. Le reste est du stérile indéterminé. Dans la Figure 25 il manque donc du poids à la ligne MTM. On retrouve le poids de l'ensemble des parcelles MTM de la Figure 25 en additionnant dans la Figure 26 les valeurs MINR et MINP :

$$\begin{aligned} \text{Multiparcelles (Figure 26)} &: 110\,758\,652 \text{ (MINP)} + 67\,074\,668 \text{ (MINR)} = 177\,833\,320 \text{ t} \\ \text{Monoparcelle (Figure 25)} &: \text{MTM} = 177\,833\,069 \text{ t} \end{aligned}$$

La valeur STE correspond à l'ensemble stérile indéterminé du modèle simple. Cette technique permet donc de chiffrer en plus la quantité de stérile contenue dans le minerai. L'erreur moyenne sur les quantités de roche IRHA, DEC et STM est d'environ 1‰.

On peut changer la répartition du minerai selon MINR et MINP pour obtenir différents modèles de répartition.

**Tableau 9 : comparaison des contenus de différents modèles selon la teneur de transition**

| coupure TD/TS | 0,6           | 0,7           | 0,8           | 0,9           |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| TM (t)        | 7 474 843 531 | 7 474 843 531 | 7 474 843 531 | 7 474 843 531 |
| DEC (t)       | 8 535 717 361 | 8 535 717 361 | 8 535 717 361 | 8 535 717 361 |
| MINR (t)      | 157 271 211   | 120 057 442   | 91 694 163    | 70 747 126    |
| STE (t)       | 275 947 395   | 275 947 395   | 275 947 395   | 275 947 395   |
| MINP (t)      | 157 989 189   | 195 249 118   | 223 820 880   | 245 046 384   |
| IRHA (t)      | 2 389 097 813 | 2 389 097 813 | 2 389 097 813 | 2 389 097 813 |

Dans le Tableau 9 ci-dessus, seules les quantités de MINR et MINP changent. Le modèle donnant les meilleurs résultats doit être soit celui à 0,7‰ soit 0,8‰, la teneur de transition calculée étant 0,74‰.

## 7 Application sur le gisement d'Imouraren

### 7.1 Données utilisées

La méthode d'exportation des parcelles Whittle a été testée sur le gisement d'Imouraren entier afin de pouvoir comparer les chiffres obtenus à ceux des différents calculs effectués par le service d'estimation des réserves (S.E.R.) jusqu'à présent.

Le modèle exporté est un modèle 50x50x3 (préalablement traité avec les sous blocs 25x25x1,5) dont les données, teneurs et modèle de coûts datent de Septembre 2006. Tout est comparé avec les résultats des optimisations de Septembre 2006. Les résultats donnés ici seront donc amenés à changer, ce qui n'a pas d'importance puisque c'est d'abord l'efficacité de la méthode qui est démontrée.

Un optimisation de fosse a été faite sous Whittle pour chacun des modèles du Tableau 9 ci-dessus, tous créés à partir d'un modèle Surpac contenant des données de Septembre 2006.

## 7.2 Résultat de l'optimisation

Les 4 fosses obtenues après optimisation avec le modèle de coûts donné dans le Tableau 4 sont à peu de choses près les mêmes. Ce qui change surtout c'est la quantité d'Uranium que l'on en récupère ainsi que le cash-flow généré. Les fosses sont semblables car seule la coupure de transition TD/TS change, alors que la coupure globale est faite à 0,3%.

La Figure 27 présente une comparaison des meilleures fosses obtenues avec l'ancienne méthode et la méthode multiparcelles. La fosse visible est la fosse optimale obtenue en ayant séparé Minerai riche et pauvre à la teneur 0,7‰. Le contour en fil blanc est la limite de fond de fosse de la fosse utilisée pour la préfaçabilité et calculée avec l'ancienne méthode (optimisation avec traitement dynamique à coupure 0,6‰). La nouvelle fosse est sensiblement plus grande (certaines zones sont élargies, certaines zones sont apparues).

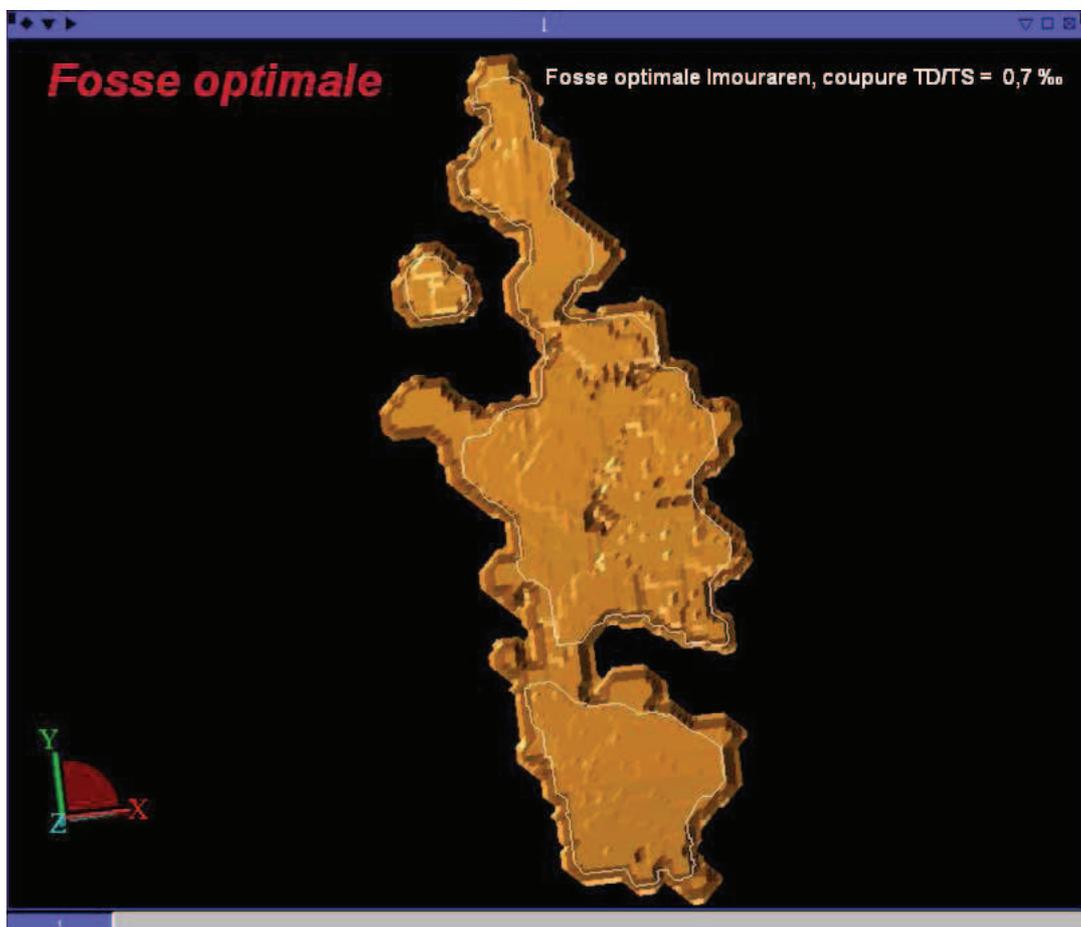


Figure 27 : comparaison des fosses multiparcelle et monoparcelle

| coupure TD/TS                            | U output (t)   | Cash Flow (GFCFA) | Rock (kt) | Ore (kt) | MINR (kt)<br>(Uranium kt) | MINP (kt)<br>(Uranium kt) |
|--|----------------|-------------------|-----------|----------|---------------------------|---------------------------|
|  |                |                   |           |          |                           |                           |
| <b>Whittle méthode multi-parcelles</b>   |                |                   |           |          |                           |                           |
| 0,6                                      | 166 395        | 1 460             | 3 661 000 | 247 170  | 128 599 (129)             | 118 574 (37)              |
| 0,7                                      | <b>162 572</b> | <b>1 488</b>      | 3 695 000 | 248 948  | 99 861 (112)              | 149 089 (51)              |
| 0,8                                      | <b>158 998</b> | <b>1 492</b>      | 3 720 000 | 250 087  | 77 392 (96)               | 172 701 (63)              |
| 0,9                                      | 154 857        | 1 484             | 3 692 000 | 248 856  | 60 026 (82)               | 188 836 (73)              |
| <b>Ancienne méthode TD + Marginal TS</b> |                |                   |           |          |                           |                           |
| 0,6                                      | <b>144 539</b> | <b>1 478</b>      | 3 020 000 | 208 550  | 112 000 (114)             | 96 550 (30)               |
| 0,7                                      | 114 178        | 1 398             | 2 236 000 | 161 250  | 72 000 (83)               | 89 250 (32)               |
| 0,8                                      | 98 545         | 1 297             | 1 855 000 | 137 600  | 51 000 (66)               | 86 600 (32)               |
| 0,9                                      | 88 625         | 1 232             | 1 642 000 | 124 700  | 38 000 (54)               | 86 700 (35)               |

Tableau 10 : comparaison des différentes fosses obtenues sur Imouraren

Le

| coupure TD/TS                            | U output (t)   | Cash Flow (GFCFA) | Rock (kt) | Ore (kt) | MINR (kt)<br>(Uranium kt) | MINP (kt)<br>(Uranium kt) |
|--|----------------|-------------------|-----------|----------|---------------------------|---------------------------|
|  |                |                   |           |          |                           |                           |
| <b>Whittle méthode multi-parcelles</b>   |                |                   |           |          |                           |                           |
| 0,6                                      | 166 395        | 1 460             | 3 661 000 | 247 170  | 128 599 (129)             | 118 574 (37)              |
| 0,7                                      | <b>162 572</b> | <b>1 488</b>      | 3 695 000 | 248 948  | 99 861 (112)              | 149 089 (51)              |
| 0,8                                      | <b>158 998</b> | <b>1 492</b>      | 3 720 000 | 250 087  | 77 392 (96)               | 172 701 (63)              |
| 0,9                                      | 154 857        | 1 484             | 3 692 000 | 248 856  | 60 026 (82)               | 188 836 (73)              |
| <b>Ancienne méthode TD + Marginal TS</b> |                |                   |           |          |                           |                           |
| 0,6                                      | <b>144 539</b> | <b>1 478</b>      | 3 020 000 | 208 550  | 112 000 (114)             | 96 550 (30)               |
| 0,7                                      | 114 178        | 1 398             | 2 236 000 | 161 250  | 72 000 (83)               | 89 250 (32)               |
| 0,8                                      | 98 545         | 1 297             | 1 855 000 | 137 600  | 51 000 (66)               | 86 600 (32)               |
| 0,9                                      | 88 625         | 1 232             | 1 642 000 | 124 700  | 38 000 (54)               | 86 700 (35)               |

Tableau 10 présente les caractéristiques des différentes fosses calculées avec Whittle. La coupure, dans le cas de la méthode multiparcelles correspond à la teneur limite entre minerai riche et minerai pauvre, donc à la teneur limite entre les deux types de traitement. Dans le cas de l'ancienne méthode, elle correspond à la teneur de coupure à laquelle a été calculée la fosse (le minerai marginal a été valorisé après à l'intérieur de cette fosse).

Il est donc normal que dans le cas de l'ancienne méthode, la quantité de MINR et de roche total extraite chute rapidement avec l'augmentation de la coupure ce qui prouve que l'on a des fosses de plus en plus petites et qu'il manque donc du marginal à l'extérieur des fosses. Dans le cas de la nouvelle méthode, la fosse fait à peu près la même taille dans les quatre cas puisque la teneur de coupure reste à 0,3‰ pour l'optimisation sous Whittle (c'est uniquement la teneur de transition qui change).

On voit que les meilleures fosses obtenues avec la méthode multiparcelles sont celles à coupure de transition 0,7 et 0,8. La première par la quantité d'Uranium extraite, la seconde par le cash-flow généré. On se retrouve avec un problème classique dans l'industrie, à savoir : faut-il privilégier la quantité d'Uranium extraite ou la petite marge supplémentaire générée en traitant le minerai de teneur  $0,7 < t < 0,8$  en traitement statique ?

Les fosses sont quasi identiques, c'est donc sur les coupures que se fera la différence de bénéfice. On voit que la fosse 0,8 amène environ 10% d'Uranium de plus et 1% de cash-flow en plus.

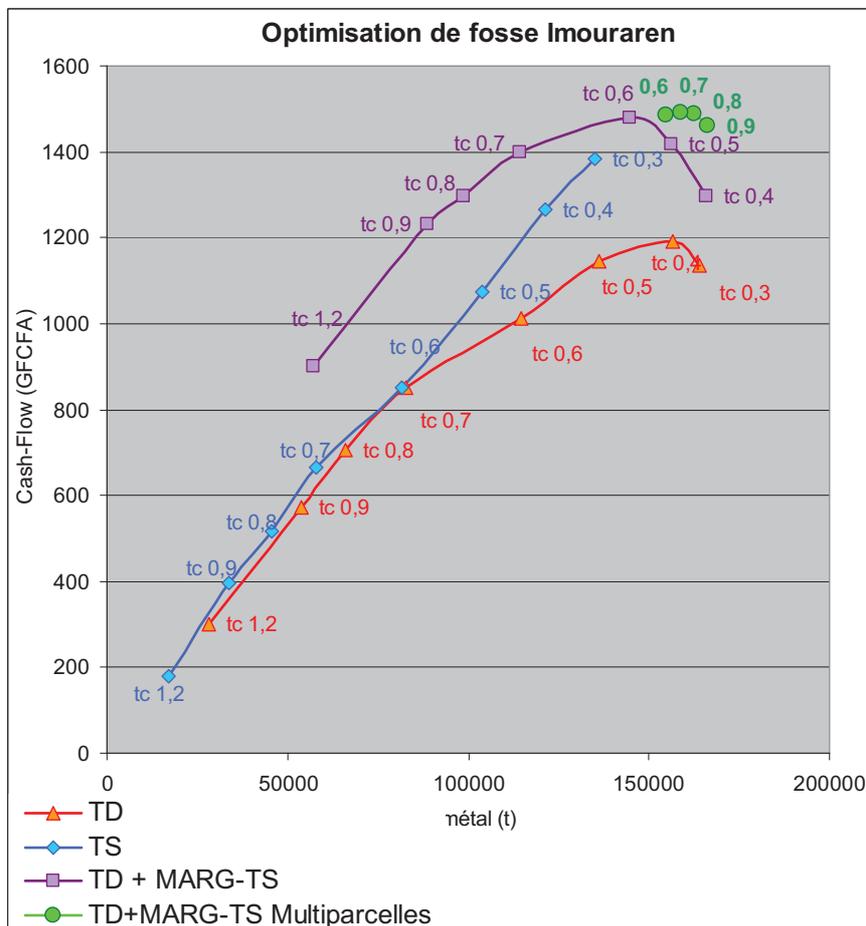


Figure 28 : comparaison des résultats

On voit que la courbe verte n'est pas sensiblement au dessus des autres, ce qui peut sembler être un résultat décevant. Pour mieux faire la comparaison il faut regarder de plus près la façon dont ont été répartis les frais fixes. Il se trouve que le minerai marginal ne supporte pas de frais fixes dans la valorisation faite, alors que dans le système d'optimisation multiparcelles toute tonne de minerai traitée supporte une part de frais fixes proportionnelle à la quantité d'Uranium qu'elle contient. Par exemple pour comparer le point vert 0,7 au violet 0,6 (sur la Figure 28) il faut savoir que dans le calcul du cash flow du point violet il manque le prix des frais fixes de 30 000 tonnes d'Uranium (ces 30 000 tonnes résultent de la différence entre le point violet 0,6 et le bleu 0,6, soit la quantité de marginal traitée). On ne compare donc pas exactement les mêmes données, et si les frais fixes étaient ventilés de manière équitable sur le marginal, on aurait une courbe violette plus basse.

---

## 8 Conclusion sur la méthode

---

Cette méthode d'exportation, bien que nécessitant des manipulations sous Surpac est assez simple, limite le passage d'un logiciel à l'autre et permet surtout d'obtenir un modèle sous Whittle qui contient toutes les informations nécessaires (ou toutes les informations voulues) à l'optimisation complète de la fosse à l'aide des deux méthodes de traitement (dynamique et statique).

On a donc un modèle Whittle réaliste, contenant tout le minerai effectivement présent dans le sol. Cela permet d'obtenir la fosse optimale en fonction du modèle de coûts choisi sans avoir à faire plusieurs calculs à différentes teneurs de coupure (comme c'était le cas précédemment). Il suffit de faire deux calculs : l'un pour la teneur juste inférieure à la coupure de transition (0,7 dans notre cas) et un pour celle juste supérieure (0,8 ici), puisque le pas des teneurs empêche de donner la teneur exacte comme limite MINR/MINP.

L'optimisation à plusieurs teneurs de coupure permet de ventiler les frais fixes de la façon que l'on souhaite, par exemple en le répercutant sur les coûts de traitement lorsque c'est la quantité de métal qui fixe la limite de production annuelle.

## **Quatrième partie : Recherche d'un point de départ pour la fosse d'Imouraren**

# 1 Introduction

## 1.1 L'optimum économique

Lorsque le logiciel Whittle fait un calcul d'optimisation de fosse, c'est en utilisant l'algorithme de Lerchs et Grossman uniquement. Or, comme on l'a vu précédemment, cet algorithme ne produit qu'une seule fosse, dite fosse optimale, qui est la fosse rapportant le plus grand bénéfice net (vente du métal – coûts de production) selon les paramètres économiques (coûts d'extraction du minerai, coûts de traitement, prix de vente du métal) et techniques (pente maximum de stabilité du terrain, rendement des usines, dilution lors de l'extraction...) donnés.

Cette fosse finale ne donne aucune indication sur les étapes par lesquelles passer durant l'exploitation pour obtenir finalement une telle fosse. La solution consiste à modifier artificiellement le prix du métal (en lui appliquant un facteur) d'environ 30% à 200% en pratique, et de lancer l'algorithme pour chacun de ces prix. On obtient ainsi des fosses emboîtées de plus en plus grandes au fur et à mesure que le prix est incrémenté (Figure 29).

Ces fosses sont toutes des optima économiques, et creuser en suivant l'ordre de ces fosses, permet d'extraire le métal au moindre coût. Ces fosses sont d'autant plus avantageuses qu'en

prenant en compte l'actualisation, on renforce l'avantage à les prendre comme fosses étapes. En effet, les premières fosses contiennent du minerai le plus superficiel le plus riche (autrement dit celui qui peut être extrait pour la valeur du métal la plus faible), et permettent des retours rapides sur investissement. Le planning d'exploitation qui a pour étapes chacune de ces fosses est appelé le *Best Case* (ou « meilleur cas » : c'est l'optimum économique).

A l'inverse, le *Worst Case* est le planning d'exploitation selon lequel on retire le matériel de la fosse finale banc par banc. On commence donc par retirer tout le stérile, sur la superficie de la fosse finale et on descend progressivement jusqu'au fond de la fosse finale. Il s'agit du plus mauvais planning possible car le minerai (donc les revenus de l'exploitation) est atteint en dernier.

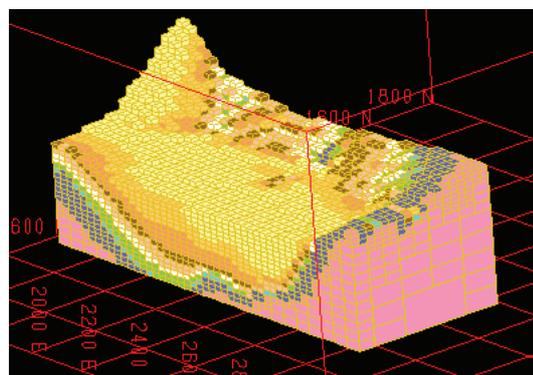


Figure 29 : fosses optimales emboîtées, ou *Best Case* (gisement de Fer en forme de cône d'Aguas Claras, Brésil).

## 1.2 Cadre de l'étude

### 1.2.1 Zone étudiée

L'étude des points de départ s'est faite sur la partie centrale de la future fosse d'Imouraren, la zone IMFOUT (Figure 30 : vue en 3D de la localisation des différentes zones du gisement), de façon à diminuer le nombre de blocs du modèle et donc le temps de calcul.

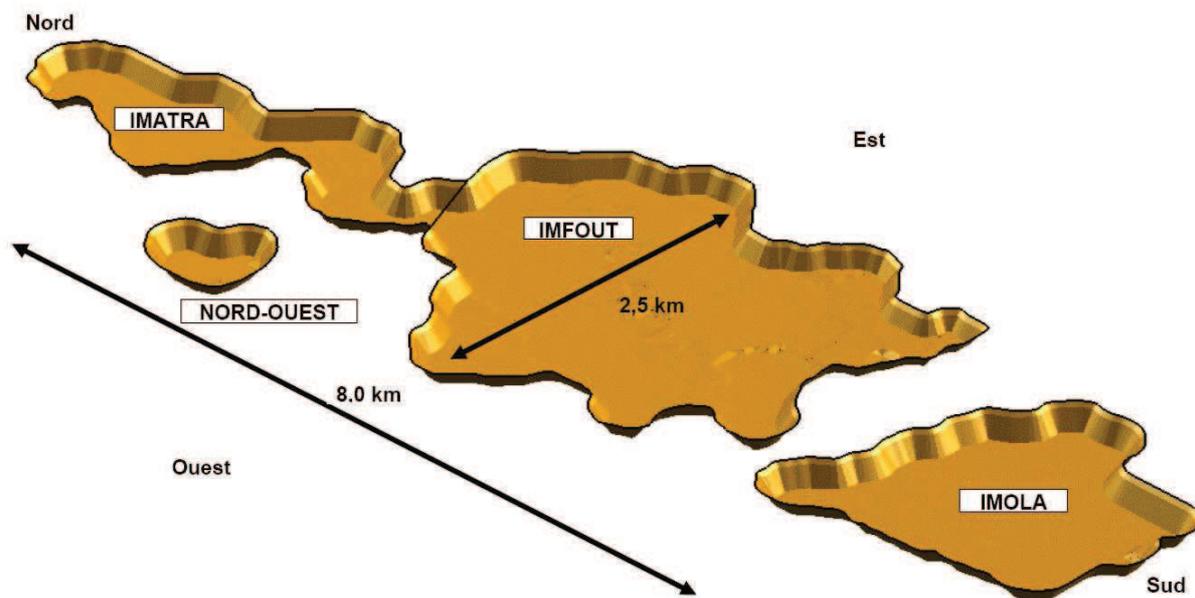


Figure 30 : vue en 3D de la localisation des différentes zones du gisement

Le modèle de bloc utilisé est une partie du modèle de Septembre 2006. Le fait que les données ne soient pas totalement à jour n'a pas une trop grande importance puisque les recherches effectuées dans le cadre de cette étude sont théoriques et doivent permettre de trouver des points de départ pour l'exploitation d'autres gisements à ciel ouvert. L'exploitation du site d'Imouraren commencera par sa partie centrale, et il n'est jamais prévu d'exploiter deux fosses à la fois par manque de matériel. L'étude sur la partie centrale du gisement n'affecte donc pas l'objectif global de trouver un point de départ.

### 1.2.2 Position du problème

Idéalement, dans un projet minier l'exploitation devrait se faire selon le *Best Case* pour maximiser la valeur actuelle nette du projet (le taux d'actualisation diminue la valeur du minerai extrait à la fin de l'exploitation). Bien entendu, il est impossible pour un mineur de suivre ce plan à cause des techniques d'exploitation mises en œuvre. Il est inconcevable de travailler sur des pentes à 59° (pente maximale de la mine d'Imouraren) en les poussant de quelques mètres pour atteindre le contour de la fosse suivante. On doit donc trouver un juste milieu entre *Best Case* et ce qu'on appellera l'optimum technique (le *Worst Case* n'est bien entendu jamais pris en compte).

L'optimum technique est la méthode d'exploitation la plus facile à mettre en œuvre. Voici la façon dont le gisement d'Uranium de Somaïr au Niger est exploité (Figure 31). L'exploitation se fait par *push backs* successifs dans la couverture stérile de façon à libérer le minerai de la tranche minière au fur et à mesure. Il s'agit d'un intermédiaire entre *Best* et *Worst Case*. L'idéal est de démarrer en bord de fosse, de façon à s'adosser à une pente définitive de 59° et à pouvoir faire de l'autorembayage pendant l'exploitation et ainsi économiser les coûts de transport du stérile (et aussi des coûts de réhabilitation futurs). On diminue ainsi la quantité initiale de stérile à retirer en n'ayant pas une pente à 15° de tous les côtés. L'exploitation se fait ensuite dans la direction opposée selon une pente de travail étagée de 15°. On progresse ensuite dans la fosse jusqu'à rejoindre les autres bords du contour définitif. Au bout d'une

certaine durée, on a une fosse assez large pour pouvoir remblayer derrière soi avec du stérile selon une pente à 59°, ce qui économise le coût de l'acheminement des matériaux vers la verse à stérile et permet de faire avancer la paroi arrière.

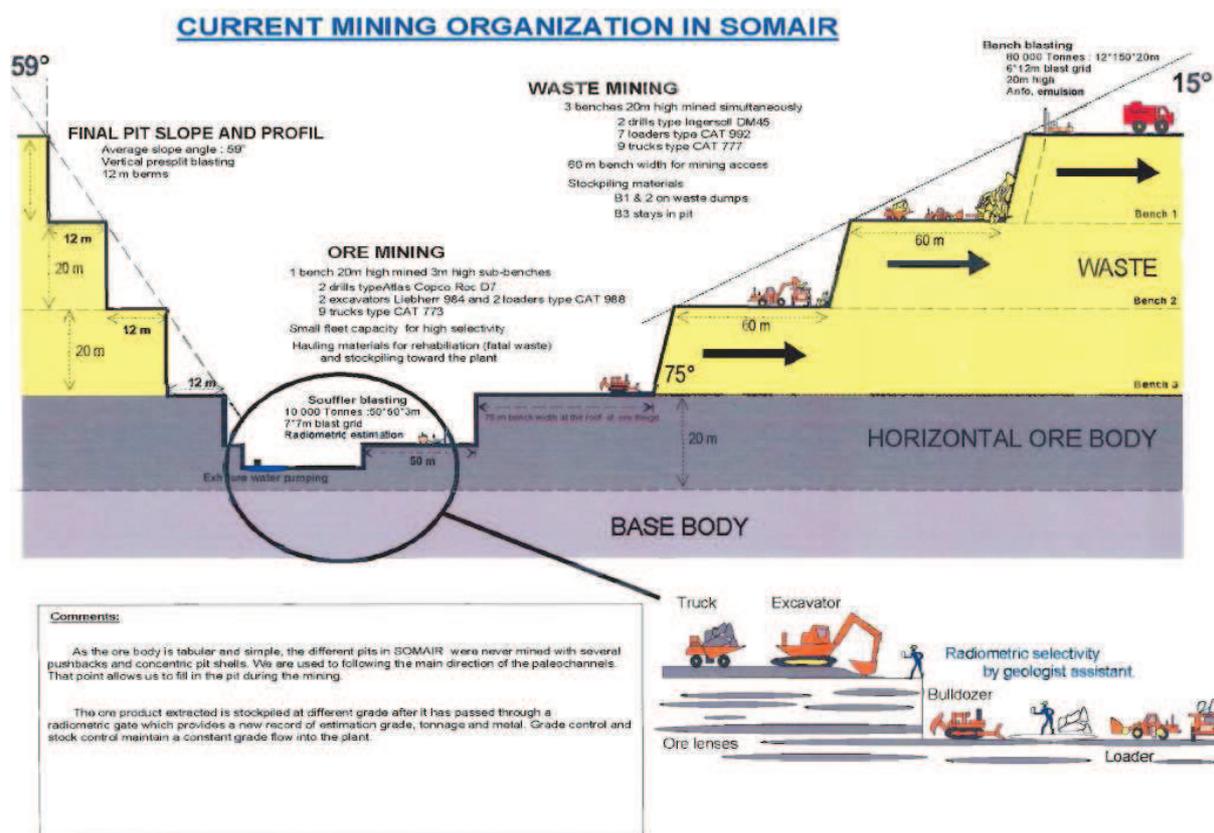


Figure 31 : organisation de l'exploitation à Somair

La possibilité de trouver un optimum technique est appuyée par la structure du gisement : une tranche minéralisée peu épaisse (63 m) et très étendue latéralement (3,6 x 3,4 km). La fosse aura donc un fond plat et s'étendra en largeur, ce qui est facile à exploiter techniquement, en progressant d'une zone à l'autre (Figure 31). Cela donne la possibilité de commencer par la zone du gisement qui est la plus riche (toutes les zones sont à peu près à égale profondeur, donc accessibles de façon équivalente). Il faudrait donc exploiter premièrement la zone la plus riche, tout en étant dans un optimum technique.

Le problème est que la zone la plus riche se trouve au centre du gisement, et donc au centre de la fosse finale (voir *Figure 32*). Le contour de la fosse finale est approximatif, car les teneurs de coupures ne sont pas encore arrêtées, et de nouvelles estimations des teneurs (nouveaux carottages) doivent être effectuées. Il s'agit cependant d'un contour estimé réaliste. On cherche donc le meilleur point de départ en bord de fosse pour l'exploitation. Avec les capacités d'extraction prévues, on estime qu'il faudra 2 ans d'extraction de couverture stérile avant d'atteindre du minerai. C'est une très grande période de temps sans revenus, il est donc primordial que les premières zones exploitées soient les plus riches possibles.

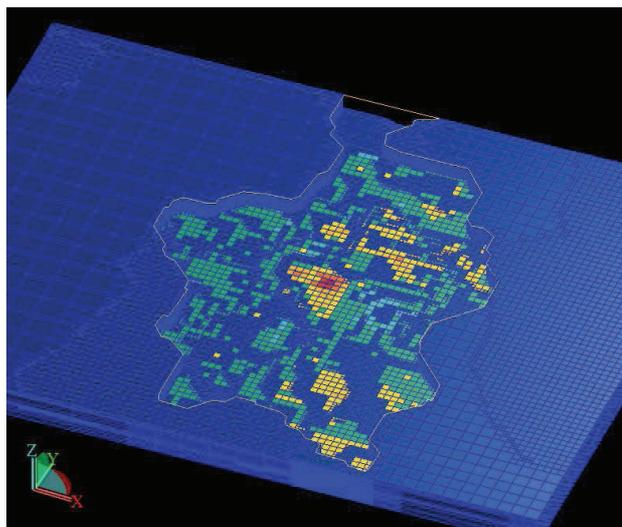


Figure 32 : répartition des teneurs en Uranium dans les zones superficielles de la fosse tc 0,6 %

## 2 Optimisation standard

### 2.1 Introduction

Les optimisations suivantes ont été réalisées avec une partie du bloc modèle d'Imouraren, centrée sur Imfout. La teneur et la proportion de minerai dans les blocs correspondent à la teneur de coupure 0,3‰.

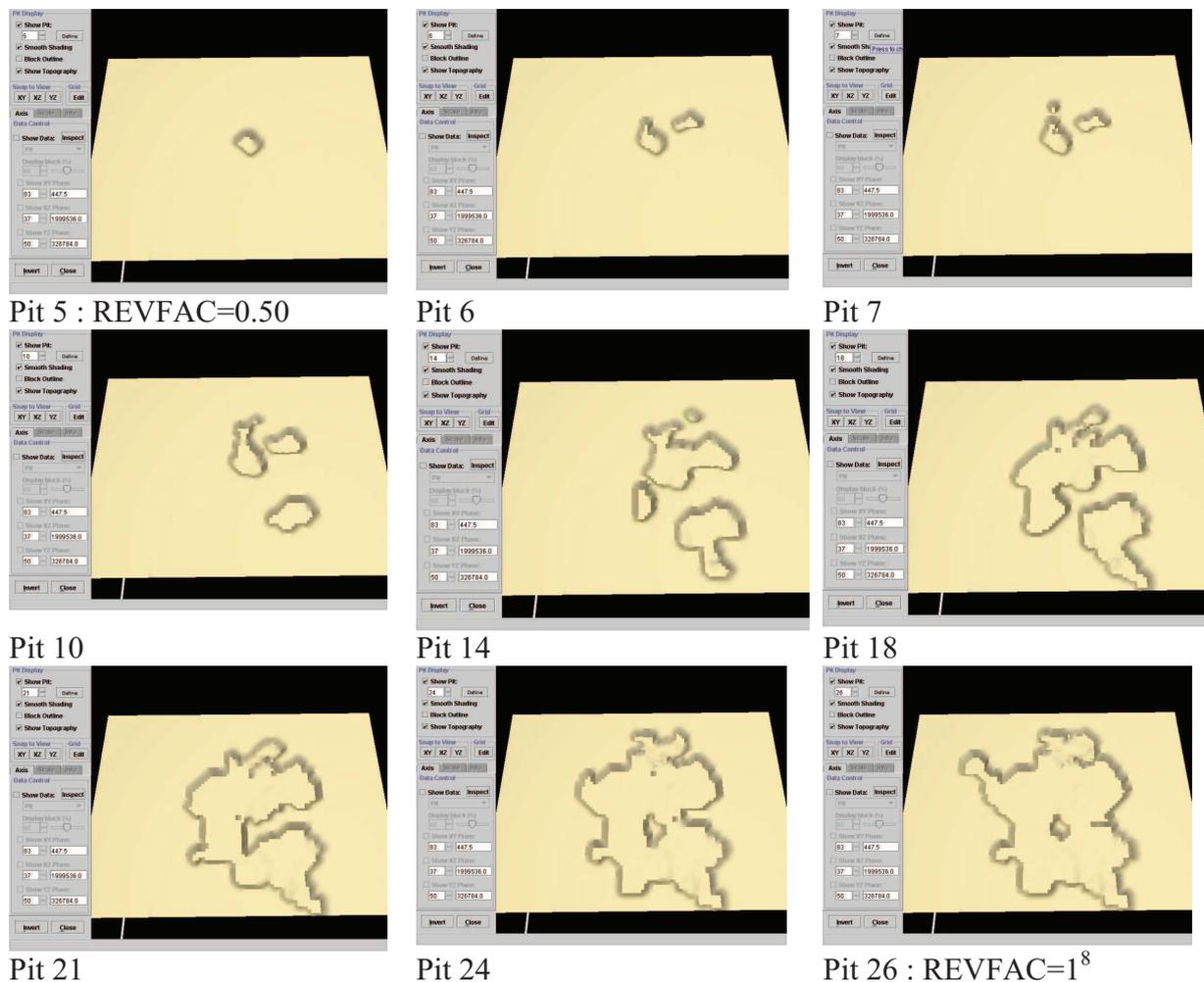
Voici les résultats de la première optimisation Whittle, en utilisant le modèle de coûts de Septembre 2006, sur un bloc modèle d'Imfout, avec teneur de coupure à 0,3‰ et proportion associée.

Les méthodes de traitement sont le traitement Dynamique pour les blocs dont la teneur moyenne est supérieure à 0,74, et le traitement statique pour ceux dont la teneur moyenne est entre 0,3‰ et 0,74‰.

### 2.2 Etapes de creusement : optimum économique

Voici les résultats du calcul lancé avec des pentes maximales de 59° pour les roches DEC, MTM et STM, et 45° pour IRHA.

Tableau 11 : fosses emboîtées optimum économique



Lorsqu'on utilise Whittle pour calculer les fosses optimales pour des prix de vente de l'Uranium de plus en plus élevés, on obtient les fosses emboîtées théoriques pour lesquelles la quantité de minerai sorti est la plus rentable (puisque la plus petite fosse correspond au prix du métal le plus faible). Whittle démarre donc logiquement par la zone la plus riche pour aller vers les zones les plus pauvres qui deviennent rentables pour les prix de métal élevés. (Voir ci dessus)

On remarque que ces fosses successives ne sont pas réalisables techniquement à cause de leurs pentes à 59° mais surtout parce qu'on a plusieurs fosses et que la quantité de matériel disponible ne permet l'exploitation que d'une fosse à la fois. Il s'agit d'une indication de l'ordre des zones à exploiter, de la plus riche en uranium (au centre) à la périphérie moins riche (rentable pour un *revenue factor* unitaire).

<sup>8</sup> Comme vu précédemment, un *revenue factor* égal à 1 correspond à la fosse optimale.

## 2.3 Tentatives de points de départ

Afin de définir des plannings de développement de la fosse à partir de points de départ, il faut forcer Whittle à démarrer l'exploitation dans la zone voulue. A partir de la fosse finale optimale pour une teneur de coupure à 0,6%. Afin de faciliter l'accès au minerai dans une zone, on a enlevé la découverte (DEC et IRHA) dans les zones respectives de départ (1, 2 et 3). Tout en laissant une pente maximale de 59° pour le creusement des fosses.

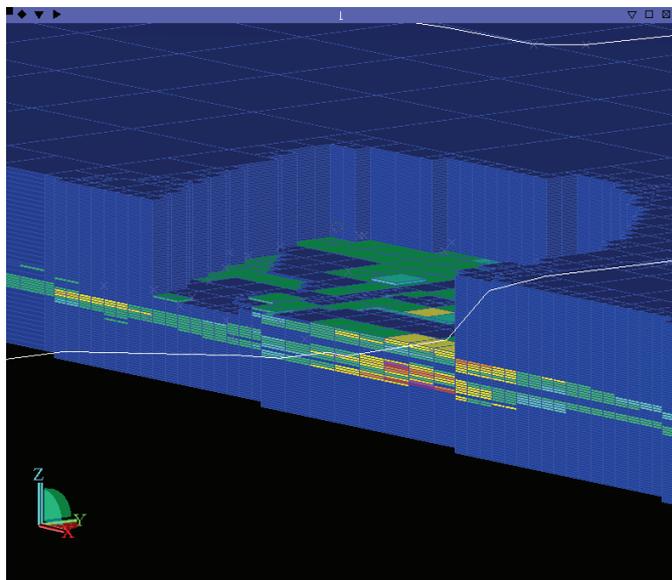


Figure 33 Découverte artificielle

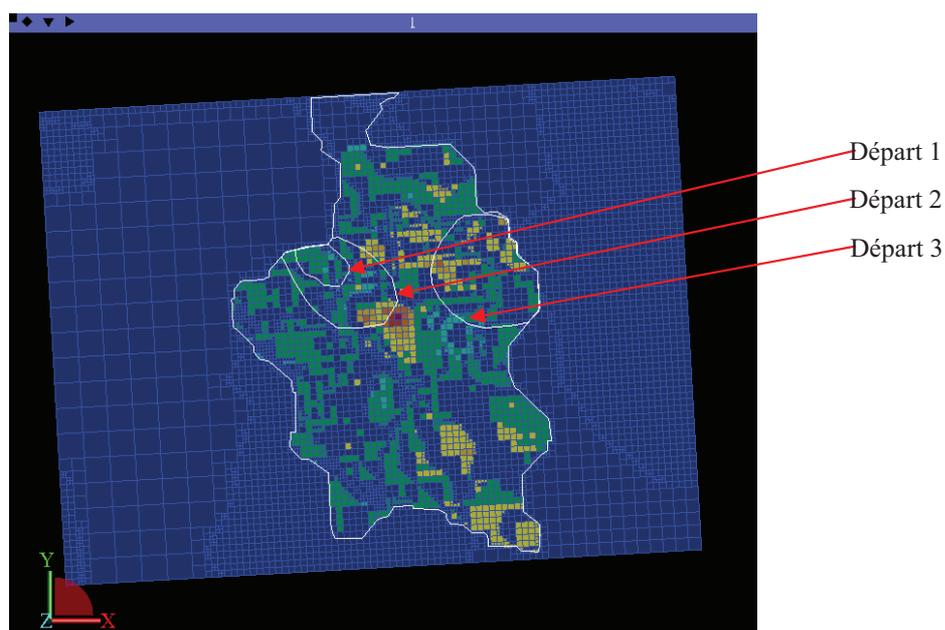
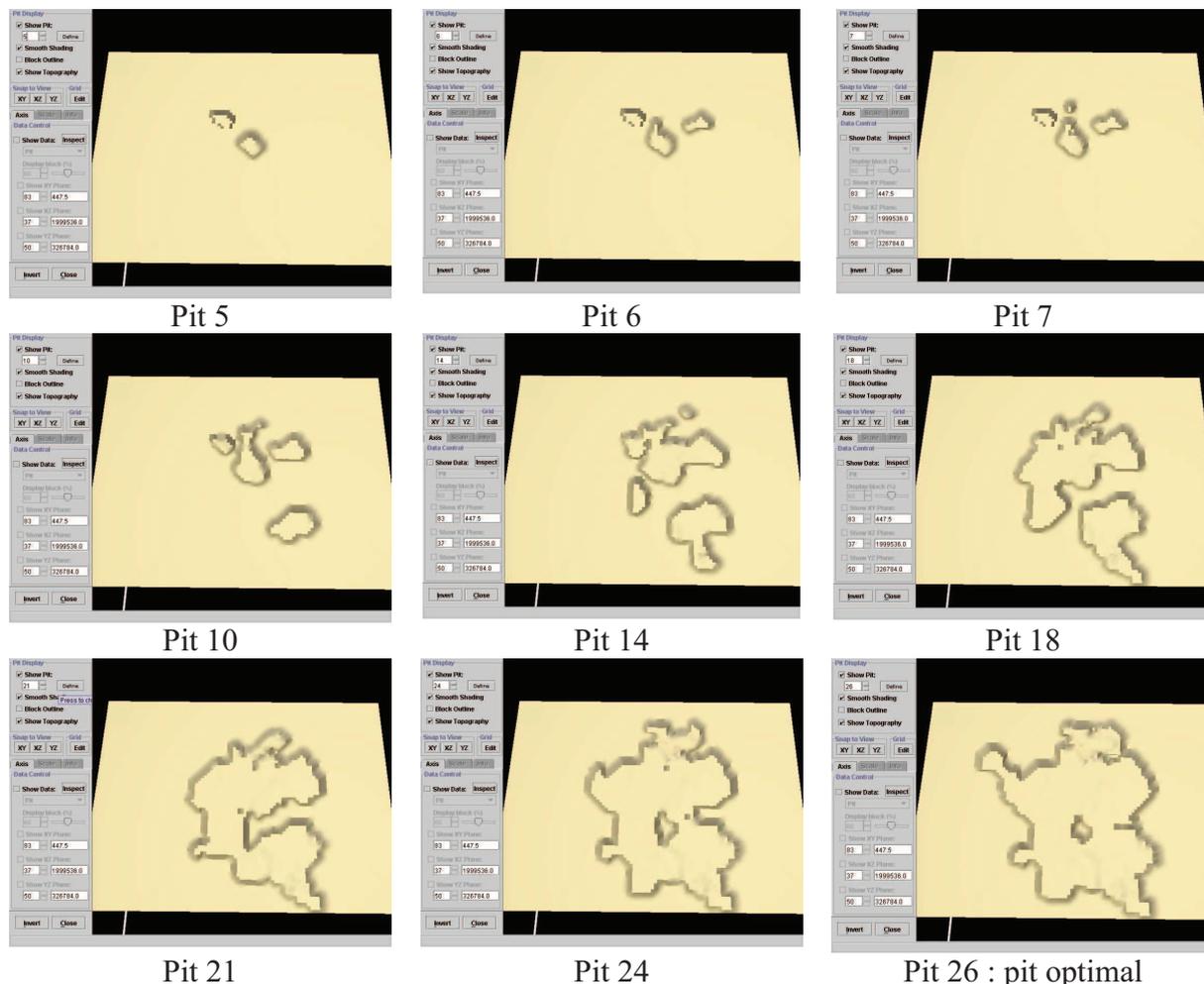


Figure 34 : différents points de départ

### 2.3.1 Résultat départ 1

Dans ce cas, Whittle ne prend pas en compte la découverte qui a déjà été retirée, et commence à creuser au milieu, en suivant la séquence de l'optimisation standard :

Tableau 12 : petite prédécouverte, fosses emboîtées

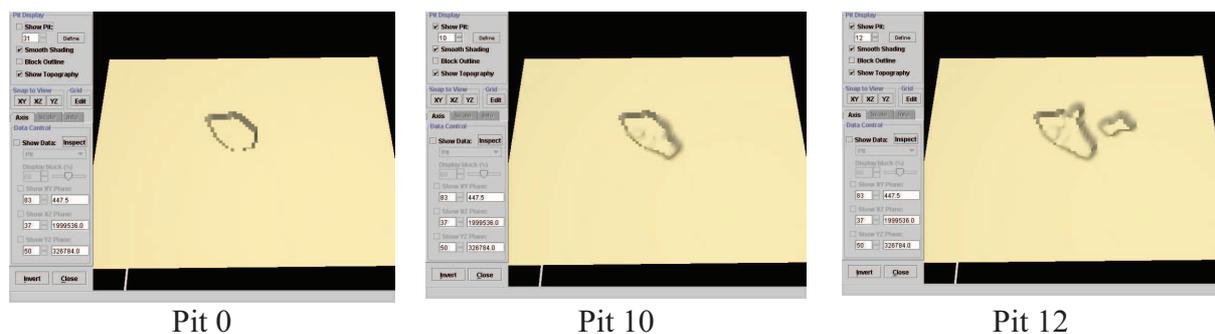


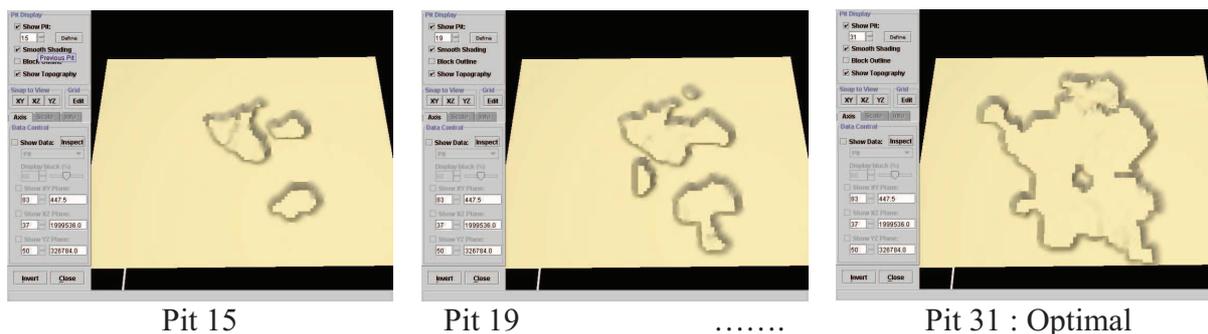
Ceci s'explique par le fait que la zone du centre reste plus rentable à excaver que la zone précreusée à élargir. Ceci est dû à la richesse du minerai au centre.

### 2.3.2 Résultat départ 2

En élargissant le premier point de départ suffisamment pour atteindre la zone centrale, on remarque que l'évolution reste similaire :

Tableau 13 : résultats avec pré découverte





Whittle commence par élargir le pré-trou mais on ne peut pas l'empêcher de faire des fosses séparées. Il sera toujours plus rentable de démarrer une nouvelle fosse au dessus d'une zone riche que d'élargir une fosse préexistante. Cela est dû à la structure du gisement, qui possède des zones plus riches, toutes approximativement à la même profondeur et séparées par des zones relativement plus pauvres. Cela est également dû au fait que Whittle cherche un optimum économique. Les pentes à 59° sont raides et permettent d'avoir accès à du minerai sans trop de dépenses en découverte. Le même genre de phénomène se produit avec le départ 3, malgré le fait qu'il soit situé sur une zone plus riche en Uranium.

En réalité, la pente de travail sera de 15°, et il faudra donc retirer beaucoup plus de stérile pour avoir cette pente de travail.

## 3 Optimisation avec pente de travail

### 3.1 Des contraintes de pente modifiées

On modifie donc les contraintes sur les pentes pour l'optimisation de Whittle :

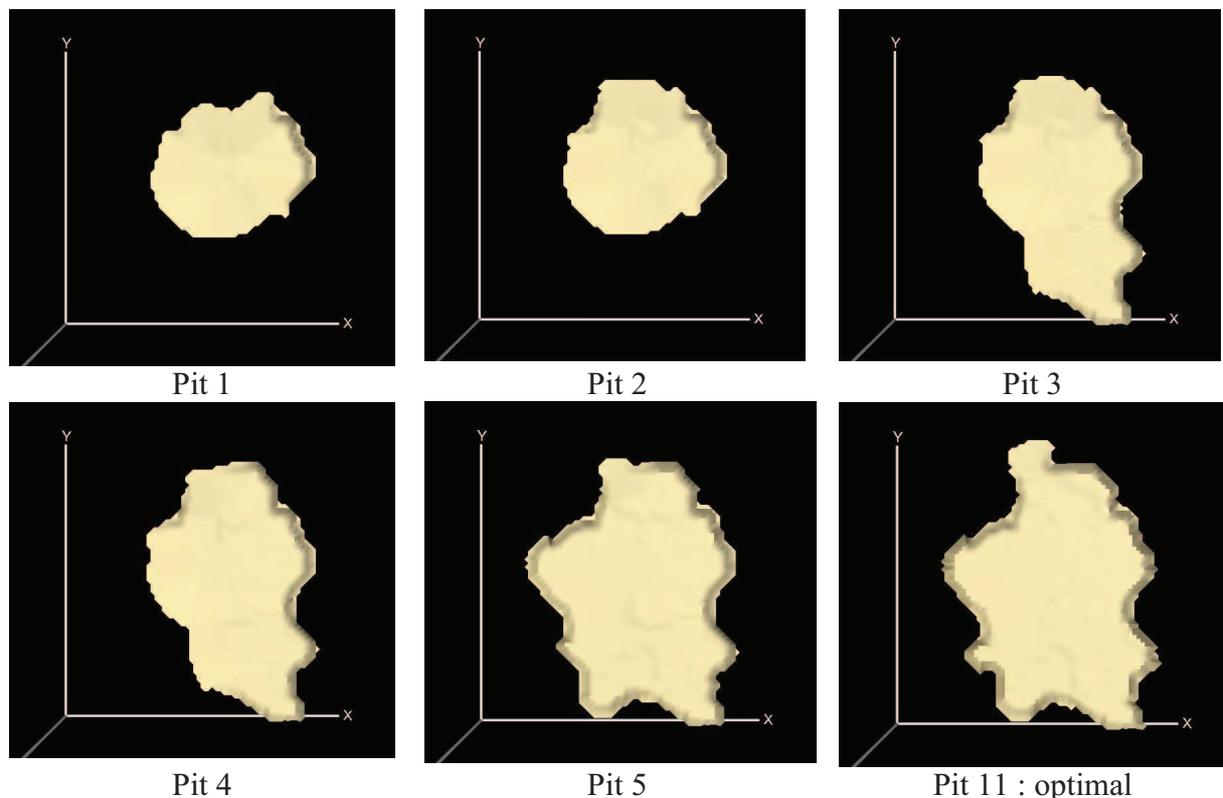
- A l'intérieur de la fosse finale (tc 06%) voulue, on impose une pente maximale de 15° dans toutes les directions
- A l'extérieur de cette fosse, la pente maximale est la pente définitive, à savoir 59° dans toutes les directions.

On cherche ainsi à favoriser un départ en bord de fosse, puisque dans ces zones, il y aura moins de stérile à retirer (pente plus forte sur toute une moitié des murs de la fosse). Cela défavorise également le départ de nouvelles fosses, puisque la quantité de stérile à retirer pour atteindre la tranche minière devient très importante

### 3.2 Optimisation sans pré trou

Voici les fosses obtenues avec Whittle

Tableau 14 : résultats pente 15° dans la fosse



La fosse finale et optimale est la fosse td\_tc06 puisque c'est sur son contour que l'on a défini une pente maximale de 59°.

On remarque que la première fosse contient le minerai du centre et est liée à la paroi est de la fosse finale. Ces fosses sont à la fois des optima techniques et économiques : on a une pente de travail, et ces fosses sont calculées de façon à maximiser le cash flow.

Il n'est pas possible d'avoir une première fosse plus petite que le Pit 1 en prenant 15° comme pente de travail : en effet celle-ci est la plus rentable pour le *cost adjustment factor* le plus petit (c'est-à-dire le coût de métal le plus faible). Toute fosse plus petite serait moins rentable : Si on prend une fosse contenant moins de minerai, alors pour un même prix du métal elle ne sera pas optimale, et élargir cette fosse supposée pour obtenir le Pit 1 sera fait par Whittle (par nature même de l'algorithme de Lerchs-Grossman).

La succession des fosses donne donc l'ordre économiquement optimal dans lequel exploiter les secteurs.

On note donc deux points de départ potentiels : soit en bord de fosse, sur le côté est (celui atteint par le Pit 1), soit au centre de la fosse, mais en n'ayant pas une pente de 15° de tous les côtés.

Le Pit 1 contient une quantité de matière qui peut être extraite au plus vite en 6 ans, et Whittle ne peut pas donner d'étapes préalables à ce Pit.

L'optimisation économique (voir *Etapes de creusement : optimum économique*) suggère qu'il faille commencer par le centre du gisement.

### 3.3 Pente à 59° sur le secteur ouest

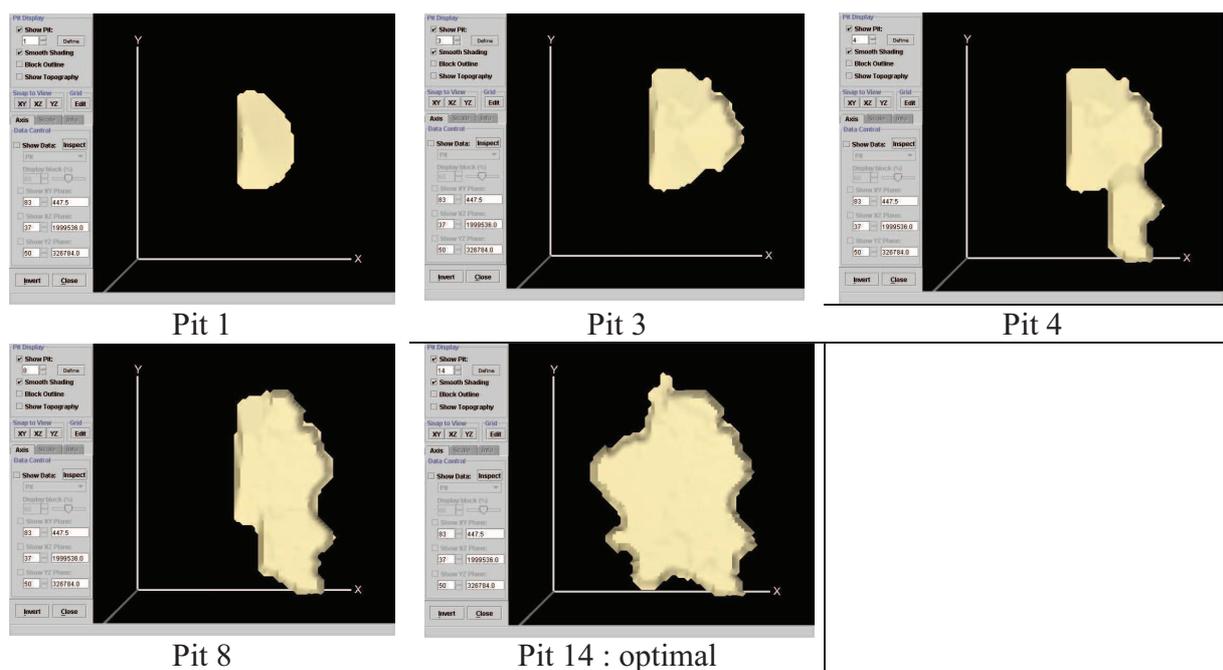
Une façon de démarrer par le centre de la fosse, tout en gardant un optimum économique pourrait être de n'avoir une pente de travail à 15° que dans certaines directions du trou initial. Le secteur ouest étant le plus pauvre (et donc celui qui sera exploité en dernier), on choisit de donner une pente maximale de 59° dans la direction Ouest.

On aurait ainsi une pente de 59° sur le mur ouest de la fosse centrale, tout en exploitant vers l'est, ce qui permettrait d'économiser la découverte de stérile. Une fois la partie est de la fosse exploitée, il serait possible de créer une pente de travail dans la zone ouest pour l'exploiter.

On ne peut cependant pas demander à Whittle d'avoir une pente à 59° dans une zone, puis que cette pente devienne 15° par la suite. La pente sur le secteur ouest reste donc de 59° en permanence.

#### 3.3.1 Résultats

Tableau 15 : résultats pente 59° Ouest



Les fosses ont toutes un mur ouest à 59°, même dans la zone sud. L'exploitation se fera cependant avec une pente de travail à 15°.

Cette optimisation permet de prouver que la zone centrale est plus rentable que la zone de Départ 3 (voir ci-dessus) si le mur ouest de la fosse peut être à 59°.

Il vaut donc mieux commencer l'exploitation par le centre.

### 3.4 Imprécisions de l'étude :

- Il est à noter que les prix de transport du minerai jusqu'à la verse à stérile en fonction de la distance n'a pas été prise en compte dans le modèle de coûts. Le fait que celle-ci soit située à l'ouest de la fosse pourrait avoir une influence.

- Les autres imprécisions (investissement dans une usine de traitement dynamique plutôt que statique, etc....) ne sont pas de nature géographique et ne peuvent qu'influer sur des coûts uniformes dans tout le gisement. Elles ne changeront donc pas le point de départ.

## 4 Directions d'exploitation :

### 4.1 Introduction

Il est possible avec Whittle de changer la façon dont les fosses emboîtées sont créées, façon à ce que les fosses emboîtées soient techniquement réalisables. La technique consiste à utiliser les expressions définies par l'utilisateur au moment de générer les fosses emboîtées (onglet Pit Shells de Whittle).

Cette technique est basée sur les expressions définies par l'utilisateur afin de diriger le paramétrage des fosses d'une autre façon. Plutôt que de faire varier le rapport [prix métal/coûts] (approche standard du *Revenue Factor*), cette technique inclue de plus en plus de blocs de minerai dans l'optimisation pour chaque incrémentation d'un paramètre lié à la distance entre ces blocs et un bloc d'origine.

Cela permet d'avoir une séquence de fosses techniquement réalisables, et de choisir le point de départ, ainsi que la direction globale dans laquelle l'exploitation se fera. On peut ainsi tester plusieurs possibilités rapidement.

### 4.2 Principe

Le principe consiste à « court-circuiter » le *revenue factor* généré par Whittle, et à l'utiliser pour qu'il fasse varier la distance limite, au-delà de laquelle ne plus creuser. Cela permet d'obtenir des fosses emboîtées progressivement dans la direction voulue (Figure 35: départ radial depuis le Nord-Est/ Figure 36 : Plan standard d'exploitation).

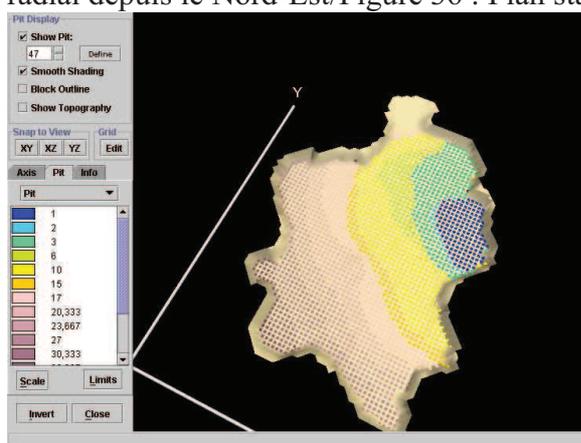


Figure 35: départ radial depuis le Nord-Est

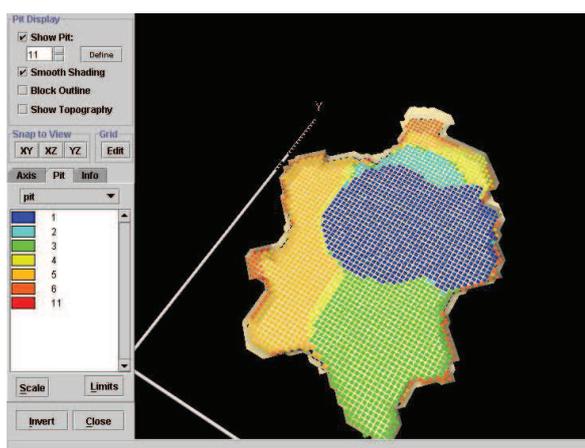


Figure 36 : Plan standard d'exploitation

Pour cela, on doit utiliser le *Revenue factor* mais faire en sorte qu'il ne fasse plus varier le prix du métal. On va donc diviser ce dernier par REVFAC (variable du *revenue factor*), de sorte que :

$$REVFAC * (prix / REVFAC) = prix$$

On crée ensuite une variable Distance (DST) pour chaque bloc dans l'onglet expression de Whittle, qui va varier de 0 (pour le bloc origine choisi) à 1 (pour les blocs les plus éloignés de l'origine) en fonction de la distance des blocs au point d'origine choisi.

$$DST = \frac{D(X, X_{départ})}{D_{Max}} \in [0,1]$$

C'est en comparaison de cette variable qu'on utilise l'incrémentation du *revenue factor* (qui ne variera cette fois qu'entre 0 et 1, au pas de 0,01). Lors de l'augmentation du *revenue factor* par Whittle, on fera varier le prix de vente du métal comme suit :

- Si la variable DST du bloc en cours est inférieure à REVFAC (donc si le bloc est suffisamment proche du départ choisi), alors on multiplie le prix par 1.
- Sinon, on multiplie le prix par 0, de sorte que le minerai extérieur au cercle de rayon REVFAC et de centre « le point de départ » ait une valeur nulle, et ne soit donc pas extrait.
- On procède de même pour le coût de vente, associé au prix de vente.

$$prix = 37773 * \begin{pmatrix} 1 \text{ si } DST < REVFAC \\ 0 \text{ si } DST > REVFAC \end{pmatrix} * \frac{1}{REVFAC}^9$$

On obtient ainsi pour chaque incrémentation de REVFAC la fosse optimale économiquement contenant tout le minerai rentable situé dans ce cercle.

Pour choisir dans quelle direction exploiter, on peut ensuite faire varier la définition de DST, qui ne prendra en compte que l'abscisse X des blocs par exemple (*Figure 38 : développement axial*), pour faire un développement frontal vers l'Est ou l'Ouest. Lorsqu'on prend la distance absolue entre les blocs et le point de départ, le développement est radial (*Figure 37 : développement radial*).

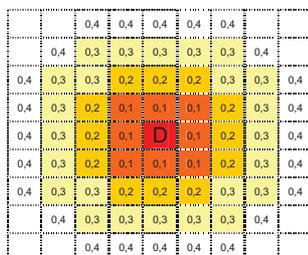


Figure 37 : développement radial

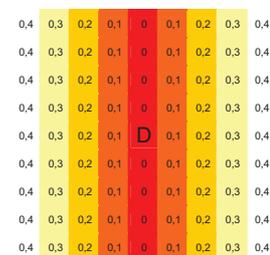


Figure 38 : développement axial

D : bloc de départ, valeurs de DST pour chaque bloc, vue de dessus.

<sup>9</sup> Ici, 37773 est le prix réel de l'Uranium en FCFA, la variable *prix* est entrée dans Whittle à la place du prix réel.

En choisissant une pente limite à 15°, on obtient une série de fosses emboîtées, dont la plus petite contient le point de départ. La dernière fosse est toujours la fosse optimale, puisque le prix ne varie pas. Elle est la fosse optimale sur l'ensemble du modèle de bloc, pour un *revenue factor* égal à 1.

## 4.3 Résultats

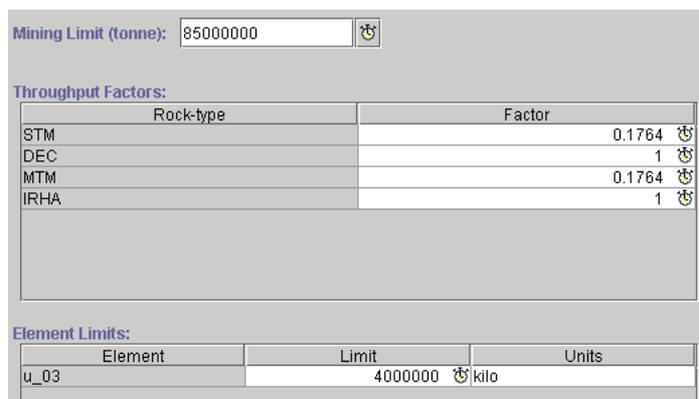
### 4.3.1 Limites d'extraction :

Pour estimer la valeur actuelle nette (VAN) de la mine exploitée il est nécessaire de connaître le temps que durera cette exploitation afin de pouvoir appliquer le taux d'actualisation. On impose donc des limites de production de métal, d'extraction de traitement par an, pour obtenir une durée de vie.

#### Le problème de la limite d'extraction :

Quelques problèmes sont apparus, comme le fait que Whittle ne peut pas prendre en compte plusieurs parcs de machines, chacune destinées à un type de minerai. La limite d'extraction de roche doit être donnée de façon totale, puis des facteurs sont affectés à chaque type de roche, qui représentent la vitesse relative d'extraction de ces roches (Figure 39 : Onglet « Limites » de Whittle). Dans le cas d'Imouraren, les machines devant extraire les roches de la tranche minéralisée seront différentes de celles extrayant la découverte. Les limites seront donc de 85 Mt/an pour la découverte (DEC et IRHA), et de 15 Mt/an pour la tranche minéralisée (STM et MTM), ces deux chiffres étant indépendants l'un de l'autre.

Il a donc fallu donner à Whittle une limite unique ainsi que des coefficients, qui approchent le plus possible la réalité. La Figure 39 montre les coefficients utilisés<sup>10</sup> :



The screenshot shows the 'Limits' tab in Whittle software. At the top, 'Mining Limit (tonne):' is set to 85000000. Below, the 'Throughput Factors' table lists rock types and their factors. At the bottom, the 'Element Limits' table shows a limit of 4000000 kilo for element 'u\_03'.

| Rock-type | Factor |
|-----------|--------|
| STM       | 0.1764 |
| DEC       | 1      |
| MTM       | 0.1764 |
| IRHA      | 1      |

| Element | Limit   | Units |
|---------|---------|-------|
| u_03    | 4000000 | kilo  |

- Mining Limit à 85Mt permet que l'extraction de découverte soit limitée à ce chiffre, en particulier au début de l'exploitation
- Les coefficients sont des vitesses relatives, donc quand il n'y a qu'un type de minerai à exploiter dans la fosse, le limite redevient 85Mt/an.
- La production d'uranium à 4 kt est une contrainte économique

Figure 39 : Onglet « Limites » de Whittle

Pour vider une fosse (la première par exemple), Whittle procède par bancs en extrayant toute la découverte en premier, suivi des bancs minéralisés. Whittle procédant fosse par fosse, lorsqu'il ne reste que du minerai dans une fosse, Whittle l'extraira au-delà de la limite des 15 Mt/an, puis passera à la fosse suivante, extraira la découverte, puis le minerai.... Lorsque les fosses sont proches les unes des autres, comme dans la Figure 35 cela ne pose pas de problème car plusieurs fosses étapes sont exploitées par an. Mais dans le cas de grandes étapes, on retrouve toujours cette séquence découverte/minerai. La solution est alors

<sup>10</sup> 0.1764 = 15/85, c'est le rapport des maxima d'extraction.

d'utiliser les push backs pour entamer la fosse suivante avant d'avoir terminé le fond de la première<sup>11</sup>.

Sur la mine exploitée avec la pente max à 15° dans la fosse, 59 dehors : on a des fosses trop « éloignées » les unes des autres (5 fosses pour obtenir la fosse finale, voir Figure 36), et il n'est pas possible de faire des étapes d'un pit à l'autre (en best case, les bancs sont exploités dans l'ordre stratigraphique, du plus haut au plus profond). On ne peut pas définir d'exploitation en push back à l'intérieur d'une fosse unique, les sections se font obligatoirement entre les bancs et les fosses emboîtées calculées par Whittle. Les fosses intermédiaires sont trop grandes, et l'on se retrouve avec une découverte trop grande et trop précoce, et une exploitation du minerai trop tardive, ce qui diminue la VAN considérablement.

| Period | tonne in place STM | tonne in place DEC | tonne in place MTM | tonne in place IRHA | tonne in place | Units in place U_03 | tonne input |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------------|
| 1      | 0                  | 0                  | 0                  | 85 000 029          | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 2      | 0                  | 7 079 593          | 0                  | 77 920 435          | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 3      | 0                  | 84 320 215         | 0                  | 679 805             | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 4      | 0                  | 85 000 019         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 5      | 0                  | 85 000 023         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 6      | 14 104 299         | 41 782 500         | 18 232 371         | 0                   | 85 000 000     | 14 777 649          | 4 909 046   |
| 7      | 1 589 367          | 40 457 242         | 15 691 724         | 21 530 926          | 85 000 000     | 13 878 608          | 4 750 248   |
| 8      | 7 832 725          | 19 233 509         | 7 798 787          | 44 662 950          | 85 000 000     | 6 155 226           | 5 491 284   |
| 9      | 0                  | 28 885 717         | 0                  | 56 114 361          | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 10     | 0                  | 85 000 080         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 11     | 0                  | 85 000 083         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 12     | 967 069            | 79 675 418         | 2 323 913          | 0                   | 85 000 000     | 1 818 149           | 2 323 913   |
| 13     | 14 295 260         | 6 782 950          | 30 002 602         | 14 679 934          | 85 000 000     | 23 179 975          | 5 547 990   |
| 14     | 1 104 360          | 75 876 089         | 1 213 000          | 6 117 320           | 85 000 000     | 926 318             | 1 213 000   |
| 15     | 5 740 711          | 1 236 237          | 8 023 393          | 64 235 820          | 85 000 000     | 5 852 720           | 5 742 043   |
| 16     | 0                  | 69 574 289         | 0                  | 15 425 809          | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 17     | 0                  | 85 000 082         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 18     | 0                  | 85 000 080         | 0                  | 0                   | 85 000 000     | 0                   | 0           |
| 19     | 1 074 365          | 82 555 044         | 622 942            | 0                   | 85 000 000     | 449 162             | 622 942     |
| 20     | 34 368 098         | 26 405 113         | 10 353 282         | 0                   | 85 000 000     | 6 781 190           | 6 311 306   |
| 21     | 14 472 085         | 762 997            | 40 922 879         | 0                   | 85 000 000     | 28 061 218          | 6 353 205   |
| 22     | 16 379 412         | 29 517 647         | 10 200 911         | 17 897 821          | 85 000 000     | 6 963 136           | 8 598 066   |
| 23     | 6 853 130          | 28 778 327         | 4 045 418          | 2 943 752           | 47 105 281     | 2 615 757           | 4 045 418   |
| 24     | 0                  | 0                  | 0                  | 0                   | 0              | 0                   | 0           |

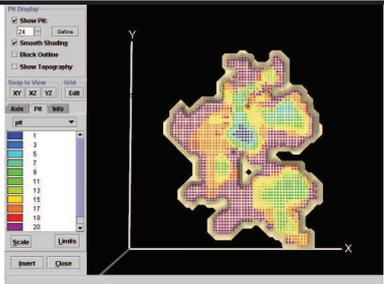
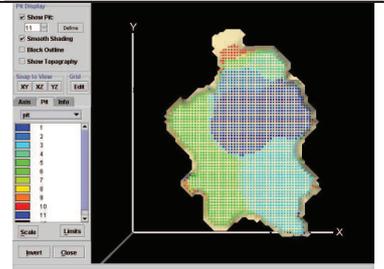
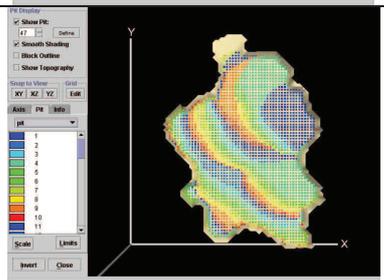
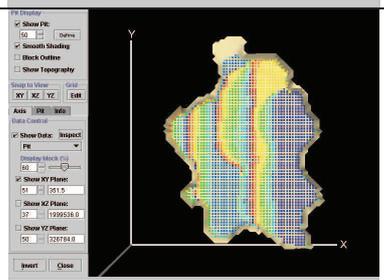
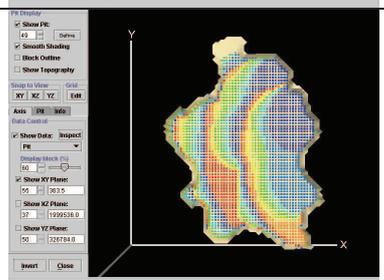
Tableau 16 : exploitation par année best case, selon Figure 36

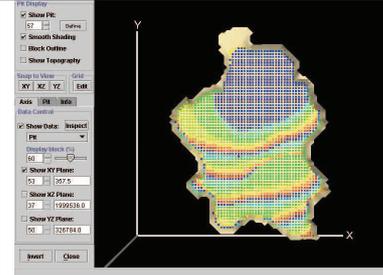
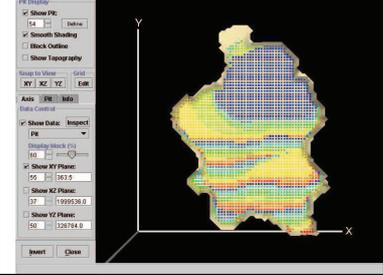
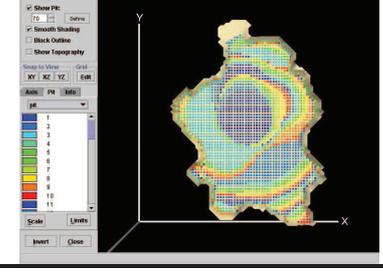
Sur la mine exploitée à 59° partout, 45° pour le minerai IRHA : la première fosse atteint directement le minerai (pente abrupte) en 0.63 années. Elle n'est pas réaliste non plus au niveau de sa VAN car le minerai est atteint trop rapidement. Cependant le best case constitue une VAN maximale, qui est la limite supérieure du cash flow que l'on peut tirer de la fosse finale.

<sup>11</sup> Mais dans ce cas, bien que la découverte de la fosse 2 soit entamée avant la fin de la fosse 1, on se retrouve toujours avec un gros dépassement de la limite d'exploitation de minerai dans la fin (Tableau 16, ligne 21).

### 4.3.2 Comparaison de différents schémas d'exploitation

Tableau 17 : comparaison des différents schémas d'exploitation

| Direction d'exploitation  | Aperçu  | Nombre d'étapes | Durée (années) | V.A.N. (MFCFA) | Différence optimum économique |
|---------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| Optimum économique<br>59° |    | 24              | 28             | 344 000        | -                             |
| Optimum économique<br>15° |   | 11              | 53             | 18 000         | -95%                          |
| Nord-est radial           |  | 47              | 31             | 147 000        | -57%                          |
| Est frontal               |  | 50              | 34             | 79 000         | -77%                          |
| Est radial                |  | 49              | 31             | 132 000        | -62%                          |

|               |  |    |    |                |      |
|---------------|--|----|----|----------------|------|
| Nord radial   |   | 57 | 33 | 82 000         | -76% |
| Nord frontal  |   | 54 | 34 | 75 000         | -78% |
| Centre radial |  | 70 | 32 | <b>160 000</b> | -47% |

Ces résultats montrent que La meilleure solution est de démarrer au centre, et de s'étendre radialement<sup>12</sup>, avec une VAN de 160 milliards de Francs CFA. En revanche si l'on veut exploiter la fosse dans une seule direction, alors on doit démarrer de la partie Est pour se diriger radialement vers l'Ouest.

Cependant, les V.A.N. sont inférieures de beaucoup au maximum que l'on peut atteindre en best case avec des pentes à 59°. Ceci est dû d'abord aux pentes<sup>13</sup>, qui font que le minerai est atteint moins rapidement (beaucoup de découverte à retirer), mais aussi au fait que les zones les plus riches sont atteintes en premier et par ordre de teneur par le best case. L'exploitation unidirectionnelle n'est donc pas recommandée pour ce gisement.

Notons la V.A.N. particulièrement basse du best case avec une pente à 15°. Ceci est dû à la très grande première fosse (en bleu) dont la découverte met 6 ans à être retirée, et qu'il n'est pas possible de déterminer un ordre d'exploitation de cette première fosse dans Whittle, qui ne peut pas définir de fosse plus petite (si on baisse le *revenue factor*, il n'y a alors plus de fosse rentable). Cette fosse est la plus grande fosse rentable avec une pente à 15°.

#### 4.4 Avantages par rapport à la définition manuelle des push backs

- Par rapport à la définition manuelle des push backs, cette méthode reste très influencée économiquement, et la forme des fosses dépend du gisement, alors qu'en définissant des

<sup>12</sup> On ne peut pas faire s'étendre l'exploitation selon plusieurs directions successives car l'expression de la distance est unique : DST.

<sup>13</sup> Un test a été fait avec un démarrage du Nord Est radial, et une pente à 59°, on obtient une VAN de 266 000 MFCFA, mais une telle succession de fosses ne représente pas un planning techniquement réalisable, car 59° n'est pas une pente de travail.

push back d'une petite à une très grande fosse, l'exploitation se fait par banc, de façon rectiligne (l'entre deux fosses est vidé banc par banc par les push backs)

- Cette méthode présente l'avantage de détailler les passages d'une fosse à l'autre lorsqu'en optimum économique les étapes sont éloignées les unes des autres (comme dans la Figure 36 par exemple)
- Il est possible de faire démarrer l'exploitation depuis n'importe quel point dont on a les coordonnées

#### **4.5 Inconvénients de cette méthode**

- Forcer Whittle à donner une direction d'exploitation au gisement peut s'avérer très utile pour déterminer dans quelle direction commencer. Cela ne convient cependant pas aux gisements non uniformément répartis, comme c'est le cas ici
- La méthode ne donne pas le meilleur point de départ, puisqu'on doit les tester un à un. Il faut déjà avoir une idée des départs potentiels
- Le développement des fosses ne se fait que dans une seule direction, ce qui n'est pas optimum économiquement
- Comparer les plannings d'exploitation nécessite d'établir des limites (ce qui n'est pas toujours facile comme vu ci-dessus) et un taux d'actualisation, dont le résultat va fortement dépendre. En ne mesurant que le bénéfice net non actualisé, on aurait la même valeurs pour tous les essais, puisque la fosse finale est la même



## **Conclusions et perspectives du travail d'option**

Le gisement d'Imouraren constitue pour Areva un objectif principal d'exploitation. Ses caractéristiques (teneur, extension, découverte) ont fait apparaître des problématiques inconnues (plusieurs types de traitement, recherche d'un planning d'exploitation) dont l'enjeu fut d'autant plus important que le gisement sur lequel elles ont été appliquées l'était. Plus que les résultats chiffrés, ce sont les méthodes qui sont décrites dans ce rapport qui importent, illustrées bien sûr de résultats comparatifs. Les outils développés sont généralisables et adaptables à d'autres gisements, dès lors que d'autres problèmes similaires se présenteront.

La méthode d'exportation multiparcelles vers Whittle permet d'obtenir des modèles plus réalistes du gisement étudié et donc de mieux connaître les revenus potentiels générés par son exploitation. Le risque d'erreur lié au passage d'un logiciel à l'autre (inhérent à la méthode précédemment utilisée) est également diminué. Cette méthode pourra être étendue à d'autres gisements, en particulier Somaïr où la méthode d'exportation existante par krigeage d'indicatrice est utilisée. Il reste beaucoup de comparaisons à faire entre les deux méthodes pour estimer de façon chiffrée le gain obtenu.

La méthode de comparaison des points de départ démontre que Whittle est un logiciel assez flexible, sur lequel on peut développer des outils nouveaux moyennant quelques connaissances basiques d'algorithmique.

Les méthodes n'ont pas été testées sur d'autres gisements, et il pourrait être intéressant de vérifier leur robustesse sur des gisements connus ou exploités, afin de comparer les données obtenues par la simulation aux données réelles (bénéfices) que l'on a à la fin de l'exploitation. Ces méthodes ont été développées dans le cadre de l'étude de préfaisabilité. Le modèle de coûts utilisé par exemple est celui de Somaïr, et il a été supposé que les coûts seraient similaires, mais on sait déjà que certains vont être différents. Le prix de l'Uranium change tous les jours, les coûts sont incertains et seront inévitablement amenés à changer. La ventilation des coûts fixes, s'est révélée d'une grande importance par l'amplitude des variations qu'elle entraîne selon le mode de répartition choisi, elle fera sans doute l'un des principaux enjeux de l'étude de faisabilité. La préfaisabilité vise à donner une image grossière mais la plus réaliste possible de ce que peut rapporter l'exploitation du gisement. Les chiffres ne sont pas primordiaux, c'est plus la forme de la fosse finale qui compte.

La recherche du point de départ fera l'objet de l'étude de faisabilité et devra prendre en compte les coûts de façon beaucoup plus fine (comme le coût de transport jusqu'à la verse à stérile en fonction de la distance, les économies générées par l'autorembayage, etc....).

Pour conclure, ce travail d'option a été très intéressant par les multiples facettes qu'il présentait (économiques et techniques) et s'imbriquait très bien dans l'étude de préfaisabilité voire dans la faisabilité pour le point de départ.

## Liste des Tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : exemple de définition des pentes sous Whittle .....                              | 18 |
| Tableau 2 : attributs initiaux.....  | 33 |
| Tableau 3 : attributs après krigeage d'indicatrice .....                                     | 33 |
| Tableau 4 : Modèle de coûts utilisé.....   | 37 |
| Tableau 5 : Résultat de l'optimisation en TD .....   | 39 |
| Tableau 6 : Résultats de l'optimisation TS .....   | 40 |
| Tableau 7 : données statistiques sur Imfout à la coupure 0,3%.....                           | 41 |
| Tableau 8:valeurs initiales du bloc Surpac.....  | 48 |
| Tableau 9 : comparaison des contenus de différents modèles selon la teneur de transition ... | 53 |
| Tableau 10 : comparaison des différentes fosses obtenues sur Imouraren .....                 | 55 |
| Tableau 11 : fosses emboîtées optimum économique.....  | 63 |
| Tableau 12 : petite prédécouverte, fosses emboîtées .....                                    | 65 |
| Tableau 13 : résultats avec pré découverte .....   | 65 |
| Tableau 14 : résultats pente 15° dans la fosse.....  | 67 |
| Tableau 15 : résultats pente 59° Ouest.....  | 68 |
| Tableau 16 : exploitation par année best case, selon Figure 36 .....                         | 72 |
| Tableau 17 : comparaison des différents schémas d'exploitation .....                         | 73 |

## Liste des Figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Carte de localisation du permis de recherche d'Imouraren.....           | 9  |
| Figure 2 : Log synthétique de la pile sédimentaire. (au 1/200 000).....           | 10 |
| Figure 3 : coupe simplifiée de la zone minéralisée .....                          | 10 |
| Figure 4 : répartition des teneurs par niveau .....                               | 11 |
| Figure 5 : exemple d'exécution de l'algorithme de Lerchs-Grossman .....           | 15 |
| Figure 6 : calcul du premier cône.....  | 16 |
| Figure 7 : retrait du cône inversé.....   | 16 |
| Figure 8 : résultat de l'algorithme .....   | 16 |
| Figure 9, <i>extrait du fichier bloc modèle Whittle</i> .....                     | 17 |
| Figure 10 : rapport économique de Whittle sur la fosse optimale .....             | 27 |
| Figure 11 : module d'exportation Surpac vers Whittle.....                         | 33 |
| Figure 12 : récapitulatif des optimisations d'Areva.....                          | 35 |
| Figure 13 : fosse calculée sous Whittle à $t_c=0,7\%$ .....                       | 36 |
| Figure 14: Schéma des valeurs des teneurs de coupure .....                        | 38 |
| Figure 15 : coûts implémentés en TD .....   | 39 |
| Figure 16 : implémentation des coûts TS.....                                      | 40 |
| Figure 17 : répartition des teneurs en Uranium sur Imfout à la coupure 0,3% ..... | 41 |
| Figure 18 : exemple d'utilisation des sous-blocs créés à partir d'un bloc .....   | 42 |
| Figure 19 : extrait d'un résumé de modèle Surpac (Imfout).....                    | 44 |
| Figure 20 : tailles disponibles à l'exportation.....                              | 44 |
| Figure 21 : Superblocks dans Surpac .....   | 45 |
| Figure 22 : localisation des sous blocs minéralisés.....                          | 46 |
| Figure 23 : Aperçu Surpac du module d'exportation vers Whittle.....               | 51 |
| Figure 24 : extrait du fichier *.mod avec parcelles .....                         | 51 |
| Figure 25 : Quantité de roches présentes dans le modèle (monoparcelle).....       | 52 |
| Figure 26 : quantité de roches présentes dans le modèle (multiparcelles).....     | 52 |
| Figure 27 : comparaison des fosses multiparcelle et monoparcelle .....            | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 28 : comparaison des résultats .....  | 56 |
| Figure 29 : fosses optimales emboîtées, ou <i>Best Case</i> ( <i>gisement de Fer en forme de cône d'Aguaes Claras, Brésil</i> )..... | 59 |
| Figure 30 : vue en 3D de la localisation des différentes zones du gisement.....  | 60 |
| Figure 31 : organisation de l'exploitation à Somaïr .....  | 61 |
| Figure 32 : répartition des teneurs en Uranium dans les zones superficielles de la fosse tc 0,6 %.....                               | 62 |
| Figure 33 Découverte artificielle .....  | 64 |
| Figure 34 : différents points de départ .....  | 64 |
| Figure 35: départ radial depuis le Nord-Est .....  | 69 |
| Figure 36 : Plan standard d'exploitation .....   | 69 |
| Figure 37 : développement radial.....  | 70 |
| Figure 38 : développement axial .....  | 70 |
| Figure 39 : Onglet « Limites » de Whittle .....  | 71 |



## Bibliographie

Thierry Coleou, 1986, *Le paramétrage technique des réserves*, Centre de Géostatistique des mines de paris

Lerchs and Grossman, 1965, *Optimum Design of Open-Pit Mine*, in Transactions, C.I.M, Volume LXVIII, pp. 17-24

## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>PREMIERE PARTIE : Cadre Général du travail d'option .....</b>                                | <b>7</b>  |
| 1 AREVA.....  | 8         |
| 1.1 Le groupe Areva .....   | 8         |
| 1.2 Le S.E.R. ....  | 8         |
| 2 Le gisement d'Imouraren .....   | 9         |
| 2.1 Situation et cadre géologique .....   | 9         |
| 3 Le traitement du minerai d'uranium .....  | 11        |
| <b>Deuxième partie : Comparaison entre Whittle et le Pit Optimizer de Surpac.....</b>           | <b>13</b> |
| 1 L'optimisation de fosse .....   | 14        |
| 1.1 L'algorithme de Lerchs-Grossman.....  | 14        |
| 1.1.1 Généralités.....  | 14        |
| 1.1.2 Principe de l'algorithme .....  | 14        |
| 1.2 L'algorithme du cône flottant.....  | 15        |
| 1.3 Optimisation et paramétrage technique .....   | 16        |
| 2 Les données d'entrée des programmes.....  | 17        |
| 2.1 Whittle 3.4.....  | 17        |
| 2.1.1 Le bloc modèle .....  | 17        |
| 2.1.2 La gestion des pentes.....  | 18        |
| 2.1.3 Le calcul des fosses optimales .....  | 19        |
| 2.1.4 L'intégration du temps, une fonction que Surpac n'a pas.....                              | 20        |
| 2.2 Surpac 5.1 avec pit Optimiser.....  | 23        |
| 2.2.1 Le bloc modèle .....  | 24        |
| 2.2.2 La gestion des pentes.....  | 24        |
| 2.2.3 Les données économiques.....  | 24        |
| 2.2.4 Les limites verticales.....   | 25        |
| 2.2.5 L'optimisation multi fosse .....  | 26        |
| 3 Le calcul des fosses.....   | 26        |
| 4 Les données en sortie.....  | 27        |
| 4.1 Whittle.....  | 27        |
| 4.2 Surpac .....  | 28        |
| 5 Résumé .....  | 29        |
| 5.1 Surpac .....  | 29        |
| 5.2 Whittle.....  | 29        |
| 6 Conclusion .....  | 29        |
| <b>Troisième partie : Développement d'une méthode d'exportation de Surpac vers Whittle.....</b> | <b>31</b> |
| 1 Problème initial d'exportation.....   | 32        |
| 1.1 Objectif .....  | 32        |
| 1.2 Outils présents dans Surpac.....  | 32        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.3   | <i>Méthodes d'optimisation</i> .....                                   | 34 |
| 1.3.1 | Optimisation sur la teneur moyenne des blocs .....                     | 34 |
| 1.3.2 | Optimisation de fosse suivie de valorisation du minerai marginal ..... | 34 |
| 2     | <b>Calcul de teneurs de coupure</b> .....                              | 37 |
| 2.1   | <i>Données économiques</i> .....                                       | 37 |
| 2.2   | <i>Formules utilisées pour les teneurs de coupure</i> .....            | 38 |
| 2.2.1 | Teneur de coupure à l'entrée de l'usine : .....                        | 38 |
| 2.3   | <i>Calcul Whittle</i> : .....  | 39 |
| 2.3.1 | Traitement dynamique .....   | 39 |
| 2.3.2 | Traitement Statique .....  | 39 |
| 2.3.3 | Traitement dynamique + statique .....                                  | 40 |
| 3     | <b>Principe de la méthode d'exportation par parcelles</b> .....        | 42 |
| 4     | <b>Différentiation des sous blocs dans Surpac</b> .....                | 43 |
| 4.1   | <i>Modèle initial</i> .....  | 43 |
| 4.2   | <i>Opération de sous blocking</i> .....                                | 43 |
| 4.3   | <i>Séparation du minerai en tranche de teneur</i> .....                | 45 |
| 4.3.1 | Attribut « parceltype » et différenciation des sous-blocs .....        | 46 |
| 4.3.2 | Nouvelle teneur .....  | 48 |
| 4.3.3 | Nouvelle proportion .....  | 49 |
| 4.3.4 | Nouvelle densité .....   | 50 |
| 5     | <b>Exportation vers Whittle</b> .....                                  | 50 |
| 6     | <b>Erreurs d'approximation lors de l'exportation</b> .....             | 52 |
| 6.1   | <i>Contenu du modèle sous Whittle</i> .....                            | 52 |
| 7     | <b>Application sur le gisement d'Imouraren</b> .....                   | 53 |
| 7.1   | <i>Données utilisées</i> .....   | 53 |
| 7.2   | <i>Résultat de l'optimisation</i> .....                                | 54 |
| 8     | <b>Conclusion sur la méthode</b> .....                                 | 57 |

## **Quatrième partie : Recherche d'un point de départ pour la fosse d'Imouraren** ..... **58**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <b>Introduction</b> .....                              | 59 |
| 1.1   | <i>L'optimum économique</i> .....                      | 59 |
| 1.2   | <i>Cadre de l'étude</i> .....                          | 59 |
| 1.2.1 | Zone étudiée .....                                     | 59 |
| 1.2.2 | Position du problème .....                             | 60 |
| 2     | <b>Optimisation standard</b> .....                     | 62 |
| 2.1   | <i>Introduction</i> .....                              | 62 |
| 2.2   | <i>Etapas de creusement : optimum économique</i> ..... | 62 |
| 2.3   | <i>Tentatives de points de départ</i> .....            | 64 |
| 2.3.1 | Résultat départ 1 .....                                | 64 |
| 2.3.2 | Résultat départ 2 .....                                | 65 |
| 3     | <b>Optimisation avec pente de travail</b> .....        | 66 |
| 3.1   | <i>Des contraintes de pente modifiées</i> .....        | 66 |
| 3.2   | <i>Optimisation sans pré trou</i> .....                | 66 |
| 3.3   | <i>Pente à 59° sur le secteur ouest</i> .....          | 68 |
| 3.3.1 | Résultats .....  | 68 |
| 3.4   | <i>Imprécisions de l'étude</i> : .....                 | 68 |
| 4     | <b>Directions d'exploitation</b> : .....               | 69 |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 4.1  | <i>Introduction</i> .....  | 69        |
| 4.2  | <i>Principe</i> .....  | 69        |
| 4.3  | <i>Résultats</i> .....   | 71        |
| 4.3.1  | Limites d'extraction : .....   | 71        |
| 4.3.2  | Comparaison de différents schémas d'exploitation .....                     | 73        |
| 4.4  | <i>Avantages par rapport à la définition manuelle des push backs</i> ..... | 74        |
| 4.5  | <i>Inconvénients de cette méthode</i> .....                                | 75        |
| <b>Conclusions et perspectives du travail d'option</b> ..... |  | <b>76</b> |