
OPTIMISATION DES MAILLES DE FORAGES POUR LES BESOINS DU CALCUL DE RESSOURCES

Projet 2016-03

Par : Lucie Mathieu Ph.D.
2016



AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Mathieu, L., 2017. Optimisation des mailles de forages pour les besoins du calcul de ressources. Rapport, Projet CONSOREM 2016-03, 119 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Les calculs de ressources sont l'un des principaux enjeux des compagnies minières. Ces calculs sont complexes, peuvent engendrer des erreurs et ne font pas toujours l'objet d'une évaluation de l'incertitude (ou degré de confiance que l'on peut accorder au modèle). Ce projet a permis de faire une revue des méthodes de calcul des ressources les plus souvent utilisées et de mettre l'accent sur l'importance d'évaluer l'incertitude afin de permettre une prise de décision éclairée. La façon traditionnelle d'estimer un volume est de dessiner des surfaces dans l'espace à partir de données de forage, de l'interprétation que la personne qualifiée fait de ces données, et d'un logiciel 3D. Ce type de modèle est rassurant, car la personne qualifiée contrôle chaque étape de la confection du modèle conceptuel, mais il est aussi déterministe c'est-à-dire qu'une seule solution est considérée et rien ne permet d'évaluer la qualité de cette solution. En d'autres mots, il est impossible d'estimer l'incertitude liée à ce modèle. Des méthodes alternatives existent, mais la plus complète, et celle qui permet au mieux d'évaluer la probabilité que la zone minéralisée ait tel ou tel volume s'appellent simulations conditionnelles. Cette méthode est présentée en détail par ce projet, et est testée sur des données de forages provenant de contextes variés. Comme les simulations conditionnelles permettent une véritable évaluation de la qualité d'un modèle 3D, elles peuvent être utilisées pour comparer des modèles produits à partir de divers jeux de données de forages, ce qui a permis de tester plusieurs mailles de forage. Ces études de cas ne permettent pas de dégager une norme de maille idéale pour un type spécifique de gisement ; les mailles devant probablement être ajustées au cas par cas. Cependant, ce projet a permis de mettre en avant le grand potentiel des simulations conditionnelles et de procurer des clés pour faciliter leurs utilisations.

On retiendra les points suivants de ce projet : un calcul de ressources est un modèle et évaluer la qualité de ce modèle (l'incertitude) est aussi important que sa confection. L'évaluation des incertitudes ne doit pas se cantonner à l'interpolation des teneurs, mais doit aussi considérer le positionnement et de la forme modélisée de la zone minéralisée.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux.....	viii
1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	1
2 INTRODUCTION	2
3 MÉTHODES DE CALCUL DU VOLUME.....	4
3.1 Méthodes déterministes	4
3.1.1 Logiciels classiques (type CAD).....	4
3.1.2 Logiciel Leapfrog® – fonction RBF	10
3.1.3 Autres logiciels, fonctions, et outils	13
3.2 Calculer sans le modèle conceptuel.....	15
3.3 Modéliser l’enveloppe avec une fonction distance	17
3.4 Modèles multiparamètres	18
3.5 Modèle probabiliste (simulations conditionnelles).....	21
3.5.1 Modèle probabiliste – exemples.....	21
3.5.2 Modèle probabiliste – vers la 3D	26
3.5.3 Modèle probabilistes - logiciels	27
3.6 Conclusions	28
3.7 Perspectives : les logiciels gratuits	29
4 TESTER LES MAILLES AVEC DES SIMULATIONS CONDITIONNELLES.....	31
4.1 Présentation du logiciel SGeMS.....	31
4.2 SGS – <i>Sequential Gaussian Simulation</i>	32
4.3 Simulations basées sur des statistiques multipoints : introduction	37
4.3.1 Prérequis : IE – Image d’entraînement.....	37
4.3.2 Génération d’IE de type expertly-derived	40
4.3.3 Plaidoyer pour un logiciel	41
4.3.4 Présentation de la méthode FILTERSIM	41
4.4 Simulations et statistiques multipoints : exemples 2D, données d’Arianne	43
4.4.1 FILTERSIM 1 : section horizontale.....	43
4.4.2 FILTERSIM 2 : section verticale YZ ($X = 374782$)	45
4.4.3 FILTERSIM 3 : sections verticales YZ.....	48
4.5 Simulations et statistiques multipoints : exemple 3D, données d’Arianne Phosphate.....	49
4.5.1 FILTERSIM 1 : modèle de blocs d’Arianne	49
4.6 Simulations et statistiques multipoints : données de Glencore	56
4.6.1 Présentation des données et extraction des forages	56
4.6.2 Test 1 – Equinox	57

4.6.3	Test 2 – Bracemac Key tuffite – Forages de surface	65
4.6.4	Test 3 – Bracemac Key tuffite – Divers jeux de forages	75
4.7	Simulations et statistiques multipoints : données d'Agnico	83
4.7.1	Présentation des données et extraction des forages	83
4.7.2	Test 1 – Lithologie en section	83
4.7.3	Test 2 – Lithologie et analyse de contrôle des teneurs en section	85
4.7.4	Test 3 – Lithologie et analyse de contrôle des teneurs en section	89
5	AJUSTER UN ELLIPSOÏDE À DES POINTS 3D	92
5.1	Revue de la littérature : ellipsoïdes	92
5.2	Description de logiciel « Générateur d'ellipsoïdes »	93
5.3	Logiciel proposé : détails pratiques	97
5.4	Notes sur le logiciel proposé	98
6	CONCLUSIONS	100
	RÉFÉRENCES	101
	ANNEXE I	106
	ANNEXE II	107
	ANNEXE III	110
	ANNEXE IV	112
	ANNEXE V	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Exemple de modèle 3D intégrant une grande variété de données. Ce type de document est souvent utilisé pour centraliser toutes les données disponibles sur un gisement (tiré de Fallara et al., 2006).	5
Figure 2	: Construction d'une surface 3D à partir de sections et de lignes (tiré de Sides, 1997).	6
Figure 3	: Étapes de la construction d'un modèle 3D (tiré de Fallara et al., 2006).	7
Figure 4	: Interpolation d'isocontours des teneurs en 3D sous Leapfrog® (tiré de Cowan et al., 2002).	11
Figure 5	: L'impressionnant (simple et efficace) outil de dessin de Leapfrog® (création de surfaces à partir de lignes) (tiré de Cowan et al., 2004).	12
Figure 6	: Comparaison entre la méthode classique (numérisation manuelle) et les méthodes utilisant la <i>implicit modelling</i> «modélisation implicite» (tiré de Birch, 2014).	12
Figure 7	: Illustration de la méthode d'interpolation du champ de potentiel appliquée à des données structurales. En b) on voit le tracé des contacts qui respectent les points de contrôle et qui suivent des isolignes du champ de potentiel (tiré de McNerney et al., 2005).	14
Figure 8	: Utilisation de l'algorithme SFI pour modéliser une surface plissée (tiré de Hillier et al., 2013).	14
Figure 9	: Interpolation des teneurs par krigeage et résultat du modèle de blocs (tiré de Li et Wang, 2014).	16
Figure 10	: Délimitation du domaine haut-grade à partir des analyses (tiré de Abzalov et Humphreys, 2002).	16
Figure 11	: Calcul de l'incertitude sur la position de la surface (limite entre deux forages) (tiré de Machuca-Mory et al., 2009).	18
Figure 12	: Sections montrant la probabilité croissante de se trouver à l'intérieur de la zone minéralisée (tirées de Machuca-Mory et al., 2009).	18
Figure 13	: (a) Modèle conceptuel des zones minéralisées, réalisé à partir d'interprétations faites en sections (voir section 3.1.1), montrant plusieurs problèmes géométriques. La géométrie de ce gisement est trop complexe pour que ce type d'approche soit efficace ; (b) Isocontours (Leapfrog®) des paramètres (veine, foliation, et altération) combinés par probabilités conditionnelles (tiré de Hill et al., 2014).	20

Figure 14 : Résultat de la simulation SGS : cartes montrant les probabilités que chaque zone ait une épaisseur supérieure à une valeur donnée (tiré De Oliveira et al., 2015).	22
Figure 15 : Simulations de la distribution de dépôts glaciaires (tiré de He et al., 2014).	22
Figure 16 : Simulations d'une forme de dépôt. Vue en coupe : a) de l'image d'entraînement, b) le résultat filtré selon le maximum, c) filtré selon la médiane et d) filtré selon le minimum (tiré de Goodfellow et al., 2012).	23
Figure 17 : (a) interprétation géologique « à la main » de la zone minéralisée (cette interprétation sert d'image d'entraînement, IE, dans cet exemple), basée sur l'hypothèse que la minéralisation est parallèle à la foliation ; (b) modèle conceptuel et planification des chantiers d'extraction (<i>stope</i>) (tiré de Srivastava, 2005).	25
Figure 18 : Simulations de la géométrie du dépôt (tiré de Srivastava 2005).	25
Figure 19 : Exemple d'images d'entraînement 3D et de simulation (tiré de Boucher, 2011).	26
Figure 20 : Exemple d'image d'entraînement IE (aquifère) utilisée dans les directions xz et yz (tiré de Comunian et al., 2012). Il est possible de simuler de 2 à plusieurs lithologies avec des images d'entraînement.	27
Figure 21 : Logiciel SGeMS, montrant une interpolation de type krigeage réalisée le long d'une grille 3D, dont 3 tranches sont montrées.	32
Figure 22 : Variogrammes expérimentaux et modélisés calculés à partir des teneurs de P ₂ O ₅ (% pds).	33
Figure 23 : Vue en 2D (en carte) des données de forages d'Arianne Phosphate. Le test 1 utilise tous les forages, et les tests 2 (en bleu) et 3 (en rouge) n'utilisent qu'une partie des forages.	33
Figure 24 : Sections réalisées dans une grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 1). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P ₂ O ₅ supérieure à 4% pds.	35
Figure 25 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 1). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P ₂ O ₅ supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité > 0,5 (50% de chances) d'être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.	35
Figure 26 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 1). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P ₂ O ₅ supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité > 0,8 (80% de chances) d'être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.	36
Figure 27 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 2). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P ₂ O ₅ supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité > 0,8 (80% de chances) d'être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.	36
Figure 28 : Différents types d'images d'entraînement (tiré de Sell, 2015).	38
Figure 29 : Exemple de reconstruction de signal avec une méthode <i>low-rank</i> . La figure de gauche contient 80% d'informations manquantes, et celle de droite correspond à la reconstruction de cette image (tiré de Liu et al., 2009).	39
Figure 30 : Exemple de TI ; à gauche : image.bmp exportée à partir du logiciel Illustrator (notez que l'image est à l'envers) ; à droite : importations de la liste de 0 (bleu) et 1 (rouge) sous SGeMS (dans une grille 2D).	40
Figure 31 : Données de forages et grille dans laquelle l'interpolation a été effectuée (rectangle blanc). Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite).	43
Figure 32 : Deux images d'entraînement représentées avec le logiciel SGeMS (cellules = 10 * 10 m). Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite).	44
Figure 33 : Résultat de simulations effectuées avec différentes des images d'entraînement. Les cartes représentent la probabilité que chaque zone de la grille (cellules de 10 * 10 m) a, d'être située à l'intérieur du gisement. L'échelle des couleurs va de 0 (bleu, 0% de chances d'être situé dans la nelsonite) à 1 (rouge, 100% de chances d'être situé dans la nelsonite).	44
Figure 34 : Calcul de l'aire de la nelsonite si on considère les zones qui ont 80% de chances de se situer dans cette unité, à partir du « Script Editor » du logiciel SGeMS. Le calcul est effectué pour les deux cartes de probabilités (Figure 33).	45
Figure 35 : Image de gauche : lithologies intersectées en forage ; Image de droite : IE (résolution = 5 * 5 m).	46
Figure 36 : Exemples de 3 réalisations FILTERSIM (sur les 100 réalisées). En bas à droite : carte de probabilité d'avoir une valeur > 3,5 (c.-à-d. de se situer dans l'unité de nelsonite).	47
Figure 37 : Les 3 IE en 2D utilisées pour simuler le volume et la forme de l'unité de nelsonite. De haut en bas, les sections sont les suivantes : YZ, XZ, et XY. Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite). Les IE ont des résolutions de 2 * 2 m (section YZ) et de 5 * 5 m (sections XY et XZ).	48
Figure 38 : Modèle de blocs d'Arianne Phosphate (teneurs en P ₂ O ₅ interpolées) et image d'entraînement 3D dérivée de ce modèle.	50
Figure 39 : Script ayant permis d'attribuer des valeurs de 0 ou 1 aux données de forages (exemple montré ici) et aux données dérivées du modèle de bloc d'Arianne Phosphate (c.-à-d. l'image d'entraînement).	50

Figure 40 : Échantillons de forage (teneurs en P ₂ O ₅) classés selon les catégories 0 et 1 (test 1). L'encadré blanc montre la grille qui a reçu les données des simulations (résolution = 20*20*20).....	51
Figure 41 : Probabilités d'être situé dans une zone ayant une teneur de P ₂ O ₅ > 4% pds (test 1). Seules les zones ayant une probabilité > 50% (carte du haut) et > 80% (carte du bas) sont montrées, les autres étant mises en transparence.	52
Figure 42 : Probabilités d'être situé dans une zone ayant une teneur de P ₂ O ₅ > 4% pds (test 1). Le résultat est montré le long de 3 sections (en haut) et avec l'entièreté de la grille (en bas).	53
Figure 43 : Script ayant permis de compter les blocs des grilles contenant les données de probabilités (voir figures 41 et 42).	53
Figure 44 : Forages d'Arianne Phosphate représentés selon leurs coordonnées x et y. Les forages en rouge sont ceux utilisés par le test 4.....	54
Figure 45 : Probabilités d'être situé dans une zone ayant une teneur de P ₂ O ₅ > 4% pds (test 4). Le résultat est montré en entier (en haut) ou en partie (en bas; seules les zones ayant une probabilité > 80% sont montrées, les autres étant mises en transparence).	55
Figure 46 : Courbes de fonction de distribution cumulée des probabilités située dans une zone ayant une teneur de P ₂ O ₅ > 4% pds, montrées pour les 4 tests.	55
Figure 47 : Script ayant permis d'effectuer le « desurvey ». Notez qu'avec le module PyGslib, une ligne de code est suffisante pour effectuer l'opération (lignes 72-73).....	56
Figure 48 : a) Données lithologiques des forages documentant la lentille Equinox, avec les codes 1 (rouge – lentille de sulfures massifs) et 0 (bleu – autres lithologies); b) TI 3D confectionnées à partir du modèle conceptuel d'Equinox (seules les zones codées 1, en rouge, sont montrées).	58
Figure 49 : Script permettant de créer un modèle de blocs à partir d'un modèle conceptuel.....	58
Figure 50 : Blocs (bleu) identifiés comme étant situés à l'intérieur du modèle conceptuel avec la procédure décrite dans le texte. Les points rouges correspondent aux « vertex » exportés depuis le fichier « Equinox.dxf » (pour une tranche de 5 m d'épaisseur dans la direction x).	60
Figure 51 : Script permettant d'extraire les forages selon diverses mailles de forages (extrait).	61
Figure 52 : Résultats des 20 tests. Les graphiques montrent le volume des blocs ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée en fonction des mailles de forages testées (a) et en fonction de la quantité de forages ayant intersectés la minéralisation utilisée pour chaque test (b).	64
Figure 53 : Résultats des 20 tests. Les graphiques montrent le poids (tonnages calculés avec une valeur unique de densité = 3,97 g/cm ³) ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée en fonction de la quantité de forages (utilisés pour chaque test) ayant intersectés la minéralisation. Les résultats sont comparés aux ressources indiquées et mesurées (estimé de Noranda 2001).	65
Figure 54 : Exemple de modifications effectuées sur les données de forages. « Fo_Obs » correspond aux lithologies observées en forage, et « Fo_Modif » montre le résultat d'une modification apportée à ces données. La colonne « contact » correspond aux contacts utilisés pour confectionner des images d'entraînement sous Leapfrog® (voir section suivante).....	67
Figure 55 : Vues des diverses images d'entraînements utilisées. Les zones minéralisées sont représentées en rouge, les zones altérées en verts, et les autres types de roches sont représentés en bleu.	68
Figure 56 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est > 0,5 (50%) sont montrés.....	69
Figure 57 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est > 0,2 (20%) sont montrés.....	70
Figure 58 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multipliée par 5 * 5 * 5) de chaque zone ayant une probabilité > 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, ou 0,8 d'être minéralisé sont reportés sur le graphique. Les tests sont regroupés en fonction du type de jeu de données de forage (observés ou modifiés, avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.....	72
Figure 59 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multiplié par 5 * 5 * 5) de chaque zone ayant une probabilité de valeur supérieure à 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, ou 0,8 d'être minéralisée, sont reportés sur le graphique. Les tests sont regroupés en fonction du type d'image d'entraînement et de forages (avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.	72
Figure 60 : Coupes au travers des modèles de blocs suivants : à droite, modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II ; et à gauche (4 coupes), résultats des divers tests (pour une vue en 3D de ces modèles de blocs, voir figures 56 et 57).....	73

Figure 61 : Résultats des divers tests. La surface occupée par les blocs simulés, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 0,1) [axes des X], est comparée au pourcentage de cette surface réellement occupée par la lentille minéralisée (représentée par le modèle conceptuel_II) [axes des Y]. Les tests sont regroupés en fonction du type d'IE et de forages (avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.....	74
Figure 62 : Résultats des divers tests (idem à Figure 61). Les tests sont regroupés en fonction du type d'IE utilisé.	74
Figure 63 : Position, en plan (coordonnées UTM18, NAD83), des colliers des forages utilisés pour effectuer les tests présentés dans cette section.....	76
Figure 64 : Vues des diverses images d'entraînement utilisées. Les zones minéralisées sont représentées en rouge, les zones altérées en verts, et les autres types de roches sont représentés en transparence.	76
Figure 65 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est > 0,5 (50%) sont montrés.....	78
Figure 66 : Résultats des diverses tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est > 0,2 (20%) sont montrés.	79
Figure 67 : Coupes au travers des modèles de blocs suivants : à droite, modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II ; et à gauche (4 coupes), résultats des divers tests (pour une vue en 3D de ces modèles de blocs, voir Figure 66 et Figure 65).....	81
Figure 68 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multiplié par 5 * 5 * 5) de chaque zone ayant une probabilité > 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, ou 0,8 d'être minéralisé, sont reportés sur le graphique.....	82
Figure 69 : Résultats des divers tests. Résultats des divers tests. La surface occupée par les blocs simulés, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 0,1) [axes des X], est comparée au pourcentage de cette surface réellement occupée par la lentille minéralisée (représentée par le modèle conceptuel_II) [axes des Y].....	82
Figure 70 : Image d'entraînement 2D (résolution de 5 m), confectionnée avec <i>Illustrator</i> à partir des données de forage. Le code couleur est le suivant : bleu-foncé (komatiite), bleu clair (S3), jaune (gabbro), et rouge (QV).	84
Figure 71 : Données de forages représentées avec le logiciel SGEMS. Le code couleur est le suivant : bleu-foncé (komatiite), bleu clair (S3), jaune (gabbro), et rouge (QV).....	84
Figure 72 : Résultats du test 1 montrés sous la forme d'un modèle de blocs qui contient la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge).	85
Figure 73 : TI 2D (résolution de 5 m), confectionnée avec <i>Illustrator</i> à partir des données de forage. Le code couleur est le suivant : bleu (stériles) et rouge (zones d'intérêt, veines de quartz et/ou zones minéralisées en or).	87
Figure 74 : Résultats des simulations SIM01 (en haut à gauche) et SIM02 (en haut à droite) du test 2 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). La carte montrée en bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM01 et SIM02.....	87
Figure 75 : Résultats des simulations SIM03 (en haut à gauche), SIM04 (en haut à droite), SIM05 (au milieu à gauche), et SIM06 (au milieu à droite) du test 2 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond à la combinaison des résultats de SIM03, SIM04, SIM05, et SIM06.	88
Figure 76 : Résultats combinés des 2 simulations effectuées à partir des teneurs en Au (en haut à gauche) et 4 simulations effectuées à partir des veines de quartz (en haut à droite) montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des 6 simulations.	89
Figure 77 : Résultats des simulations SIM01 (en haut à gauche) et SIM02 (en haut à droite) du test 3 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM01 et SIM02.	90
Figure 78 : Résultats des simulations SIM03 (en haut à gauche), SIM04 (en haut à droite), SIM05 (au milieu à gauche), et SIM06 (au milieu à droite) du test 3 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM03, SIM04, SIM05, et SIM06.	91
Figure 79 : Ellipsoïde (tiré de Bektas 2015).	93
Figure 80 : Ouverture de l'exécutable « Générateur d'ellipsoïdes » et exemples de fichier .dat (format acceptable en entrée). Le fichier « <i>Data_sample.dat</i> » montré à droite de l'image a été ouvert depuis le logiciel, et les paramètres des ellipsoïdes ont pu être calculés à partir de ces points.....	95

Figure 81 : Génération de l'ellipsoïde « *best fit* » (graphique 3D) et du graphique 2D montrant la géométrie de gisements abitibiens. Ces graphiques s'obtiennent en ouvrant un fichier .dat avec le bouton « ouvrir fichier .dat ». 96

Figure 82 : Génération de l'ellipsoïde personnalisée (graphique 3D) et du graphique 2D montrant la géométrie de gisements abitibiens. Ces graphiques s'obtiennent avec le bouton « calculer nouvel ellipsoïde (2) ». 96

Figure 83 : Générations d'ellipses à l'aide du module « *OpenCV* » (voir texte pour explications). La figure illustre les deux paramètres auxquels ce type de procédure permet d'avoir accès : le volume approximatif du gisement et la position approximative de l'extrémité de la lentille minéralisée. 98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pourquoi évaluer l'incertitude, le « risque »?.....	3
Tableau 2 : Résultats des simulations conditionnelles pour les 3 tests	34
Tableau 3 : Estimation des ressources pour la zone à Paul (tiré de Rachidi et Duplessis, 2015)	34
Tableau 4 : Résultats de la simulation <i>FILTERSIM</i>	54
Tableau 5 : Résultats des tests effectués, présentés en quantité de blocs ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée. Pour obtenir le volume, multipliez les chiffres par 5 * 5 * 5.....	63
Tableau 6 : Caractéristiques des tests effectués.	69
Tableau 7 : Caractéristiques des tests effectués et erreurs générales.....	73
Tableau 8 : Caractéristiques des tests effectués.	77
Tableau 9 : Caractéristiques des tests effectués et erreurs générales.....	82

1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Le calcul de ressources est l'un des principaux enjeux des compagnies minières. Ce calcul est complexe, peut contenir des erreurs, et ne fait pas toujours l'objet d'une évaluation de l'incertitude (ou du degré de confiance que l'on peut accorder au modèle). Ce projet a pour objectif de faire une revue des méthodes du calcul des ressources les plus souvent utilisées, et mettra l'accent sur l'importance d'évaluer l'incertitude afin de permettre une prise de décision éclairée.

Les étapes du calcul des ressources sont les suivantes (inspiré de Osterholt et al., 2009) :

- a) compréhension de la géologie et du gisement (application de modèles, etc.);
- b) modélisation du dépôt en 3D (pour le calcul du volume);
- c) interpolation ou modélisation de la densité (pour le calcul du tonnage);
- d) remplissage du volume du dépôt par des valeurs de teneurs interpolées (calcul de la teneur moyenne).

L'interpolation 3D des teneurs a été discutée dans un précédent projet (projet CONSOREM 2015-03 ; Mathieu, 2016). Ce projet se concentre sur les méthodes utilisées pour évaluer le tonnage. Le tonnage est un volume multiplié par une densité. Comme l'interpolation des données de densité est un problème relativement similaire à celui de l'interpolation des teneurs, ce projet s'intéresse aux méthodes qui permettent d'évaluer le volume des dépôts.

2 INTRODUCTION

Une étude de divers gisements réconciliés par des opérations de minage a conduit Dominy et al. (2002) à conclure que l'estimation du tonnage présente souvent les deux problèmes suivants :

- 1) le volume est généralement mal délimité ;
- 2) la densité est souvent mal estimée, car peu prise en considération (rareté des mesures et peu d'efforts mis sur l'interpolation).

Ce projet se concentre sur l'estimation du volume. Une remarque sera cependant faite sur la **densité**. Le calcul du tonnage (= volume * densité) doit s'appuyer sur un bon estimé de la densité. Cette information est, par exemple, essentielle aux ingénieurs miniers (p.ex. combien de camions seront nécessaires pour retirer un volume donné de roches ?).

Lorsque l'on tente de délimiter le volume d'un gisement, une notion qui revient fréquemment est celle de la **continuité** de la minéralisation. Il y a deux types de continuités (Dominy et al., 2000) : 1) continuité géologique (celle que l'on modélise avec un modèle 3D souvent) et 2) continuité des teneurs (celle qui est plus souvent appréhendée avec une interpolation spatiale, bien que le tracé 3D des enveloppes minéralisées soit utilisé). Dominy et al. (2000) indiquent que la continuité ne peut pas être modélisée et qu'elle doit être prouvée par échantillonnage, mais ils ne définissent pas ce que pourrait être un échantillonnage raisonnable, ou suffisamment abondant.

Un autre paramètre qu'il est nécessaire de prendre en considération est celui de la teneur de coupure (*cut-off*), qui peut prendre en compte des limites lithologiques ou être déterminée à partir des teneurs uniquement (utilisation de considérations sur la continuité, ou de statistiques, etc.). Certains auteurs par exemple, utilisent des diagrammes $\log(\text{volume})$ versus $\log(\text{teneurs})$ pour choisir une valeur de teneur de coupure (Afzal et al., 2013). Mais ce choix ne repose pas uniquement sur les échantillons : il doit délimiter une ressource, c.-à-d. un volume de roches qui doit avoir une probabilité raisonnable de faire l'objet d'une extraction économique. Le choix de la teneur de coupure fait donc intervenir des paramètres économiques, qui ne seront pas discutés dans le cadre de ce projet.

Le calcul du volume est souvent effectué par l'intermédiaire d'une modélisation conceptuelle 3D du gisement (*wireframe*). En fait, les modèles 3D sont produits pour diverses raisons :

- compiler et rassembler toutes les données disponibles sous une même interface logiciel ;
- représenter le gisement pour le comprendre – s'assurer que le modèle utilisé est valide, qu'il n'introduit pas d'incohérences géométriques ;
- traiter les données en 3D (comme on le ferait avec un système d'information géographique (SIG) plus classique), afin de définir des zones prospectives ;
- représenter le gisement en 3D afin d'en calculer le volume ;
- produire une représentation du gisement qui peut être communiquée aux ingénieurs miniers, afin de permettre la conception de la mine.

On n’attend souvent d’un même modèle qu’il remplisse toutes ces fonctions. La fonction qui nous intéresse dans ce projet est celle qui permet de calculer le volume. Cependant, comme nous le verrons dans la section 3, il est possible de calculer des volumes sans utiliser de modèles conceptuels.

Dans de nombreux cas, le volume est calculé directement à partir du modèle conceptuel. Ensuite, un modèle de blocs est créé à l’intérieur du modèle conceptuel et les teneurs sont interpolées le long de cette grille. Pendant ces étapes essentielles du calcul des ressources, l’incertitude est rarement évaluée, ou n’est évaluée qu’au moment d’estimer les teneurs (utilisation de la *kriging variance*, par exemple, pour classer les ressources). L’estimé des incertitudes est jugé essentiel par divers auteurs (voir Tableau 1), incluant l’auteur de ce rapport.

En fait, il n’existe qu’une seule technique capable d’estimer l’incertitude de façon satisfaisante, il s’agit des simulations conditionnelles. Cette méthode sera abondamment présentée, utilisée, et discutée dans le cadre de ce projet, car elle est de plus en plus populaire (non seulement dans le domaine pétrolier) et qu’elle pourrait un jour permettre de créer une charte claire et normée pour classer les ressources (p.ex. une ressource mesurée pourrait correspondre à une probabilité > n%, calculée à partir de simulations conditionnelles, de se situer dans la zone minéralisée).

Tableau 1 : Pourquoi évaluer l’incertitude, le « risque »?

Citation	
FitzGerald et al., 2009	« <i>When assessing resources, knowledge of the degree of uncertainty of the estimation is as important as the estimate itself.</i> »
Birch, 2014	« <i>Prediction has an extrapolative rather than interpolative character, and thus involves risk and leads to decision-making (Hodkiewicz, 2013).</i> »

Ce rapport est organisé de la façon suivante : 1) revue des techniques populaires qui permettent d’estimer le volume d’un objet géologique; 2) présentation et utilisation des simulations conditionnelles pour tester des mailles de forages utilisées par des entreprises membres de CONSOREM soit Ariane Phosphate, Glencore et Agnico-Eagle (cette section contient un guide d’utilisation limité du logiciel SGeMS); et 3) présentation d’un outil permettant d’ajuster un ellipsoïde à une série d’intersections obtenues en forage (notez que l’outil n’est pas entièrement satisfaisant et demandera à être retravaillé à l’avenir, seule une version préliminaire est proposée).

3 MÉTHODES DE CALCUL DU VOLUME

Le volume d'un gisement peut être calculé à partir d'une enveloppe 3D construite à partir d'interprétations en plans et en sections des données disponibles (log de forage principalement). La construction de modèle conceptuel est la méthode la plus communément utilisée par l'industrie minière, mais cette technique a le désavantage de ne pas permettre une quantification de l'incertitude liée au calcul du volume (voir section 3.1). Les autres méthodes présentées dans cette section sont moins populaires, parfois moins faciles à mettre en œuvre, mais ont l'avantage de poser la question de la quantification des incertitudes.

Notez que les codes internationaux (CIM, JORC, etc.) ne recommandent pas qu'une méthode particulière soit utilisée pour la construction des modèles 3D. Les codes indiquent seulement que les paramètres du modèle doivent être clairement présentés et que les interprétations doivent être raisonnables et en accord avec les données disponibles (d'après Birch, 2014).

3.1 Méthodes déterministes

La méthode déterministe correspond à la construction d'un modèle 3D « à la main », par un expert. Cette méthode permet une intégration d'une grande quantité de données et fait appel au meilleur jugement de la personne qualifiée. Elle est cependant subjective et ne permet pas une quantification aisée de l'incertitude sur la forme et la position des surfaces. Il n'est généralement pas possible de quantifier l'incertitude liée au calcul du volume à partir de tels modèles.

3.1.1 Logiciels classiques (type CAD)

Les logiciels 3D disponibles sont nombreux. Dans cette section, nous discuterons des logiciels qui permettent la réalisation de dessins en coupes et en section, et l'interpolation des surfaces à partir d'une série de guides. Ces logiciels sont des versions 3D du dessin vectoriel en 2D offert par des logiciels de type « *Computer-Aided Design* » (CAD). Le logiciel Leapfrog®, qui utilise des fonctions pour interpoler et représenter les surfaces, est discuté dans la section suivante.

Les logiciels 3D, tels que Datamine, Gemcom et GoCAD sont très utiles pour rassembler toutes les données disponibles sur un gisement sous une même interface (Figure 1). L'utilisation de ce type de logiciel par l'industrie minière est devenue populaire vers la fin des années 80 (Gibbs, 1990). Depuis ce temps, l'interpolation des modèles conceptuels à partir de contacts géologiques interprétés en sections et en plans (à partir de données de forage, etc.) est la méthode la plus utilisée pour la construction de modèles 3D (Houlding, 2000).

Le vocabulaire utilisé pour décrire ce type de modèle, et les classer est abondant. Les résumés et les définitions de nombreux termes sont disponibles dans Sides (1997).

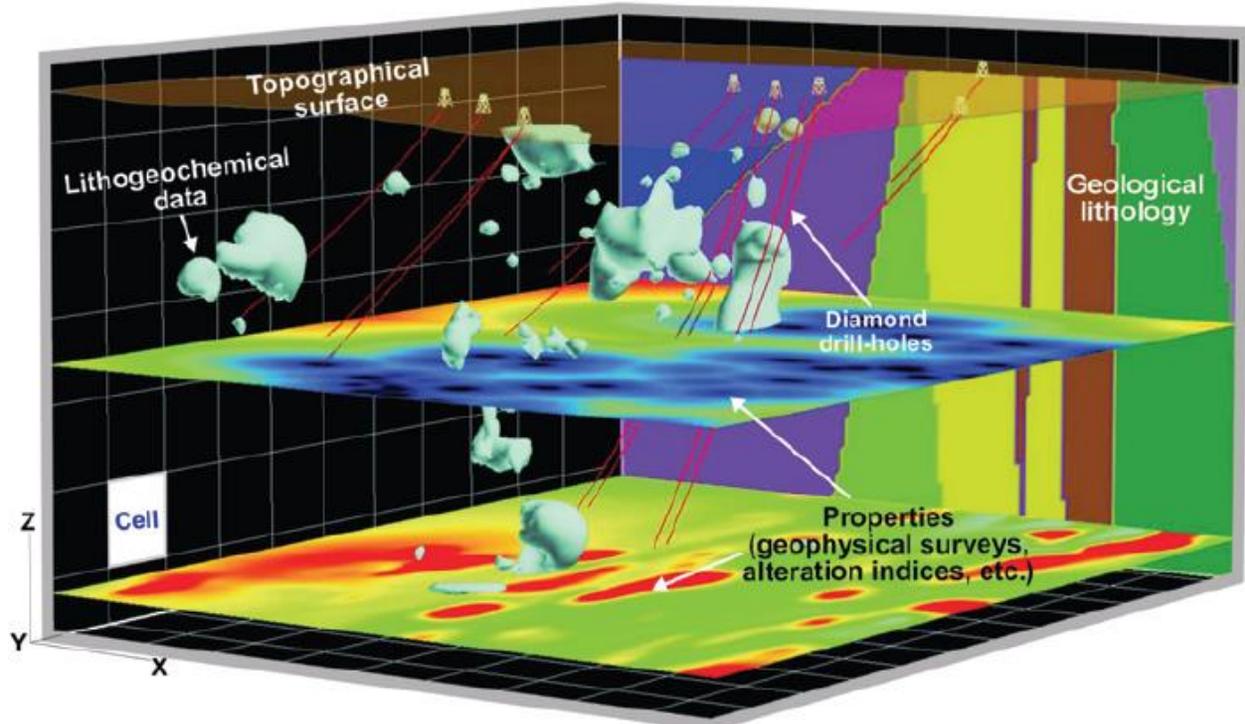


Figure 1 : Exemple de modèle 3D intégrant une grande variété de données. Ce type de document est souvent utilisé pour centraliser toutes les données disponibles sur un gisement (tiré de Fallara et al., 2006).

Méthodologie

Ces modèles sont principalement construits à partir d’affleurements et de forages. Des logiciels comme GoCAD ne sont pas conçus pour interpoler des surfaces à partir de points (ce type d’approche est discutée dans la section suivante), mais permettent de construire des surfaces à partir de lignes. Les modèles conceptuels sont donc généralement construits de la façon suivante :

- a) Compilation de données. Il s’agit généralement de points ou de segments (données de forages);
- b) Interprétation des données, en section et/ou en plan. Interprétation des données de surface (DEM et carte géologique). Ajout de lignes (*tie lines*) pour relier les lignes dessinées en plans et en sections. Ceci permet d’ajouter des lignes au modèle;
- c) Construction de surfaces à partir des lignes (Figure 2). Des logiciels comme GoCAD permettent l’édition des surfaces après leurs créations, ce qui permet de mettre à jour le modèle après chaque nouveau forage.
- d) Ce type de logiciels inclut également toute une série d’outils pour lisser, sur- ou sous-échantillonner les surfaces. Les surfaces sont généralement des réseaux triangulés irréguliers *Triangulated Irregular Network* (TIN), ou des grilles, régulières ou non (p.ex. Lelièvre et al., 2012). Ces représentations 3D des objets géologiques sont souvent appelées modèles **conceptuels**. Les logiciels 3D sont utilisés pour calculer le volume délimité par ces surfaces.

- e) Construction de volumes à partir des surfaces, en remplissant la surface de blocs (rectangles ou carrés de tailles constantes ou non, modèles équivolométriques ou multivolométriques, les modèles multi-résolutions étant fréquents). Les teneurs sont ensuite interpolées pour chaque bloc. Un volume divisé par des cellules (points 3D) contenant différents types de données (teneurs, lithologie, altération, etc.) est parfois appelé un « **voxet** ».

Un résumé de ces étapes est également proposé à la Figure 3. Notez que les données géophysiques semblent être intégrées aux modèles régionaux, mais semblent souvent être ignorées à l'échelle d'un gisement, pour une raison inconnue. Dans le détail, les méthodes de dessin en 3D font l'objet de très nombreux articles et manuels. Lorsque l'on dessine ce type de volume, les points suivants doivent être pris en compte (section inspirée d'une formation donnée par J.P. Paiement, Québec Mines, 2016) :

1. Utiliser les données régionales (forme des unités lithologiques, styles de déformation, etc.) pour bien représenter les structures locales ;
2. Avoir une idée sur la manière dont le gisement sera miné (en fosse ou en souterrain). Il est rarement pertinent de dessiner toutes les petites veinules. Le dessin d'une zone ayant une épaisseur pouvant être minée est souvent beaucoup plus pertinent. Idem pour le modèle de blocs : il n'est pas pertinent d'utiliser des blocs d'une taille inférieure à la plus petite unité de minage ou *smallest mining unit* (SMU) ;
3. Toujours modéliser le métalotecte (unité porteuse de la minéralisation, qui la contrôle ; comme une formation de fer par exemple) et la zone minéralisée. La forme de l'un peut aider à contrôler la géométrie de l'autre ;
4. Ne pas dessiner de pincements (*pitch out*) s'il n'y a pas de données permettant d'en interpréter un. Attention à la continuité : quelles sont les données qui la prouvent? Attention à l'extrapolation : décider d'une distance maximale d'interpolation une fois le dernier trou de forage passé. Utiliser des intervalles, des composites, et des domaines si nécessaires. Utiliser une teneur de modélisation inférieure à la teneur de coupure.

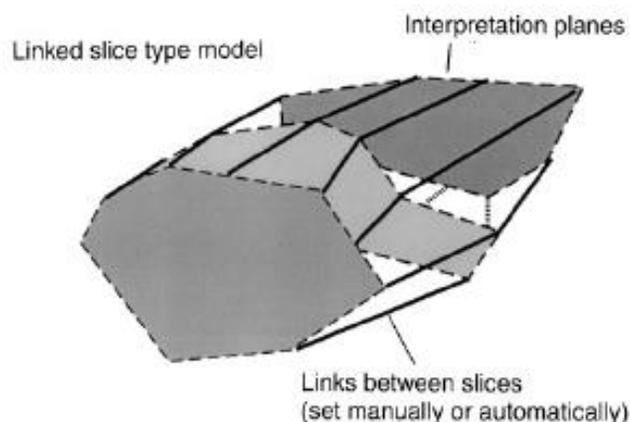


Figure 2 : Construction d'une surface 3D à partir de sections et de lignes (tiré de Sides, 1997).

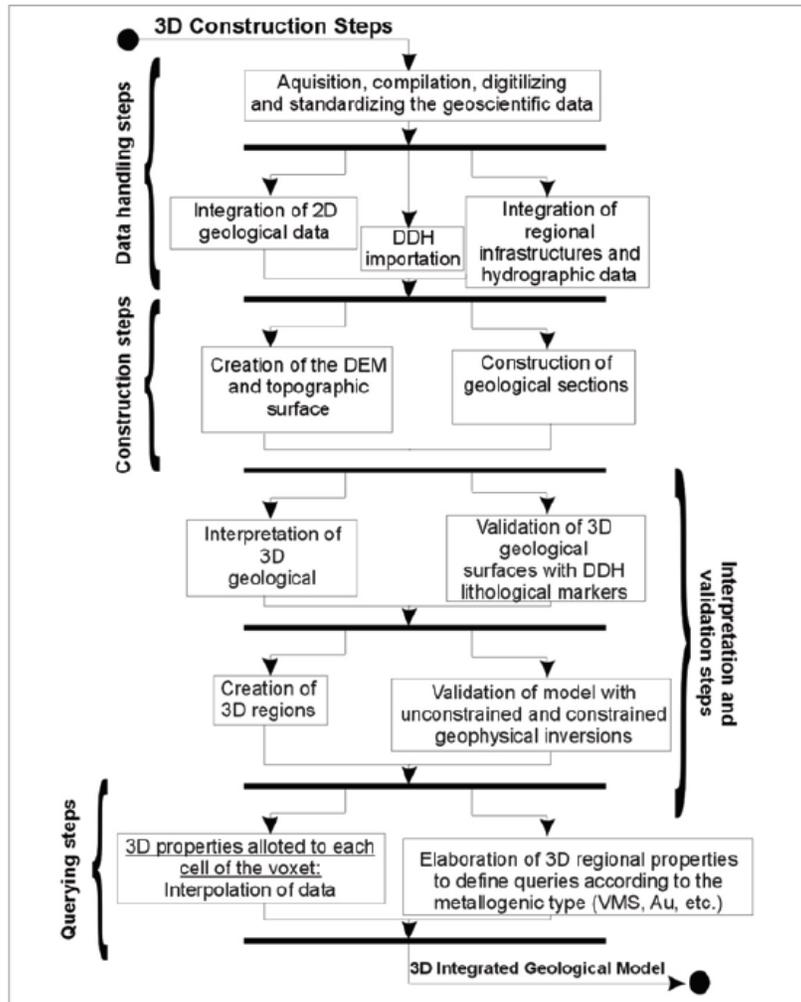


Figure 3 : Étapes de la construction d'un modèle 3D (tiré de Fallara et al., 2006).

Utilisation du modèle géologique (d'après Srivastava, 2005)

Le modèle géologique est souvent établi lorsque le forage systématique commence. Lorsque vient le temps de construire le modèle conceptuel pour évaluer les ressources, trois possibilités existent :

1. Ignorer le modèle géologique (souvent une mauvaise idée). Si les données d'analyse de contrôle des teneurs forment plusieurs populations, le modèle peut donner une raison de les séparer en domaines, ce qui améliorera l'estimé des ressources;
2. Modifier le modèle – Les sections interprétées par les personnes qualifiées sont souvent plus détaillées qu'il n'est nécessaire à l'estimé des ressources, et certains détails peuvent être jugés non-pertinents. La vision du dépôt change avec l'accumulation de données de forage, mais les coupes sont rarement complètement réinterprétées. Si la minéralisation était vue comme contrôlée par la lithologie au début, et s'avère en fait contrôlée par la structurale, les coupes devraient possiblement être modifiées pour raffiner le modèle conceptuel. Une réinterprétation complète des coupes au vu des nouvelles données, lorsque nécessaire, semble être une bonne pratique ;
3. Respecter le modèle - Si le modèle est à jour et de bonne qualité, c'est la meilleure approche.

Exemples

La méthode déterministe étant la plus populaire, de très nombreux exemples sont disponibles dans la littérature scientifique et dans les rapports NI-43-101. Citons le modèle régional de Fallara et al. (2006), qui intègre des données lithologiques, structurales, géophysiques, et géochimiques pour faciliter le ciblage.

Avantages

- Les modèles déterministes peuvent intégrer une grande variété de types de données (chimie, lithologie, géophysique, etc.) (voir Figure 3).
- Ces modèles sont modifiables en tout temps : les surfaces peuvent être modifiées lorsqu'un nouveau forage devient disponible (il n'est pas nécessaire de les recalculer en permanence).

Une question d'échelle ?

- Ce type de modèle est particulièrement utile à l'échelle régionale, pour le ciblage de nouvelles cibles (Fallara et al., 2006). Le ciblage demande une grande part d'interprétation, ce que l'approche déterministe permet.
- À l'échelle d'un gisement, si la minéralisation correspond à une unité lithologique (p.ex. gisement de Cu-Zn circonscrit à une lentille de sulfures massifs – SMV), alors ce type de modèles peut permettre de délimiter un volume utile au calcul du tonnage.
- Par contre, si la minéralisation n'est pas circonscrite à une unité lithologique (voir exemple de distribution des teneurs en Au oblique à un système de veines de quartz décrit ci-après; Hill et al., 2014), alors le modèle conceptuel des veines de quartz ne permet pas de calculer le volume de la zone minéralisée.

Inconvénients

- Cette méthode repose entièrement sur le jugement de la personne qualifiée. Le modèle peut refléter une certaine vision d'un gisement : les aspects structuraux, en particulier, reflètent un modèle et un état de connaissance. Ceci est problématique, car la structure peut être l'aspect le plus complexe (le moins étudié) et le moins bien compris d'un gisement, et une hypothèse erronée peut influencer le modèle 3D (et le volume interprété). L'interprétation peut donc introduire des biais et empêcher la considération de modèles alternatifs.
- Le modèle dépend tellement de l'interpréteur (personne qualifiée) qu'il n'est pas reproductible. Un autre interpréteur peut produire un modèle très différent. Ces modèles complexes sont aussi très difficiles à vérifier (à auditer).
- La construction d'un modèle 3D est très longue (donc, **couteuse**).
- Les modèles conceptuels ont souvent des formes très complexes, car ils tentent de reproduire la complexité géologique. On peut se demander quel niveau de complexité est vraiment utile à l'estimation des ressources, puis à la planification de la mine (Glacken et Snowden, 2001). La question de la finalité du modèle est rarement abordée. Ces modèles sont avant tout utilisés pour visualiser le gisement, pour intégrer toutes les données disponibles et s'assurer qu'il n'y a pas d'incohérences sur la compréhension de la géologie. Ces modèles devraient cependant être construits pour : (1) estimer les ressources au mieux (donc, intégrer une façon de quantifier les incertitudes) ; (2) faciliter le travail des ingénieurs miniers (être simples à comprendre).
- Le principal problème est que **l'incertitude** sur la géométrie du gisement ne peut pas être évaluée à partir d'un modèle conceptuel produit de façon déterministe.

Évaluer l'incertitude – quelques pistes

- Si on demande à deux personnes qualifiées de construire deux modèles 3D, une comparaison des modèles peut permettre de cibler les zones les moins bien contraintes (p.ex. Jackson et al., 2003). Mais même ce type d'approche ne permettra pas une quantification objective de l'incertitude (inspiré de Munroe et Deutsch, 2008a-b).
- Alternativement, il est possible de comparer des modèles faits avec des quantités différentes de données (c.-à-d. modèles effectués au fur et à mesure que l'état de connaissances sur un gisement évoluait) (Sides, 1997). Cette quantification n'est pas non plus objective.

Les comparaisons citées ci-dessus demandent l'utilisation de méthodes permettant de comparer des géométries 3D. Plusieurs approches sont disponibles (p.ex. Houlding, 1992, Sides, 1994 et 1997).

3.1.2 Logiciel Leapfrog® – fonction RBF

Le logiciel Leapfrog® produit des modèles 3D selon une technique qui ressemble beaucoup à celle présentée précédemment (section 3.1.1), mais a l'avantage d'être facile d'utilisation et de permettre l'automatisation de certaines tâches, ce qui réduit le temps nécessaire à la confection d'un modèle.

Leapfrog® fait un pas vers l'interpolation des surfaces à partir des données, mais il demande aussi à l'utilisateur d'intervenir pour modéliser les formes. En fait, Leapfrog® ne fait qu'automatiser ce que tout l'utilisateur tente de faire lorsqu'il dessine une surface en 3D (c.-à-d. relier les points par le chemin le plus court, ou lisser), mais le fait de façon automatique et reproductible. Pour ces raisons, ce type de technique est classé parmi les méthodes déterministes. Notez que le logiciel inclut aussi des outils permettant de simplifier le dessin de surfaces à partir de lignes (dessin « à la main »).

Leapfrog® interpole les surfaces à partir de points, correspondant à des contacts observés en forages, ou à des teneurs, etc. La technique porte le nom de « modélisation géologique rapide » (*rapid geological modelling*) et est basée sur des fonctions radiales de base (Cowan et al., 2002). Ces fonctions sont des interpréteurs de surfaces qui interpolent à partir de tous les points, et pas seulement localement comme le font des techniques tels que la pondération par l'inverse de la distance (*inverse distance weighted (IDW)*) ou de krigeage. Elles produisent des surfaces lissées, et sont des interpolateurs exacts (passent par les points connus, bien que ce paramètre puisse être ajusté sous Leapfrog®).

Cette technique permet également de rapidement produire divers surfaces et volumes (plusieurs modèles), en changeant les paramètres de la fonction de base radiale. Mais rien ne permet de quantifier l'incertitude (ou de décider lequel, parmi les modèles produits, est le plus réaliste).

Logiciels

Leapfrog™ (Geo, Mining) – Leapfrog® est disponible sur le marché depuis 2003. Le logiciel peut interpoler des surfaces directement à partir de points (Figure 4), et ces modèles conceptuels peuvent être validés. Il inclut également des outils permettant de dessiner des surfaces à partir de lignes (Figure 5).

La façon dont Leapfrog® gère les surfaces s'appelle *implicit modelling* : les surfaces modélisées sont représentées par des fonctions volume : une faible quantité de points de contrôle est stockée en mémoire, par opposition au stockage de tous les nœuds et triangles pour les représentations classiques (voir TIN). Pour pouvoir être utilisée par le logiciel, la technique est couplée avec *rapid 3D interpolation* (voir Cowan et al., 2004 et 2011, et références incluses).

Il est également possible de produire directement des modèles de blocs à partir de points. Le modèle de bloc est généré par des fonctions d'interpolation, qui sont évaluées point par point. L'interpolation utilisée semble être fonction seulement de la distance aux points d'analyse (Cowan et al., 2011).

Leapfrog® Geothermal – permet de visualiser des systèmes géothermiques en 3D (inclus des outils pour visualiser et simuler le mouvement des fluides, les profils de températures pour comprendre l'altération, etc.) (Alcaraz et al., 2011 et 2015 ; Newson et al., 2012). Ce logiciel est plutôt utilisé par la géothermie (réservoirs actifs), mais pourrait avoir des implications pour les systèmes hydrothermaux anciens.

Méthodologie

La méthodologie proposée par Cowan et al. (2002) pour produire des isocontours de teneurs est la suivante :

- a) Validation des données, calcul de composites ;
- b) Interpolation d'isocontours des teneurs en 3D (automatique ; voir Figure 4) ;
- c) Incorporation de morphologies géologiques, par interprétations faites en 2D (qualitative, demande l'intervention de l'utilisateur) ;
- d) Interpolation des données numérisées à l'étape précédente (automatique) ;
- e) L'interpolation des isocontours est répétée, mais en tenant compte des interprétations proposées à l'étape (c).

Le tracé de surfaces, à partir de lignes, utilise une méthode similaire à celle présentée à la section 3.1.1, mais requiert l'utilisation de moins de sections et est facilité par les outils du logiciel (voir Figure 5).

Pour la production directe de modèles de blocs, sans utilisation de modèle conceptuel, un exemple de méthodologie est proposé par Cowan et al. (2011).

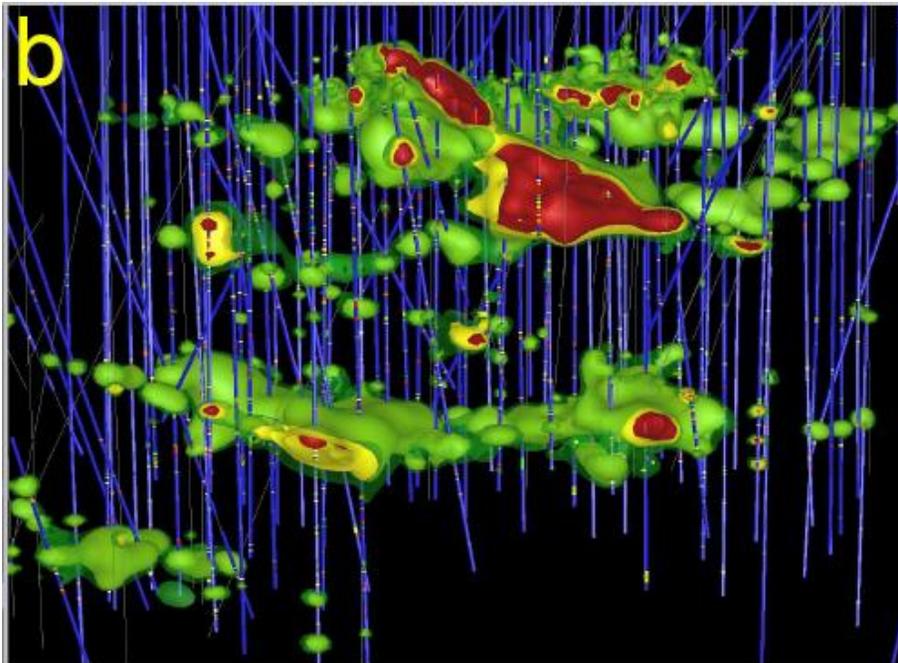


Figure 4 : Interpolation d'isocontours des teneurs en 3D sous Leapfrog® (tiré de Cowan et al., 2002).

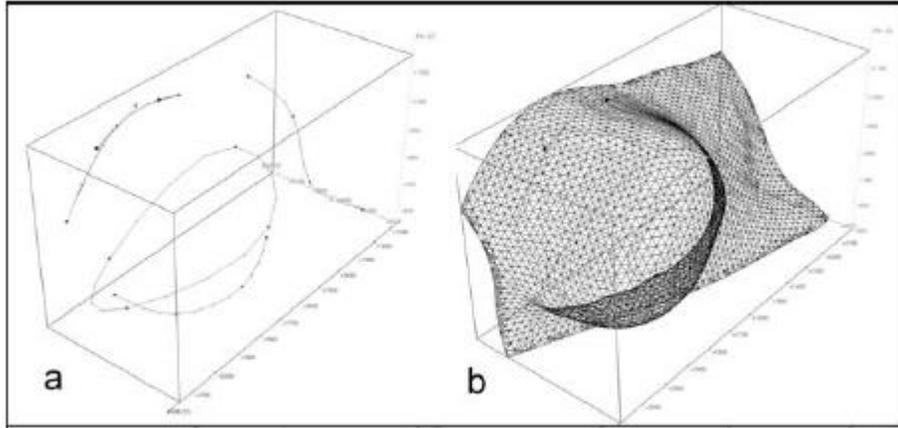


Figure 5 : L'impressionnant (simple et efficace) outil de dessin de Leapfrog® (création de surfaces à partir de lignes) (tiré de Cowan et al., 2004).

Comparaison entre Leapfrog® et les méthodes classiques de confection d'un modèle conceptuel

On présente ci-après quelques éléments de comparaison provenant de la littérature :

- Cowan et al. (2011) – La comparaison montre que les méthodes classiques prennent beaucoup plus de temps, pour un résultat similaire à celui produit par l'utilisation des fonctions de base radiale;
- Birch (2014) – Ce papier est une réflexion sur les méthodes utilisées pour construire des modèles 3D, et compare la méthode classique (digitalisation à la main) et les méthodes utilisant la modélisation implicite (Figure 6). Il conclut que la modélisation a beaucoup d'avantages par rapport à la méthode classique;
- Knight et al. (2007) – Ces auteurs proposent le même type de comparaisons et concluent que la modélisation implicite est plus efficace et aussi plus précise que les modèles créés avec la méthode classique.

Table 1

Traditional wireframing compared with implicit geological modelling

Aspect	Hand wireframing	Implicit modelling
DH contact honouring	Yes (manual)	Yes (automated)
Minimum curvature fit between points	No. Only straight lines. Curvatures are manually digitized	Yes
Modelling speed	Slow	Very fast
True 3D modelling, <i>i.e.</i> drill-hole sectional fences are not needed	No. Limited to sectional digitization	Yes. Not limited to sectional interpretation
Models can be replicated	No. Manual digitization cannot be replicated	Yes, given the same variables
Can multiple models be generated from the same data?	Yes, but not very practical as it is very time-consuming	Yes

Figure 6 : Comparaison entre la méthode classique (numérisation manuelle) et les méthodes utilisant la *implicit modelling* «modélisation implicite » (tiré de Birch, 2014).

Avantages :

- Les surfaces sont produites très rapidement;
- Cela génère des surfaces reproductibles (qui peuvent être générées par d'autres interpréteurs à partir des mêmes paramètres);
- Les surfaces produites sont les plus lisses possible. C'est ce que les interpréteurs tentent de faire de façon implicite lorsqu'ils utilisent la technique présentée à la section 3.1.1;

Les surfaces produites à partir de points (ex. analyse de contrôle des teneurs) : les surfaces sont générées directement à partir des données de forages et de façon semi-automatique (il est possible d'ajouter une part d'interprétation dans la confection des surfaces). Ceci permet de produire des modèles de blocs directement à partir des analyses : si Leapfrog® est utilisé de cette façon, la production d'un modèle conceptuel n'est pas nécessaire au calcul des ressources;

- **Surfaces produites à partir de lignes et de points (ex. contacts géologiques) :** il n'est pas nécessaire de passer du temps à tracer en sections parallèles avec l'outil de modélisation implicite. Aussi, le tracé en 3D est grandement facilité par les outils Leapfrog®.

Inconvénients :

- Il n'est pas possible de quantifier les incertitudes directement. Par contre, une méthodologie pourrait être envisagée. Il est possible de rapidement créer différents modèles en changeant les paramètres sous Leapfrog®, et tous ces modèles seront conditionnés par les mêmes données. La comparaison entre ces différents modèles pourrait permettre une certaine évaluation de l'incertitude (Knight et al., 2007).

Leapfrog® facilite le dessin en 3D. Il fait un pas vers l'interpolation, mais cette idée est poussée plus loin par les outils présentés dans les sections suivantes.

3.1.3 *Autres logiciels, fonctions, et outils*

La représentation 3D d'objets géologiques (c.-à-d. la confection de modèle conceptuel) peut être facilitée par divers outils. Outre les outils implémentés par Leapfrog®, il existe de nombreux outils proposés par divers auteurs. Quelques-uns de ces outils sont présentés dans cette section.

Autres logiciels qui proposent la modélisation implicite : GeoModeller, Micro Mine, Vulcan.

GeoModeler - Le logiciel GeoModeler utilise aussi la modélisation implicite, mais implémente une méthode plus complexe (basée sur le krigeage) qui permet une meilleure évaluation de l'incertitude que Leapfrog®. Le logiciel implémente aussi divers outils (inversion de données géophysiques, etc.).

Pour ce qui est de la modélisation des surfaces, le logiciel implémente la méthode du champ de potentiel soit, *continuous potential-field scalar function* (Calcagno et al., 2008).

La méthode définit des isosurfaces appelées champs de potentiels, qui respectent les données, et qui sont définies par co-krigeage (FitzGerald et al., 2009).

La méthode peut travailler à partir de contours dessinés en carte et de données de pendages (Calcagno et al., 2008) (Figure 7). Elle peut aussi prendre en compte les données géophysiques (Guillen et al., 2008), et semble bien adaptée à la confection de synthèses géologiques régionales. Un exemple de modélisation de gisements à partir de données de forages et d'informations structurales est présenté par McNerney et al. (2005). Pour d'autres exemples sur lesquels la méthode du champ de potentiel a été appliquée, voir les références proposées par Calcagno et al. (2008).

Notez que d'autres algorithmes permettent de travailler à partir de données d'orientation (p.ex. algorithme SFI (*structural field interpolation*), qui interpole à l'aide d'une méthode IDW anisotrope ; Hillier et al., 2013 ; Figure 8).

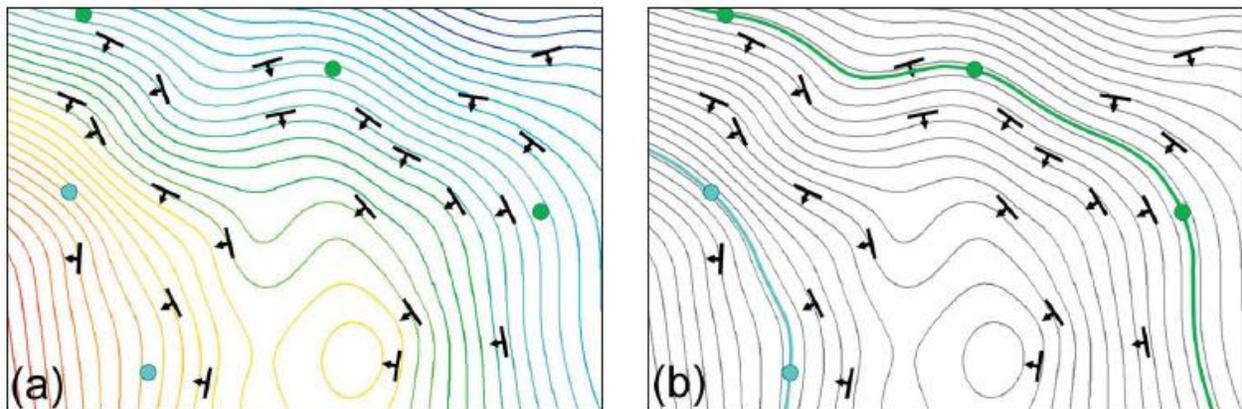


Figure 7 : Illustration de la méthode d'interpolation du champ de potentiel appliquée à des données structurales. En b) on voit le tracé des contacts qui respectent les points de contrôle et qui suivent des isolignes du champ de potentiel (tiré de McNerney et al., 2005).

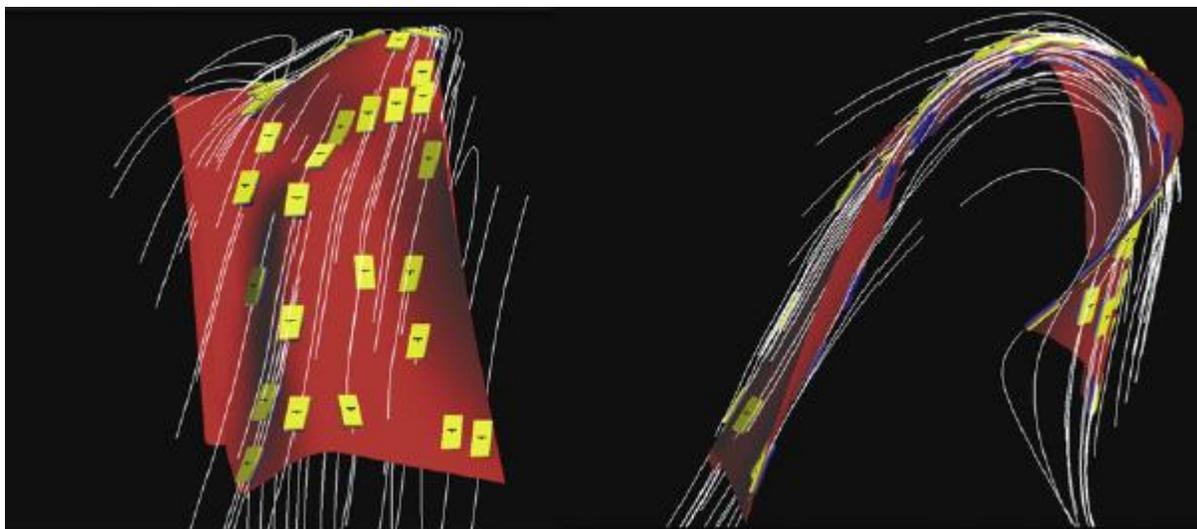


Figure 8 : Utilisation de l'algorithme SFI pour modéliser une surface plissée (tiré de Hillier et al., 2013).

Fonctions Hermite Radial Basis Function (HRBF) (Guo et al., 2016) – Ces auteurs utilisent ces fonctions pour créer un modèle 3D régional à partir d'une cartographie de surface. Les logiciels comme Leapfrog® sont plutôt conçus pour travailler avec des données de forages (c.-à-d. avec une grande quantité de points documentant le sous-sol). La méthodologie présentée par Guo et al. (2016) est plus adaptée à la confection de modèles 3D régionaux.

Intégration du temps - Les modèles 3D peuvent être utilisés pour reconstituer des géométries pré-déformation (en éliminant les mouvements de failles et en dépliant les unités). Ceci est utile pour la recherche, pour la compréhension d'un gisement, et pour la validation d'un modèle 3D (c.-à-d. qu'une fois la déformation enlevée, il est possible de voir si les strates sédimentaires ont bien des épaisseurs constantes, etc.). Il existe des logiciels spécialisés dans ce type d'approche (p.ex. 3D Move de Midland Valley Ltd.).

Selon les connaissances de l'auteur de ce rapport, ce type d'approche est peu utilisé par l'industrie minière.

3.2 Calculer sans le modèle conceptuel

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées pour se passer du modèle conceptuel. Les stratégies utilisant principalement la pondération par l'inverse de la distance (Inverse Distance Weighting, IDW) ou le krigeage sont présentés dans cette section.

Interpoler les teneurs - Une autre façon d'estimer le volume d'un gisement est de réaliser une interpolation en 3D (utilisation d'un modèle de blocs ; Figure 9) des teneurs à partir des données d'analyses, puis de sélectionner les blocs dont la valeur est supérieure > à la teneur de coupure.

Cette méthode ne nécessite pas la représentation 3D d'un modèle conceptuel (le modèle de blocs est souvent circonscrit par un modèle conceptuel, mais il peut tout aussi bien être contraint par la distribution des échantillons). Cette distinction mise à part, cette méthode est similaire à la modélisation implicite (Leapfrog®, etc.) qui, elle aussi, modélise directement à partir des données d'analyses.

Cette technique nécessite l'utilisation de logiciels proposant des méthodes d'interpolation spatiale (p.ex. l'outil Vertical Mapper de MapInfo). Ce type d'approche pose la question de l'utilité de confectionner un modèle 3D pour estimer les ressources. Il est possible que pour des dépôts dont la géométrie est simple (p.ex. formation de fer non plissée et non recoupée par des failles importantes), la réalisation de modèles 3D ne soit pas une nécessité. Pour des dépôts dont la structure est très complexe, l'intégration des données géologiques par l'intermédiaire d'une modélisation des unités lithologiques peut devenir essentielle.

Les méthodes d'interpolation (krigeage, IDW), mais surtout la façon dont elles sont utilisées, sont très nombreuses (p.ex. Li et Wang, 2014). Un autre exemple compare IDW et krigeage, et évalue l'incertitude à l'aide d'un modèle fractal (Afzal et al., 2014).

Domaining – Le gisement présenté par Abzalov et Humphreys (2002) est trop complexe pour le design de modèle conceptuel. Ces auteurs ont préféré subdiviser le gisement en domaines avant d'interpoler les teneurs.

Leur méthode est la suivante :

- **Gisement** : Au filonien, de forme trop complexe pour le dessin d'un modèle conceptuel;
- **Méthode** : (1) subdivision (*domaining*) du dépôt avec un modèle *indicator probability* ; (2) estimation des ressources par conditionnement uniforme (simulation - méthode non linéaire qui n'introduit pas de biais et qui ne lisse pas trop les valeurs locales);
- **Définition des domaines** : (1) calcul de la probabilité que chaque bloc a d'excéder la valeur du teneur de coupure (avec une carte *indicator probability* ; les teneurs sont transformées, leurs distributions est décrites par des variogrammes, puis leurs probabilités d'excéder la teneur de coupure sont calculées par krigeage ordinaire); (2) regroupement des blocs en fonction de la probabilité calculée précédemment.

Interpoler les épaisseurs - Une autre façon de modéliser des volumes est d'interpoler les données d'épaisseurs par krigeage. Ce type d'approche est utile pour modéliser des unités lithologiques (formation de fer, zone riche en charbon, etc.), en particulier si ces unités affleurent, mais n'est pas adaptée au calcul du volume d'objets de formes complexes.

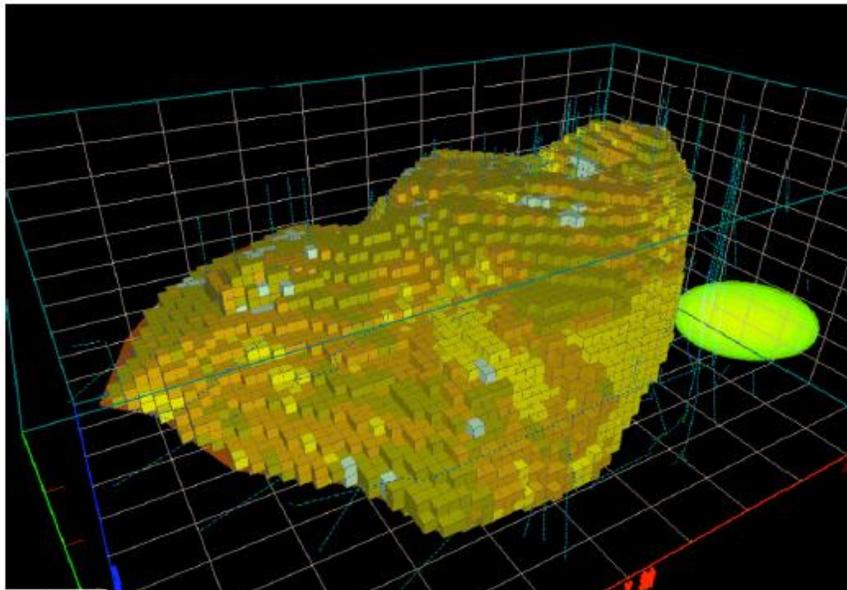


Figure 9 : Interpolation des teneurs par krigeage et résultat du modèle de blocs (tiré de Li et Wang, 2014).

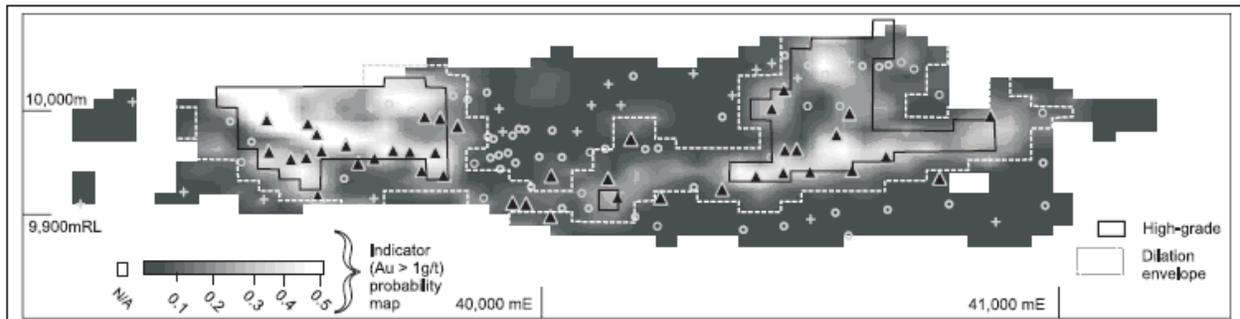


Figure 10 : Délimitation du domaine haut-grade à partir des analyses (tiré de Abzalov et Humphreys, 2002).

3.3 Modéliser l'enveloppe avec une fonction distance

La méthode mise au point par Munroe et Deutsch (2008a) permet d'estimer le volume sans passer par le dessin d'un modèle conceptuel. L'approche code les échantillons en fonction de leurs distances au contact, et ressemble donc à la fonction RBF de Leapfrog® : la différence est l'utilisation de krigeage simple et une véritable évaluation de l'incertitude sur la position du contact.

La méthodologie proposée est la suivante (Munroe et Deutsch, 2008a) :

- a) Simulation des données – dans cet exemple, un gisement d'Au de type veine est simulé (utilisation du – *Sequential Gaussian Simulation (SGS)*). Des forages sont ensuite simulés pour échantillonner le dépôt. Les données de forages contiennent deux types de données : (1) données codées 1, qui sont situées dans la veine ; (2) données codées 0, qui sont situées en dehors de la veine.
- b) La fonction distance est ensuite calculée à partir des données de forage. La fonction calcule la plus petite distance euclidienne entre chaque point et le point le plus proche qui a une valeur différente. La fonction inclut un facteur h , qui est ajusté par l'utilisateur et décrit l'anisotropie du gisement.
- c) La fonction distance est ensuite interpolée par krigeage simple, qui peut être localement ajusté pour prendre en compte les variations géométriques locales (c.-à-d. que différents variogrammes ont été utilisés pour différentes portions du dépôt ; Machuca-Mory et al., 2009). Les paramètres C et β sont utilisés pour définir l'incertitude sur la position du contact modélisé (Figure 11).
- d) Le volume est estimé pour différents intervalles de probabilité (paramètre p) (Figure 12).

La méthode demande l'ajustement des paramètres C et β (Munroe et Deutsch, 2008b) :

- Les paramètres C et β influent beaucoup sur la forme de l'enveloppe modélisée.
- Ces paramètres peuvent être fixés de façons :
 1. Empirique (demande à l'interpréteur de décider – solution la plus déterministe) ;
 2. Partiellement calibrées (paramètres choisis en comparant le modèle avec un modèle conceptuel déterministe existant ; pour un exemple, voir Machuca-Mory et al., 2009) ;
 3. Complètement calibrées (utilisation de modèles de référence simulés – cette technique est la plus objective, mais elle demande beaucoup de temps de calcul).
- Les calibrations se font par comparaison entre différents modèles (utilisation de fonctions objectives).

Avantages

- Permet une modélisation \pm objective du volume (selon la technique choisie pour ajuster les paramètres C et β);
- Permet d'évaluer l'incertitude sur la position du contact.

Inconvénients

- Le code est disponible en FORTRAN, et ne semble pas être facilement accessible. La méthodologie est cependant clairement expliquée dans les publications, et elle pourrait être implémentée par des logiciels commerciaux.

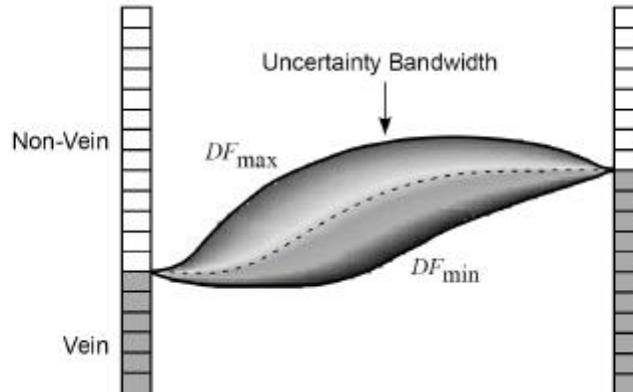


Figure 11 : Calcul de l'incertitude sur la position de la surface (limite entre deux forages) (tiré de Machuca-Mory et al., 2009).

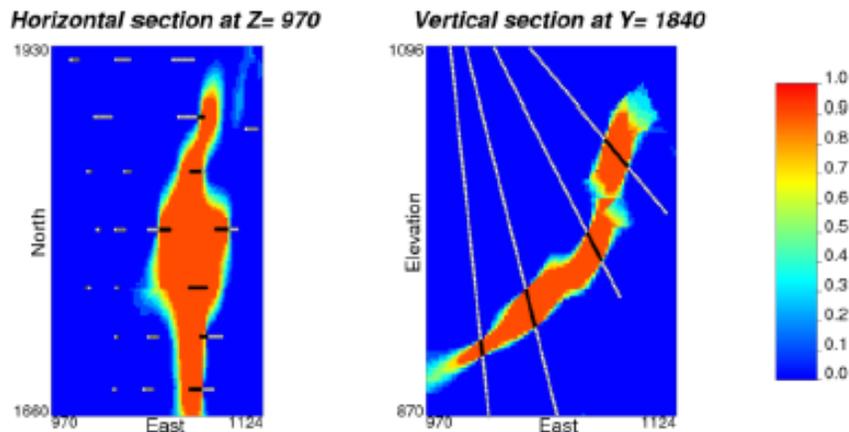


Figure 12 : Sections montrant la probabilité croissante de se trouver à l'intérieur de la zone minéralisée (tirées de Machuca-Mory et al., 2009).

3.4 Modèles multiparamètres

L'approche multiparamètres est particulièrement utile pour les minéralisations à fort effet pépité ; c.-à-d. pour lesquels la variabilité des teneurs est extrême, même à très petite échelle (dépôts d'Au souvent). Pour ces gisements, il est difficile de modéliser l'enveloppe de la zone minéralisée à partir des analyses des teneurs en Au.

Dans ce type de dépôts, la lithologie, l'altération, et autres sont souvent plus continus que les teneurs en Au, et certains de ces éléments montrent une certaine corrélation spatiale avec les teneurs en Au. La méthode consiste donc à utiliser les informations présentant une bonne continuité spatiale (zone altérée par exemple) pour prédire la position de la zone minéralisée.

Exemple de Hill et al. (2014) :

- Cas étudié : dépôt d’Au à fort effet pépité;
- Données intégrées : intensité de la foliation (F), quantité de veines (V), et altération (A);
- Méthode de combinaison des données : **probabilité conditionnelle**. La méthode consiste à calculer la probabilité de [teneur en Au > teneur de coupure] à un endroit donné, selon des valeurs données de F, V, et A (variables considérées dépendantes). La méthode ressemble à un calcul de contraste;
- Le résultat de la combinaison des données F, V, et A par probabilité conditionnelle est ensuite représenté par des isosurfaces sous Leapfrog® (Figure 13).

Exemple de Afzal et al. (2013) :

- Ces auteurs ont modélisé la distribution des teneurs en Au par krigeage, puis ont étudié la distribution des teneurs en Au grâce à un modèle fractal de type concentration-volume;
- Ensuite, ils ont observé si les teneurs en Au étaient spatialement corrélées à des veines, des sulfures, certaines lithologies, etc.;
- Ce type d’approche peut permettre de sélectionner les éléments qui pourraient être utilisés pour prédire la position des zones minéralisées.

Avantages

- Apporte une solution à des cas pour lesquels il est inutile de produire un modèle conceptuel avec la méthode classique (le modèle conceptuel des veines de quartz peut être inutile à la modélisation de l’enveloppe minéralisée) et pour lesquels il est difficile d’interpoler à partir des teneurs (avec Leapfrog® ou autres) parce que la taille des échantillons n’est pas suffisante pour être représentatives des teneurs en Au.

Inconvénients

- La combinaison d’éléments spatialement corrélés à l’Au change d’un dépôt à l’autre. Il faut donc refaire l’exercice au cas par cas;
- La sélection des éléments utilisés pour modéliser repose sur un modèle et/ou un état de connaissances. Si le modèle est erroné, des erreurs très importantes peuvent être faites sur l’estimation des ressources. Il faut donc s’assurer qu’il y a bien une corrélation entre les éléments utilisés et les teneurs en Au : un exemple d’outil utile est le calcul de contrastes. Le problème est que ces outils utilisent les teneurs en Au, qui ne sont pas statistiquement représentatives, pour sélectionner les éléments du modèle. Aussi, si les roches altérées sont corrélées à l’Au, on aura tendance à considérer que plus l’altération est intense, plus il y a d’Au – ce modèle est difficile à vérifier et n’est pas forcément exact;
- La sélection des paramètres étant délicate, il est difficile de quantifier l’incertitude avec ce type d’approche.

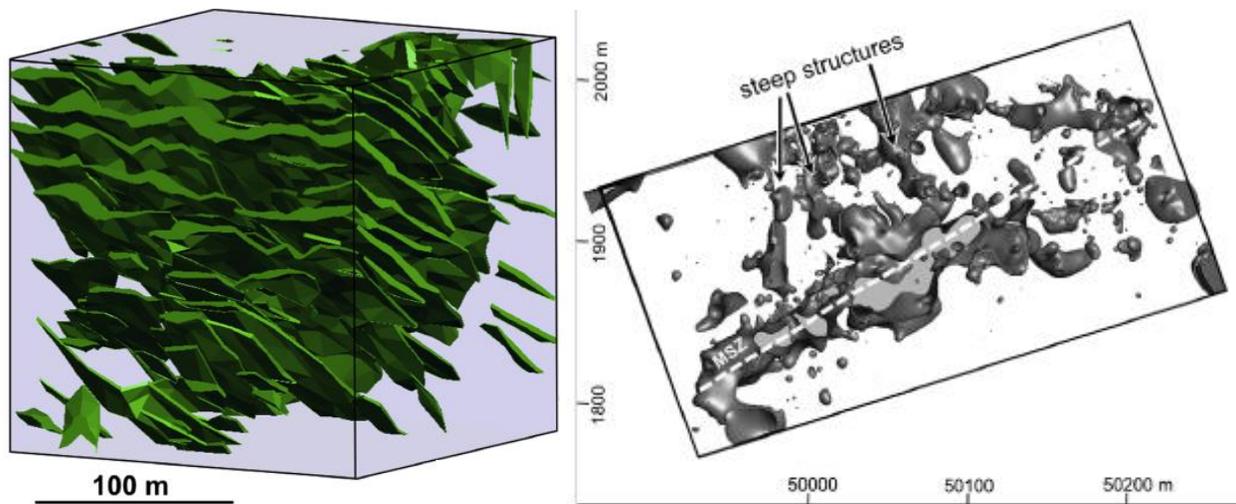


Figure 13 : (a) Modèle conceptuel des zones minéralisées, réalisé à partir d’interprétations faites en sections (voir section 3.1.1), montrant plusieurs problèmes géométriques. La géométrie de ce gisement est trop complexe pour que ce type d’approche soit efficace ; (b) Isocontours (Leapfrog®) des paramètres (veine, foliation, et altération) combinés par probabilités conditionnelles (tiré de Hill et al., 2014).

3.5 Modèle probabiliste (simulations conditionnelles)

Les simulations conditionnelles sont des méthodes complexes et qui demandent un temps de calcul parfois important, mais constituent la façon la plus complète d'évaluer les incertitudes.

Dans les cas où les forages sont proches et où la minéralisation est continue, la méthode classique de tracé du modèle conceptuel peut se justifier (Sirvastava, 2005). Mais dans les cas où il y a plusieurs populations de teneurs et où l'interprétation du volume est incertaine, l'approche statistique peut être très utile (Osterholt et Dimitrakopoulos, 2007).

Il existe de très nombreux types de simulations. Dans cette section, quelques applications de l'approche à l'estimation des volumes et/ou de la position des surfaces sont présentées. Notez que les simulations conditionnelles sont généralement utilisées pour classer les ressources (teneurs) et sont moins fréquemment utilisées pour évaluer l'incertitude sur le calcul du tonnage (De Oliveira et al., 2015).

Les modèles les plus fréquemment utilisés sont : (1) *Sequential Gaussian Simulation* (SGS), qui est parfait pour des données de type teneurs, épaisseurs, etc. ; et (2) *Sequential Indicator Simulation* (SIS) qui utilise avec une image d'entraînement (IE; ou *Training Image* (TI) qui permet de simuler des formes complexes. Une liste plus complète de méthodes et d'exemples d'application à l'industrie minière est disponible dans Osterholt et Dimitrakopoulos (2007 ; p.1).

3.5.1 Modèle probabiliste – exemples

Estimation 2D des épaisseurs (De Oliveira et al., 2015) :

- Dépôt : dépôts de latérite (bauxite), qui ne présente pas de problèmes particuliers d'interprétation géologique. Le principal enjeu est une bonne estimation de l'épaisseur.
- Méthode : les épaisseurs sont interpolées en 2D avec krigeage ordinaire et l'incertitude est évaluée avec l'algorithme SGS (Isaaks, 1990) (Figure 14).

Estimation 2D des épaisseurs et teneurs (DeSouza et al., 2004) :

- Dépôt : charbon.
- Méthode : l'incertitude sur l'estimation des épaisseurs et des teneurs est évaluée avec *kriging variance* et à partir de *SGS* et *SIS*. Les simulations se révèlent plus efficaces, car elles prennent mieux en compte les données.

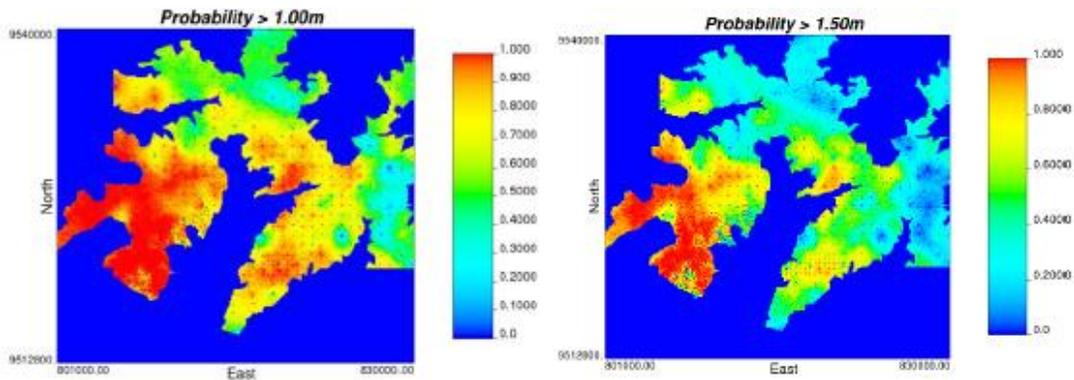


Figure 14 : Résultat de la simulation *SGS* : cartes montrant les probabilités que chaque zone ait une épaisseur supérieure à une valeur donnée (tiré De Oliveira et al., 2015).

Simulations de cartes géologiques (He et al., 2014) :

- Ces auteurs utilisent *SIS*, disponible dans le logiciel TProGS, pour simuler la distribution de lithologies glaciaires à partir de données géophysiques et de forage (Figure 15).

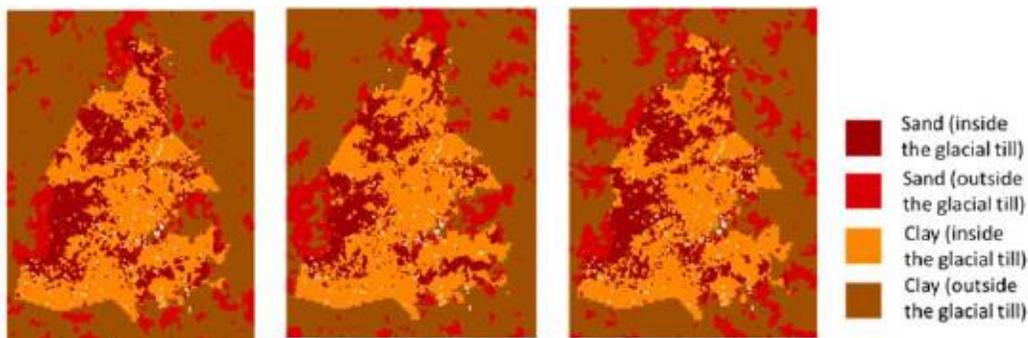


Figure 15 : Simulations de la distribution de dépôts glaciaires (tiré de He et al., 2014).

Estimation de l'incertitude pour une forme (un volume ; Figure 16) (Goodfellow et al., 2012) :

- Les dépôts ont souvent des formes curvilinéaires, donc difficiles à décrire par le biais des statistiques spatiales classiques comme les variogrammes (Journel, 2007). La stratégie utilisée ici s'appelle statistique multipoints et elle utilise des images d'entraînement (images qui sont un modèle géologique ; une « idée » que l'on se fait du gisement, mais qui ne respecte pas forcément la position des données de forage). La simulation n'est donc pas basée sur le krigeage, mais sur la statistique multipoints.
- L'algorithme utilisé (SNESIM) est décrit par Remy et al. (2009).



Figure 16 : Simulations d’une forme de dépôt. Vue en coupe : a) de l’image d’entraînement, b) le résultat filtré selon le maximum, c) filtré selon la médiane et d) filtré selon le minimum (tiré de Goodfellow et al., 2012).

Simulation de géométries de dépôts (Osterholt et Dimitrakopoulos, 2007) :

- **Méthode :** les méthodes habituelles de simulations ne permettent pas de mettre en évidence les complexités géologiques non linéaires, car ces méthodes utilisent des statistiques à 2 points (variogrammes). Il existe cependant des méthodes qui surmontent ce problème, comme l’approche multipoints (Strebelle, 2002, Zhang et al., 2006) qui est l’approche utilisée ici (algorithme SESIM). Ces méthodes remplacent le variogramme par une image d’entraînement (IE) qui est un analogue des aspects géométriques connus du gisement.
- **Gisement modélisé :** dépôts de fer situés dans des chenaux (la méthode est utilisée pour simuler la forme des chenaux et leurs lithologies). L’image d’entraînement (IE) est une coupe qui illustre l’interprétation géologique du dépôt.

Les étapes de la simulation sont les suivantes (Osterholt et Dimitrakopoulos, 2007) :

1. Scanner l’IE et stocker les données de formes. Cette étape peut être vue comme la mise en place d’une base de données de pièces de puzzle. En quelque sorte, l’IE remplace le variogramme qui est utilisé par d’autres techniques pour décrire la distribution spatiale des données;
2. Définir un chemin aléatoire et visiter les points de la grille un à un;
3. Pour chaque point, simuler : a) récupérer toutes les données des points entourant le point considéré; 2) calculer la probabilité locale, c.-à-d. la probabilité de trouver une certaine valeur au point considéré en fonction des points situés aux alentours et des données provenant du scan de l’IE; 3) choisir aléatoirement une valeur parmi celles qui sont possibles;
4. Recommencer la simulation depuis l’étape 1 (une centaine de simulations sont souvent réalisées).

Simulation de géométries de dépôts (Srivatava et al., 2005) :

- L’idée est de traiter les données géologiques comme des données d’analyse de contrôle des teneurs, et d’utiliser les géostatistiques pour développer un modèle probabiliste. Les teneurs sont traitées de la façon suivante : il y’a une teneur « vraie », mais comme on ne la connaît pas, elle est traitée comme une variable aléatoire dont la distribution locale est contrainte par les données proches. Il faudrait traiter les données géologiques de la même façon.

- **Dépôt étudié :** Au filonien, avec deux populations (haute et basse teneur) observées sur un diagramme log-probabilité (probabilité cumulative vs teneurs en Au). L'or semble associé aux zones les plus fortement foliées et sa distribution semble parallèle à la foliation (interprétation historique; Figure 17). D'après l'expérience de production, les lentilles minéralisées ne sont pas toujours continues (elles se rétrécissent ou s'interrompent) et elles recourent parfois la minéralisation.
- **Étape 1 :** réalisation de modèles de type « *indicator simulation* » (avec l'approche *indicator P-field*), avec 0 (basse teneur) et 1 (haute teneur), en utilisant la limite 1 g/t utilisée par la mine. Le modèle de variogramme n'est pas facile à choisir, car les données de forages documentent dans la direction de plus faible continuité. Le modèle choisi fait donc appel à la connaissance que les personnes qualifiées ont de ce gisement (entre autres). Il n'y a pas de mesure de pendage, donc le tracé géologique en section (c.-à-d. l'IE; voir Figure 17) est utilisé pour modéliser la variation des pendages. Le paramètre « s », qui fixe la continuité des lentilles, est ajusté en fonction de l'expérience des personnes qualifiées, à qui le manipulateur a montré des résultats de simulations (Figure 18). Les modèles sont utilisés pour faire une étude de risques, notamment pour estimer le risque que l'on prend si l'on utilise les chantiers d'extraction (*stope*) montrés à la Figure 17.
- **Étape 2 :** ajouter des informations géologiques (c.-à-d. les indicateurs suivants : orientation et intensité de la foliation, présence de molybdénite) pour conditionner encore plus les modèles. Ces nouvelles informations sont traitées en % de chance que l'on a d'avoir de l'Au si les indicateurs ont telle ou telle valeur. Pour ces modèles, les analyses de contrôle des teneurs ne sont pas traitées en termes de 0 et 1, et ces modèles permettent de porter un jugement statistique différent sur la valeur limite (1 g/t ou autre) qui devrait être utilisée pour séparer les zones de haute et basse teneur.
- **Note :** les simulations produisent des modèles de type grille, ou modèles de blocs. Une procédure automatique est développée ici pour les transformer en modèle conceptuel (voir appendices de l'article de Srivastava, 2005).

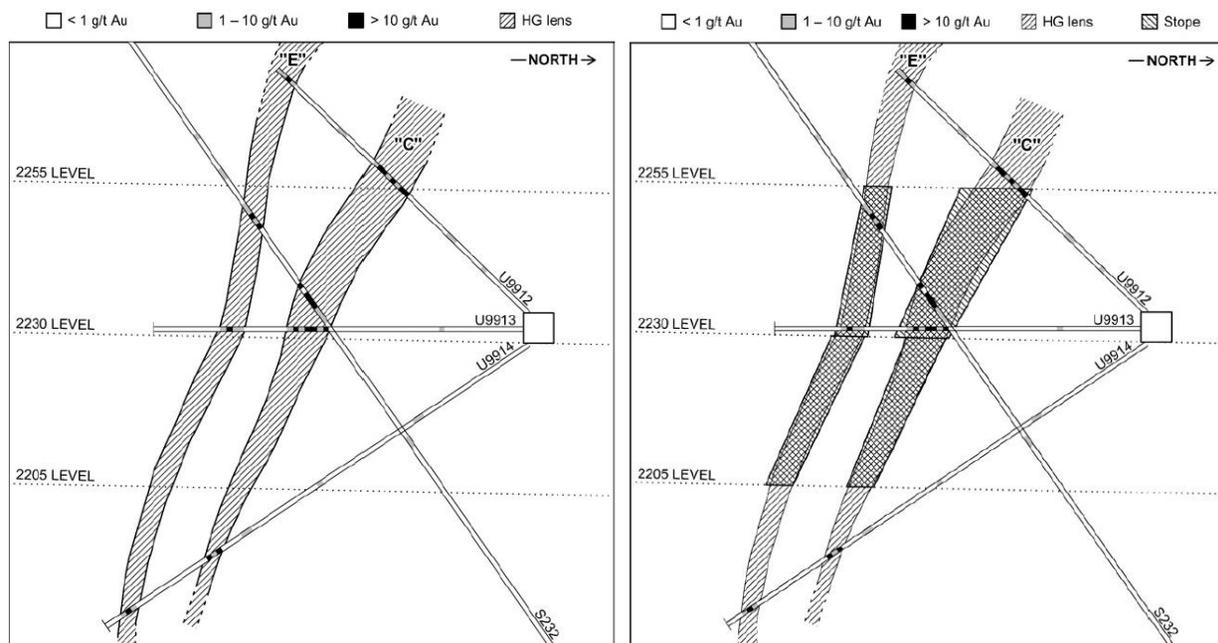


Figure 17 : (a) interprétation géologique « à la main » de la zone minéralisée (cette interprétation sert d'image d'entraînement, IE, dans cet exemple), basée sur l'hypothèse que la minéralisation est parallèle à la foliation ; (b) modèle conceptuel et planification des chantiers d'extraction (*stope*) (tiré de Srivastava, 2005).

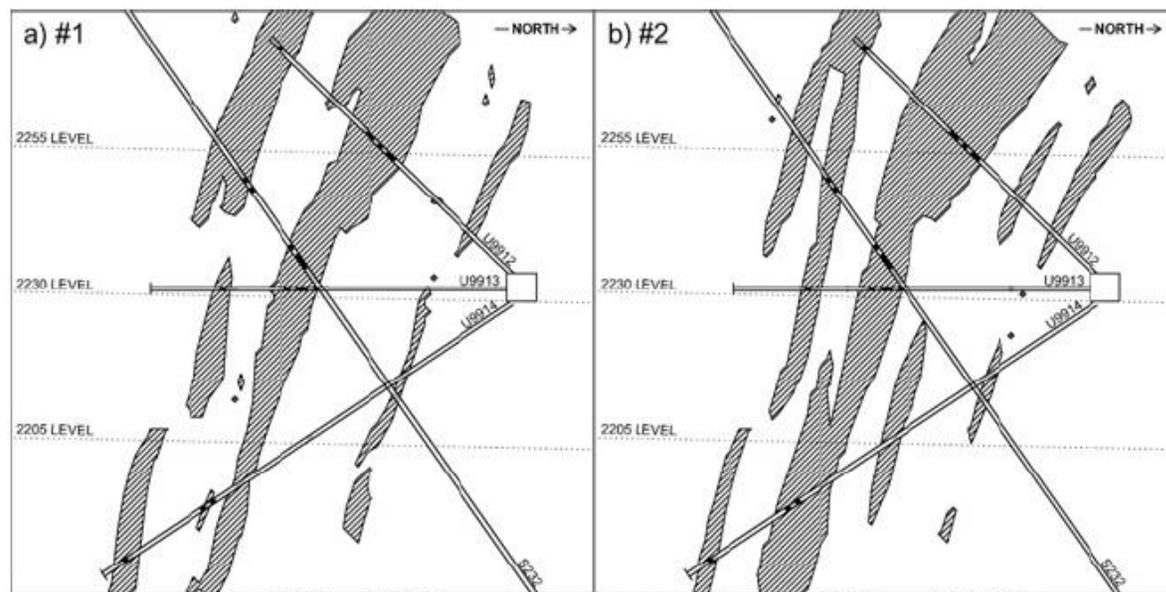


Figure 18 : Simulations de la géométrie du dépôt (tiré de Srivastava 2005).

3.5.2 Modèle probabiliste – vers la 3D

Dans la section précédente, seuls des modèles 2D ont été présentés. L'utilisation de méthodes multipoints pour simuler des formes 3D présente un défi supplémentaire, car elle demande l'utilisation d'une image d'entraînement tridimensionnelle. Les exemples ci-dessous apportent une solution au problème.

Solution 1 : construction d'IE 3D avec des techniques *object-based* ou *processed-based* (Koltermann et Gorelick, 1996, de Marsily et al., 2005).

Exemple de procédure (Boucher, 2011) :

- Cet article présente les divers points qui doivent être pris en compte au moment de choisir ou de confectionner une image d'entraînement (IE);
- L'auteur indique également que les algorithmes *object-based* sont la meilleure solution, et décrit l'un de ces outils : *SGeMS Object Simulator* (Boucher et al., 2010). L'outil permet de combiner des objets de formes simples afin d'obtenir des objets de formes plus complexes (Figure 19).

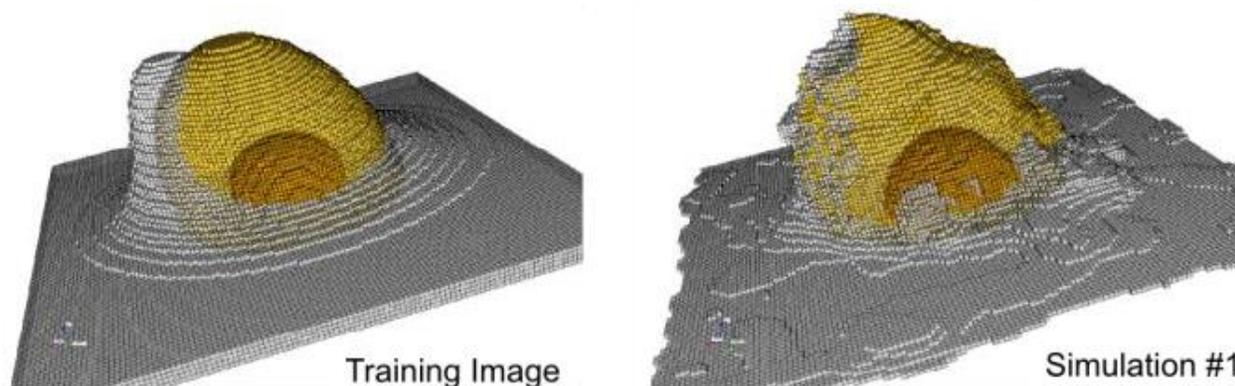


Figure 19 : Exemple d'images d'entraînement 3D et de simulation (tiré de Boucher, 2011).

Solution 2 : utiliser plusieurs IE 2D réparties dans l'espace.

Exemple de procédure (Comunian et al., 2012) :

- **Méthode 1 :** comme une IE 3D n'est pas disponible, on approxime la *conditional probability distribution function* en faisant un agrégat des probabilités calculées à partir de plusieurs images 2D (Figure 20). Il faut disposer d'au moins deux images d'entraînement 2D orthogonales. Dans l'article, deux méthodes d'agrégation sont décrites (« paLin » et « paBor »).
- **Méthode 2 :** *sequential 2D conditioning data (s2Dcd)*. Il s'agit d'utiliser différentes IE 2D de façon séquentielle, et de simuler les données dans la direction (verticale, horizontale, etc.) décrite par chaque image. Cette méthode semble être la plus performante.

- **Méthode 3 : lists merging.** Les informations scannées à partir des différentes images d'entraînement 2D sont stockées dans différentes listes. Lorsque la valeur d'un point est simulée, l'algorithme combine les éléments des différentes listes qui sont compatibles.

Exemple de procédure (Silva et Deutsch, 2014) :

- Ces auteurs présentent une autre façon de combiner les images d'entraînement. Cet article présente également une méthode pour créer les IE (qui sont dérivées d'une combinaison entre un modèle déterministe et une simulation, alors que la plupart du temps, elles correspondent seulement à un modèle géologique – déterministe).

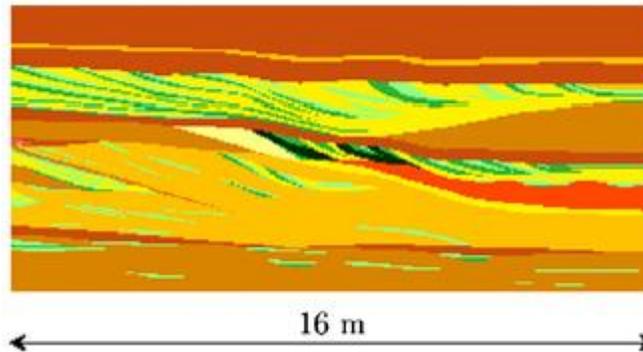


Figure 20 : Exemple d'image d'entraînement IE (aquifère) utilisée dans les directions xz et yz (tiré de Comunian et al., 2012). Il est possible de simuler de 2 à plusieurs lithologies avec des images d'entraînement.

3.5.3 *Modèle probabilistes - logiciels*

Les techniques décrites dans cette section ne sont utilisables que si elles sont rendues disponibles par des logiciels. Ci-dessous, quelques logiciels commerciaux qui intègrent les simulations conditionnelles sont listés. ArcGIS est discuté, car il offre un accès facile à un type de simulation. Les autres logiciels et algorithmes mentionnés sont soit difficiles d'accès, soit coûteux. Le logiciel d'intérêt pour cette étude est SGeMS, car il est disponible gratuitement.

ArcGIS - Ce logiciel donne accès à des simulations de type *Gaussian Geostatistical Simulation (GGS)*, conditionnées ou non. Ce type de modèle est basé sur l'utilisation d'un variogramme (statistique à 2 points) et peut permettre de quantifier l'incertitude sur des données d'épaisseur par exemple. Par contre, comme il ne permet pas l'utilisation d'une IE (statistique multipoints), il ne permet pas de simuler la forme de gisements.

Le type de simulation qui nous intéresse s'appelle *multipoint simulation* (MPS). Les algorithmes MPS sont les suivants (liste non exhaustive) :

- **SIMPAT** (Caers et Arpat, 2005 et 2007);
- **IMPALA** (Straubhaar et al., 2011) – disponibles dans plusieurs logiciels commerciaux (Isatis, Jewel Suite, Gocad);
- **Direct Sampling** (Mariethoz et al., 2010) – logiciel DeeSee, disponible comme modèle d'extension (plug-in) dans Petrel;
- **SNESIM** (Strebelle, 2002), **FILTERSIM** (Journal et Zhang 2006, Wu et al. 2008), **Tree partitioning algorithm** (Boucher, 2008), **COSGSIM**, **COSISIM**, **DSSIM**, **SGSIM**, **SISIM** – algorithmes rendus disponibles par le logiciel SGeMS (logiciel libre de droit développé par l'université Stanford, et disponible gratuitement).

3.6 Conclusions

La numérisation « à la main » des volumes est encore très populaire, car l'interpréteur contrôle entièrement le processus (section 3.1.1). Cependant, cette méthode présente de nombreux désavantages et des méthodes désignées pour faciliter le processus de modélisation, comme la modélisation implicite (ex. logiciel Leapfrog®), devraient être systématiquement utilisées (sections 3.1.2 et 3.1.3). La modélisation implicite reproduit le processus de numérisation « à la main », car les deux types de techniques tendent à lisser les surfaces. Cet outil permet de faciliter, d'accélérer et à de rendre reproductible la confection de modèle conceptuel. Ce type de technique produit cependant des modèles déterministes (c.-à-d. que le modèle conceptuel proposé correspond à une solution et que les solutions également plausibles qui respectent les données sont ignorées), à partir desquels il est difficile d'évaluer l'incertitude sur la position des contacts et la forme du volume dessiné (section 3.1).

Les autres méthodes présentées dans cette section sont des applications des concepts du krigeage et elles permettent une certaine évaluation de l'incertitude (sections 3.2 et 3.3). D'autres approches permettent de contourner les problèmes liés à l'évaluation de dépôts à forts effets pépites, par l'utilisation de domaines (section 3.2) ou par l'intégration de paramètres multiples (section 3.4) et peuvent utiliser les outils de représentation classique décrits à la section 3.1.

Cependant, la façon la plus complète d'évaluer les incertitudes, mais aussi la plus complexe et la plus couteuse en temps de calcul, correspond à la simulation conditionnelle (section 3.5). L'idée d'utiliser les simulations pour évaluer l'incertitude sur la position des enveloppes minéralisées date des années 80 (David, 1988). Les simulations sont une approche statistique du problème. Elles ont de multiples applications et peuvent, entre autres, simuler différentes géométries équiprobables de lentilles minéralisées. L'implémentation progressive de ces algorithmes dans les logiciels commerciaux va probablement révolutionner la façon dont l'incertitude liée au calcul des ressources est évaluée.

L'évaluation des incertitudes est jugée ici essentielle. En effet, pour estimer les ressources, on utilise un modèle conceptuel à l'intérieur duquel les teneurs sont interpolées. Il n'y a donc pas de possibilité d'avoir des teneurs en dehors de la zone délimitée par le modèle conceptuel. Ainsi, le résultat final va dépendre plus de la forme de l'enveloppe modélisée que de la technique d'interpolation utilisée pour interpoler les teneurs. Les incertitudes, lorsqu'elles sont prises en compte, sont évaluées pour l'interpolation des teneurs. Pour être complet, il est essentiel d'ajouter l'incertitude liée au tracé de l'enveloppe, ce qui est très rarement fait.

3.7 Perspectives : les logiciels gratuits

Il existe de nombreuses alternatives aux logiciels commerciaux. Dans le cadre de ce projet, la combinaison des logiciels suivants a permis de réaliser toutes les opérations décrites dans la section suivante, qui vont de la manipulation des données de forages à la modélisation par l'intermédiaire de simulations conditionnelles :

- **ParaView** : logiciel gratuit et très complet. Ses fonctionnalités (statistiques, etc.) ont été peu explorées dans le cadre de ce projet, mais ce logiciel permet une visualisation de qualité des modèles conceptuels;
- **PyGLISB** : il s'agit d'une librairie Python (Python, 2016), qui doit donc s'utiliser dans des routines écrites avec ce langage (version Python 2 uniquement). Dans le cadre de ce projet, cette librairie a permis de faire les opérations suivantes : *desurvey*, *compositing*, et création de modèles de blocs (en remplissant un modèle conceptuel);
- **MeshConv** : petit exécutable qui s'utilise depuis la « *prompt command* » de Windows. Permet de convertir les modèles conceptuels (.dxf ou autres) dans un format que PyGLSIB peut lire (c.-à-d. format .stl);
- **SGeMS** : logiciel libre de droits gratuits qui permet un accès à de nombreux algorithmes de simulations conditionnelles;
- **Anaconda** : logiciel gratuit, qui est un IDL pour Python. Il existe de nombreuses interfaces pour travailler avec le langage Python (comme le logiciel Bloc-Notes de Windows). Mais Anaconda est, selon l'auteur, la solution la plus conviviale et la plus simple d'utilisation. Anaconda installe le langage Python ainsi que de nombreuses librairies de base sur un ordinateur, ce qui constitue un gain de temps non négligeable (l'installation manuelle des librairies prend du temps). Si vous souhaitez installer d'autres librairies Python (p.ex. PyGLISB), utilisez « Anaconda Prompt » (invite de commande, tapez : `\ conda install -name_of_library_to_be_installed`) ou autres (voir

documentation disponible sur internet). Si vous souhaitez un IDL moins volumineux qu'Anaconda, installez MiniConda, qui contient moins de librairies.

Les différents tests effectués dans le cadre de ce projet (voir sections suivantes) permettent de conclure qu'il existe des alternatives gratuites et simples d'utilisation (sauf peut-être les parties qui doivent être codées en Python) aux logiciels commerciaux. La principale exception étant le dessin 3D des volumes, pour lesquels les logiciels commerciaux semblent rester la principale solution (d'après les connaissances de l'auteur qui n'a pas fait de recherches poussées en ce sens). Aussi, la principale lacune aujourd'hui concerne la confection de l'IE, pour laquelle aucun des logiciels disponibles n'offre de solutions satisfaisantes (voir section 4.3.3).

4 TESTER LES MAILLES AVEC DES SIMULATIONS CONDITIONNELLES

Les simulations conditionnelles sont des méthodes statistiques qui permettent de porter un jugement clair sur la qualité d'une interpolation. Dans le cadre de ce projet, elles seront utilisées pour estimer la qualité de diverses interpolations obtenues à partir de données de forages appartenant à des entreprises membres du CONSOREM (Glencore, Ariane Phosphate et Agnico-Eagle). Ces données de forages seront décimées dans divers tests, ce qui permettra d'étudier diverses mailles de forages. Les simulations conditionnelles seront utilisées pour porter un jugement sur la qualité des modèles produits à partir de chaque maille de forages testée.

4.1 Présentation du logiciel SGeMS

Le logiciel *Stanford Geostatistical Modeling Software* (SGeMS) est développé par l'université de Stanford. Il s'agit d'un logiciel libre et gratuit (voir sgems.sourceforge.net). Il correspond au premier logiciel qui a implémenté les statistiques multipoints (en 2008-2009 environ) et reste, d'après les connaissances de l'auteur de ce rapport, la solution la plus simple d'utilisation et la moins coûteuse pour accéder à ce type d'outils. Le logiciel s'accompagne d'un livre (Remy et al., 2009) qui fait office de guide de l'utilisateur et qui est disponible à un prix raisonnable sur internet.

Le logiciel donne accès à une dizaine de méthodes de simulations basées sur :

- Un variogramme (statistique à 2 points) : LU_sim, COSGSIM, SOSISM, DSSIM, SGSIM, SISIM;
- Une image d'entraînement (statistique multipoints) : SNESIM, FILTERSIM.

Le logiciel contient également une interface conviviale pour le calcul de variogrammes et d'histogrammes, entre autres. Il contient des outils d'interpolation de type krigeage (*IK, SK, OK, KT, block kriging*, et *cokriging*). Il contient également divers outils qui permettent de transformer les données, de traiter les résultats des simulations conditionnelles, et autres.

Le logiciel travaille très bien avec des grilles 2D et 3D. L'interface 3D est conviviale, et permet de découper des volumes en tranches ou de rendre une partie des données transparentes (à des fins de visualisation) (Figure 21).

Le logiciel contient également un panneau de commande, qui permet à l'utilisateur d'entrer des commandes plutôt que d'utiliser les fenêtres de dialogues (liste des commandes disponibles dans Remy et al., 2009) et une interface permettant d'entrer des lignes de codes (langage Python). Le logiciel SGeMS est conçu de la façon suivante : il contient des outils de base (interpolations spatiales et simulations conditionnelles) et toutes les opérations complexes peuvent être définies par l'utilisateur (via des lignes de codes Python).

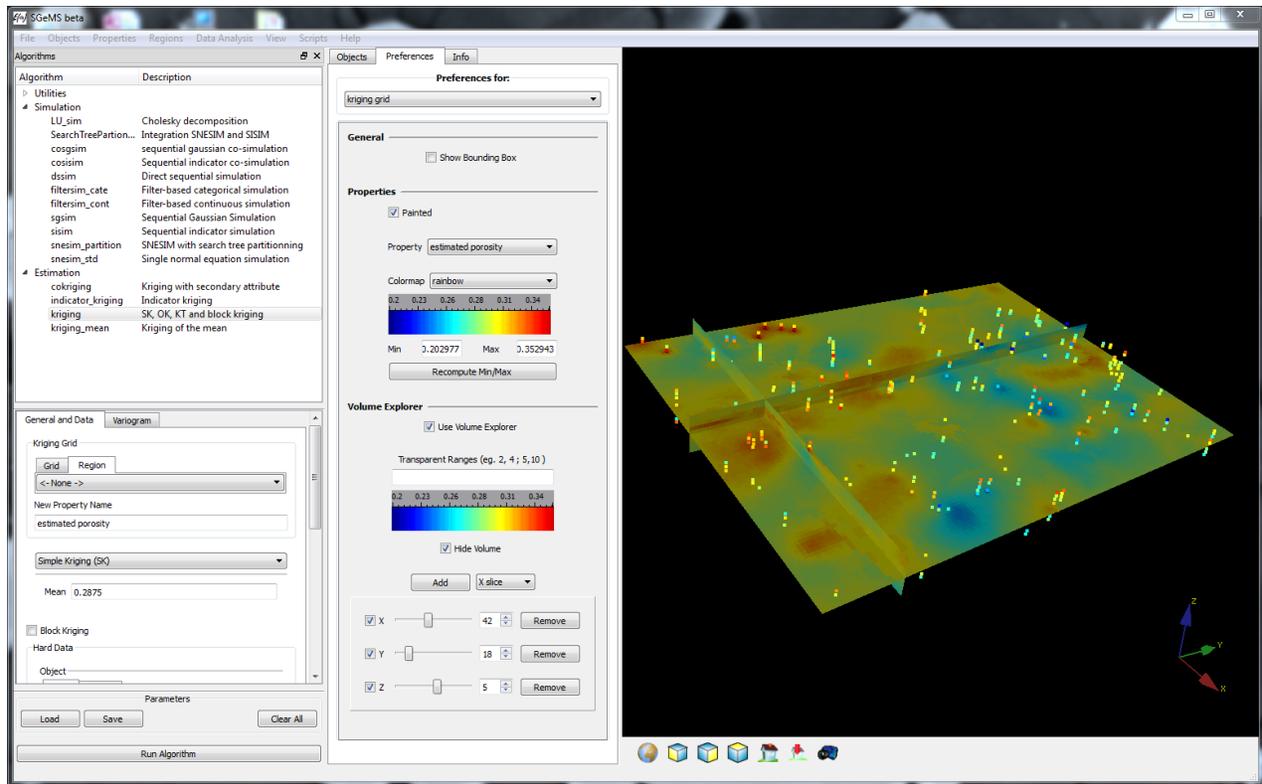


Figure 21 : Logiciel SGeMS, montrant une interpolation de type krigeage réalisée le long d'une grille 3D, dont 3 tranches sont montrées.

4.2 SGS – *Sequential Gaussian Simulation*

Le test présenté dans cette section a été réalisé à partir des forages d'Arianne Phosphate effectués dans la zone à Paul. A l'aide de l'ensemble des forages, un modèle de variogramme omnidirectionnel a pu être proposé (Figure 22). Notez qu'aucun traitement n'a été effectué sur les données de P_2O_5 (pas de composites, pas de « *capping* », etc.), ce qui demandera à être raffiné à l'avenir.

Les paramètres du krigeage utilisés ici sont différents de ceux utilisés pour calculer les ressources du gisement (voir Rachidi et Duplessis, 2015). Cette différence est due au fait que le test présenté ici sert à illustrer le potentiel de la simulation de type *SGS*. Pour ce qui est de la compréhension de la zone à Paul, il est recommandé de procéder à un test similaire en utilisant les domaines et les paramètres plus précis proposés par Rachidi et Duplessis (2015).

Les simulations conditionnelles ont été réalisées avec l'outil *SGSIM* du logiciel SGeMS. La grille utilisée a les paramètres suivants : 1) nombre de blocs (301 en x, 87 en y, 47 en z) ; 2) taille des blocs (10 par 10 par 10 m) ; et 3) position de l'origine (372940 m en x, 5528980 m en y, 0 m en z).

Les paramètres des simulations sont les suivantes :

- Nombre de réalisations : 100 ;
- Type de krigeage: « *Ordinary Kriging* » (*OK*) ;
- Paramètres du variogramme : $nugget = 3.5$, $sill = 10$, $range = 250, 200, 150$ (max, mid, min), angle (0, 0, 0), modèle exponentiel ;

- Ellipsoïde de recherche : angle = 0, longueur des axes = 100 m (tous les forages utilisés) ou 200 m (une ligne de forage sur deux utilisée).

Les tests ont été effectués avec les données suivantes : 1) tous les forages (test 1) ; 2) une ligne de forages sur deux (test 2) ; et 3) lignes de forages non utilisées par le test 2 (test 3) (Figure 23).

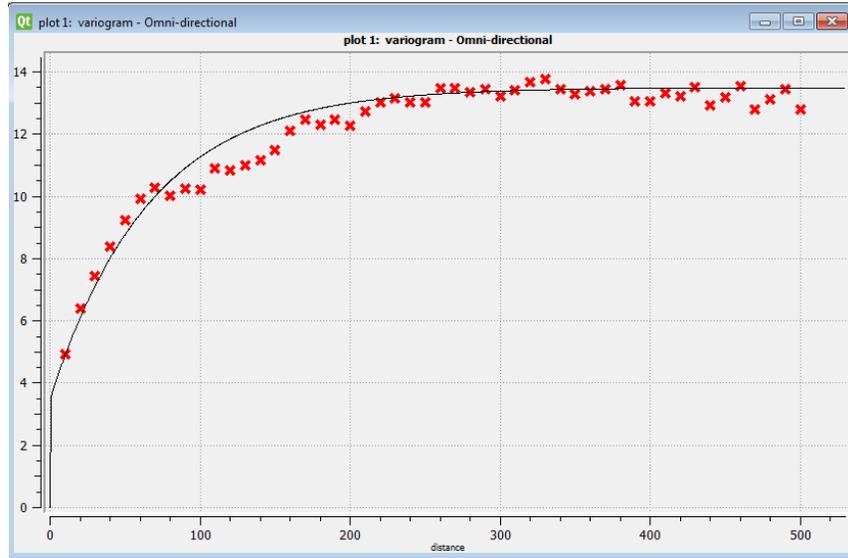


Figure 22 : Variogrammes expérimentaux et modélisés calculés à partir des teneurs de P_2O_5 (% pds).

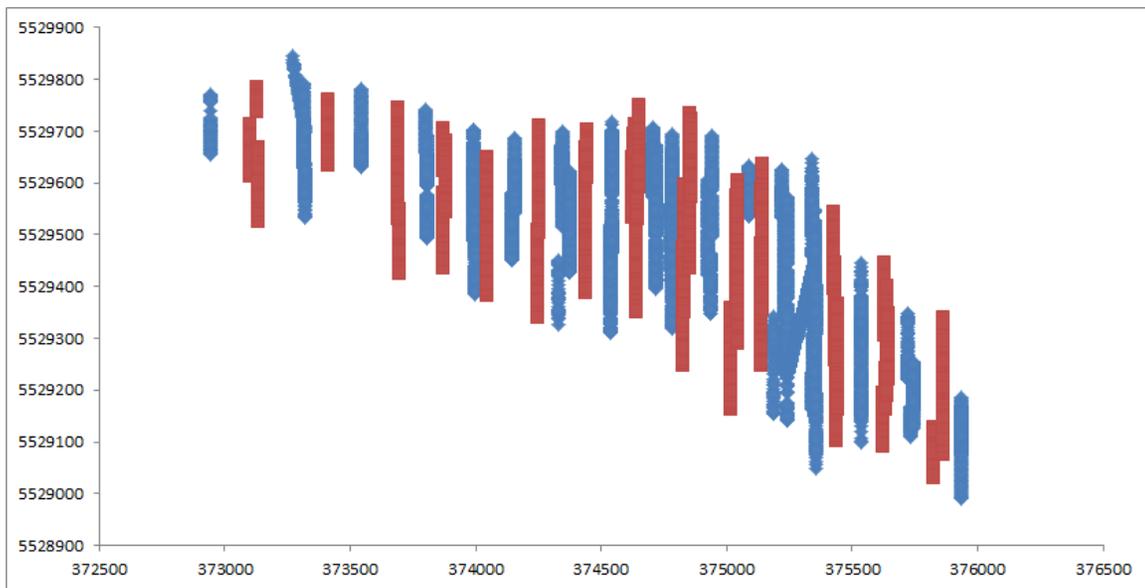


Figure 23 : Vue en 2D (en carte) des données de forages d'Arianne Phosphate. Le test 1 utilise tous les forages, et les tests 2 (en bleu) et 3 (en rouge) n'utilisent qu'une partie des forages.

Plusieurs valeurs peuvent être calculées à partir des 100 simulations réalisées pour chaque test. La première est la grille du paramètre E (moyenne, pour chacun des blocs, des valeurs produites par les 100 simulations), qui est l'équivalent du résultat unique qui aurait été obtenu par krigeage ordinaire des valeurs. Mais l'intérêt des simulations est de produire des grilles de probabilité.

L'entreprise Ariane Phosphate utilise une valeur de coupure de 4% pds P₂O₅ pour la zone à Paul. Dans cet exercice, les résultats des simulations ont été utilisés pour calculer la probabilité que chaque bloc a de prendre une valeur > 4% pds P₂O₅ (Figure 24 à 27)

En comptant le nombre de blocs qui ont diverses probabilités de prendre des valeurs supérieures à la valeur de coupure, en multipliant ce nombre par le volume des blocs (c.-à-d. 10 * 10 * 10 = 1000 m³) et par une valeur moyenne de densité (densité utilisée = 3,4 g/cm³), un tonnage pour chaque probabilité est obtenu (Tableau 2). Notez que les tonnages sont similaires d'un test à l'autre (sauf pour les valeurs les plus probables ; avec probabilité > 0,9). Le fait de décimer les forages n'a pas un effet important sur le résultat final, mais cela a un effet sur la forme de la zone minéralisée (voir Figure 26 et Figure 27). Pour comparaison, les tonnages estimés par Rachidi et Duplessis (2015) sont également présentés au Tableau 3.

Ces probabilités sont la grande force des simulations. Il est possible d'identifier les zones pour lesquels le degré de confiance est le plus fort (probabilité > 80% d'avoir une teneur > 4% pds P₂O₅, par exemple), et celles qui ont plus de chances d'être situées en dehors de la zone minéralisée. Le volume de la zone minéralisée qui sera interprétée va dépendre du « risque que l'on souhaite prendre », et ceci doit faire l'objet d'un choix de la part de l'utilisateur : est-ce qu'une probabilité de 50% d'avoir une teneur > 4% pds P₂O₅ est acceptable, ou préfère-t-on considérer les zones ayant des probabilités plus élevées? La force des simulations est de donner la possibilité à l'utilisateur de faire ce choix.

Tableau 2 : Résultats des simulations conditionnelles pour les 3 tests

Probabilité d'être > 4% pds P ₂ O ₅	Tonnage en tonnes (avec densité = 3,4 g/cm ³)		
	Test 1	Test 2	Test 3
50%	2 325 168 200	2 939 779 400	3 066 715 000
60%	1 479 374 000	1 782 626 800	1 764 402 800
70%	845 872 400	958 167 600	861 033 000
80%	404 538 800	423 884 800	329 252 600
90%	109 609 200	99 283 400	57 854 400

Tableau 3 : Estimation des ressources pour la zone à Paul (tiré de Rachidi et Duplessis, 2015)

Tableau 9: Comparaison des ressources minérales de ce mémorandum (2015) par rapport aux ressources minérales 43-101 publiées en 2013.

Ressources minérales	Ressources minérales 2015 GMG			Ressources minérales 2013	
	Densité	P ₂ O ₅ %	Tonnes	P ₂ O ₅ %	Tonnes
Présumées	3,35	6,58	26 010 000	5,89	9 810 000
Indiquées	3,41	7,05	385 060 000	7,02	253 480 000
Mesurées	3,44	7,29	317 640 000	7,22	336 760 000
Indiquées + Mesurées	3,43	7,16	702 700 000	7,13	590 240 000

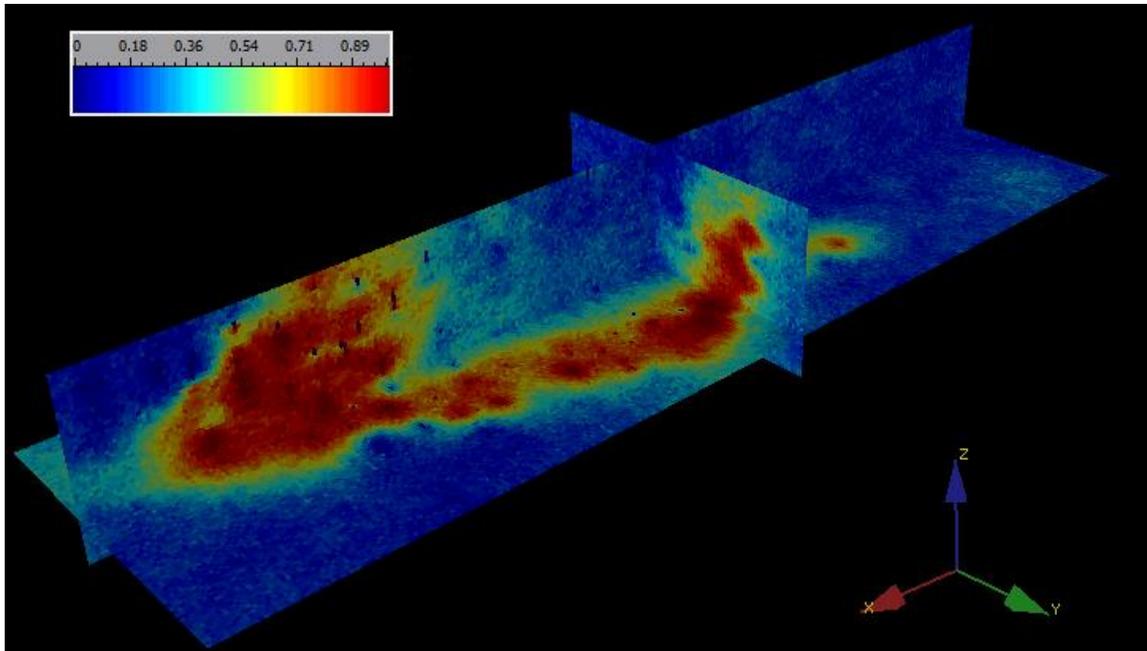


Figure 24 : Sections réalisées dans une grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 1). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P_2O_5 supérieure à 4% pds.

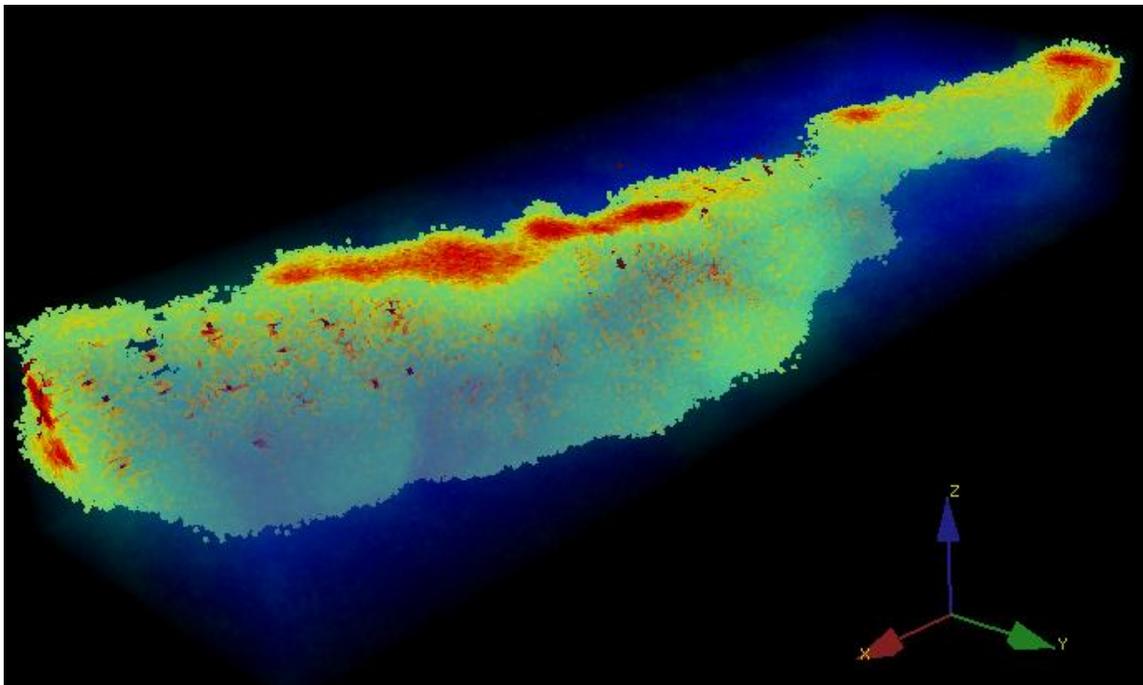


Figure 25 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type SGS (test 1). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d'avoir une teneur de P_2O_5 supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité $> 0,5$ (50% de chances) d'être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.

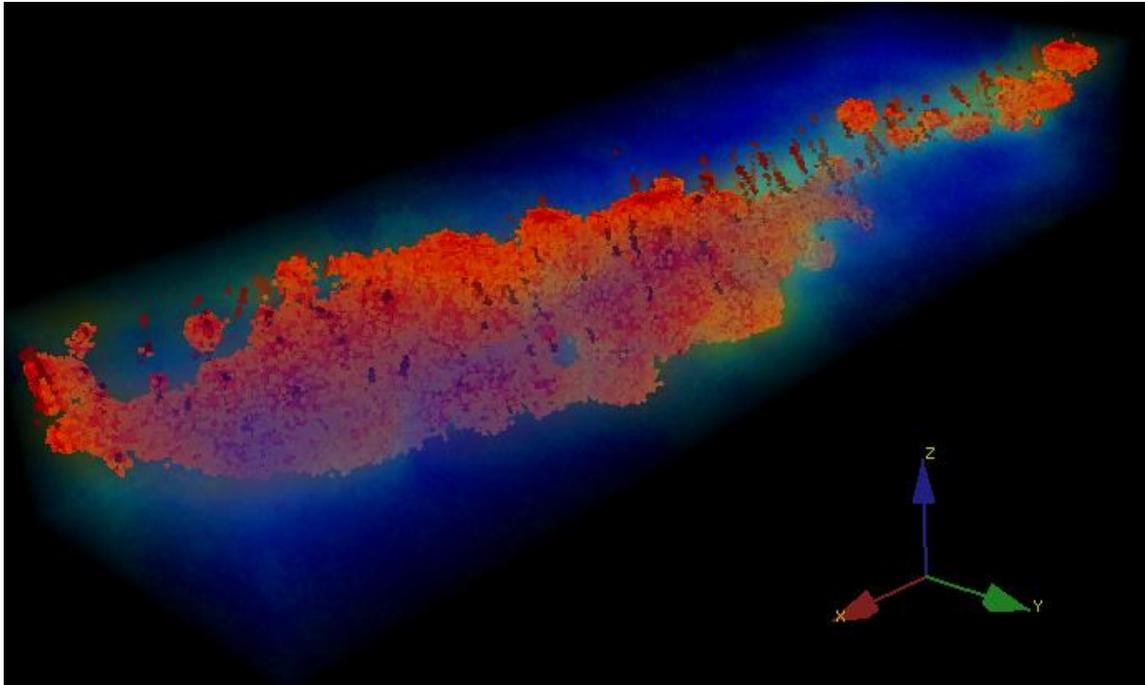


Figure 26 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type *SGS* (**test 1**). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d’avoir une teneur de P_2O_5 supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité $> 0,8$ (80% de chances) d’être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.

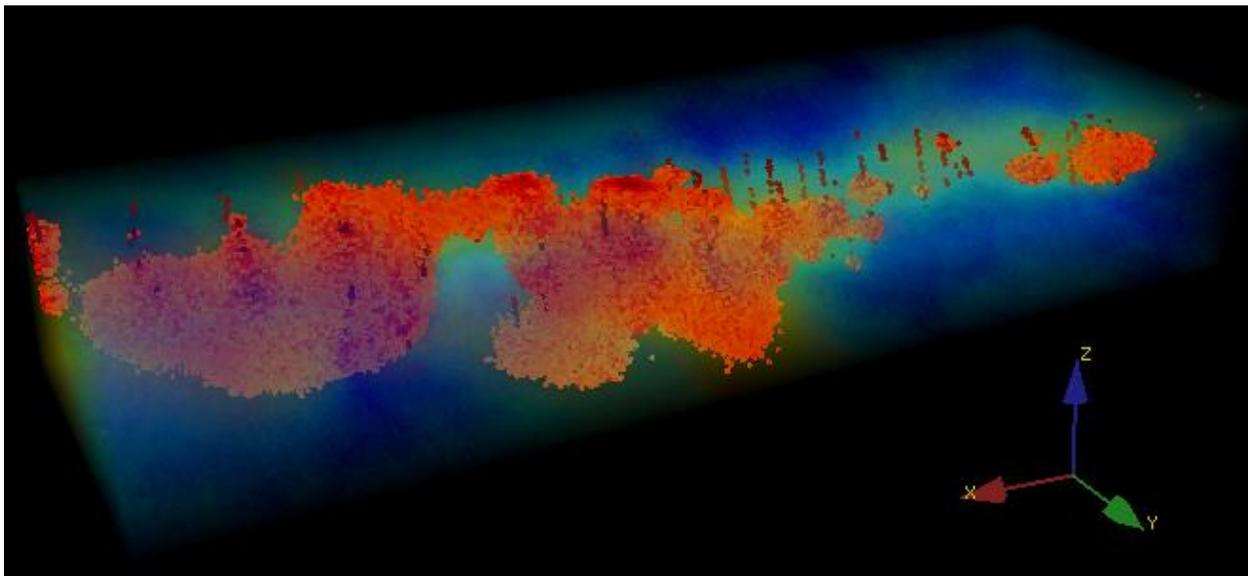


Figure 27 : Grille présentant les résultats de la simulation conditionnelle de type *SGS* (**test 2**). Le code couleur montre la probabilité que chaque bloc à d’avoir une teneur de P_2O_5 supérieure à 4% pds, et seules les zones ayant une probabilité $> 0,8$ (80% de chances) d’être au-dessus de la teneur de coupure sont montrées.

4.3 Simulations basées sur des statistiques multipoints : introduction

La géostatistique multipoints est une méthode non-Gaussienne qui permet de définir des fonctions vraiment complexes. Prenons l'exemple de teneurs en Cu réparties dans un volume de roches. La distribution de ce type de données peut être décrite de façon satisfaisante par des statistiques à 2 points (c.-à-d. à l'aide d'un variogramme). Si l'on considère la géométrie d'une lentille de sulfures massifs par exemple, ce type de géométrie ne peut pas être décrit de façon satisfaisante par un variogramme. Par contre, cette géométrie peut être décrite par une image d'entraînement (ou IE dans cette section). Sans entrer dans les détails, retenir que l'utilisation de l'IE nécessite l'emploi de statistiques multipoints.

Pour un historique de la méthode, et une liste non exhaustive de références, voir Remy et al. (2009).

4.3.1 Prérequis : IE – Image d'entraînement

Une *Image d'entraînement (IE)* est un modèle géologique de la réalité qui contient, autant que possible, la complexité spatiale nécessaire à la simulation (d'après Sell, 2015). En d'autres termes, si l'on souhaite simuler la morphologie d'une lentille minéralisée, l'image d'entraînement utilisée devra contenir l'ensemble des géométries que la lentille pourrait présenter, à petite échelle. Mais elle ne doit pas essayer de représenter la lentille « vraie » (celle que l'on pourrait tenter de dessiner à partir des forages sous un logiciel 3D – voir modèles déterministes, Section 3.1).

L'IE doit seulement contenir l'ensemble des géométries possibles. L'algorithme de simulation conditionnelle utilisé (*SNESIM* ou *FILTERSIM* dans le cadre de ce projet) se chargera ensuite de conditionner (ajuster) l'image d'entraînement aux données de forages.

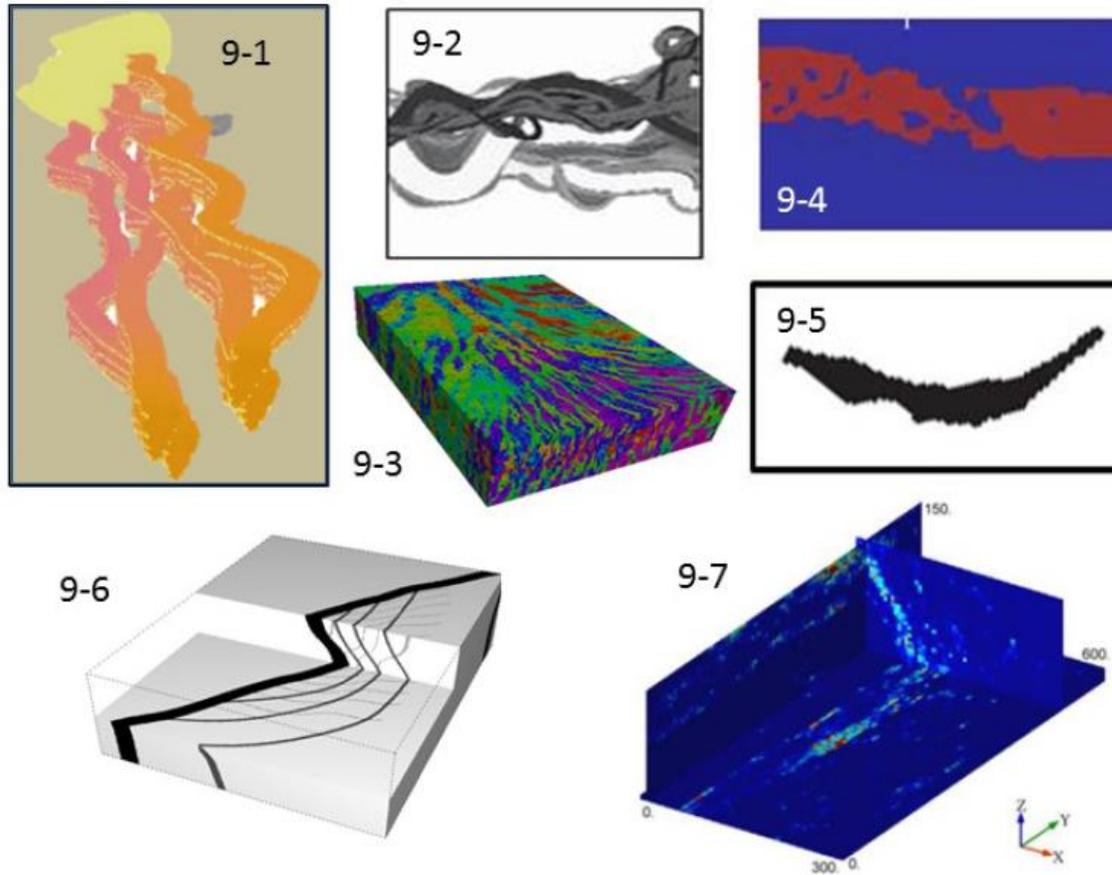
Il existe plusieurs façons de produire les IE, selon les besoins. Ces méthodes sont revues par Sell (2015) et sont les suivantes :

(1) Object-based : Il s'agit de modèles simples, contenant un agencement de formes simples (sphères, cubes, etc.). La plupart des algorithmes faciles d'accès sont de ce type (incluant le module TiGenerator qui était disponible dans les anciennes versions du logiciel SGeMS). Ce type de méthode est adapté à la modélisation de réseaux fluviaux, de formes d'érosion simples, etc. Ce type d'image d'entraînement est donc très utilisé par l'industrie pétrolière, mais n'est pas d'une grande utilité pour l'industrie minière, qui tente de modéliser des formes ayant des géométries différentes de celles de réseaux fluviaux (Fig. 28, no. 9-1) ;

(2) Process-based : Il s'agit de simulations. Pour prendre un cas applicable au domaine minier, il s'agit de simuler le chemin qui pourrait prendre des fluides dans un réseau de fractures pour simuler une zone minéralisée (Boisvert et al., 2008). Ce type de méthode est séduisant bien que complexe, mais le modèle repose fortement sur le réseau de fracture choisi : il est donc très dépendant d'un état de connaissance (voir no. 9-2 de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ;

(3) Expertly-derived : Il s'agit de confectionner une IE (dessin « à la main ») à partir des connaissances que l'on a de la géologie locale. En d'autres termes, il s'agit d'utiliser le modèle géologique disponible. Un exemple de ce type de méthode est présenté par Srivastava et al. (2005) (voir section 3.5.1 ainsi que figure 28, no. 9-4, 9-5, 9-6) ;

(3) Geological analog : Il s'agit d'utiliser des zones connues du gisement étudié (la zone la plus fortement forée par exemple), ou des gisements analogues, pour confectionner l'IE (comme pour la méthode précédente) ou pour la simuler (voir figure 28, no. 9-7)).



Example of TIs from the MPS literature: -1 is an object-based TI for a series of turbidite flows (Strebelle, 2002), -2 is a process-based TI of a delta channel (Pyrz et al., 2009); -3 is complex TI from (Honarkhah and Caers, 2012); -4 and -5 are orebody analogs used to model the geometry of an iron ore deposit (Goodfellow et al., 2012; Osterholt et al., 2007), -6 categorical TI of the Apensu deposit built using drillhole information (Jones et al., 2013), 9-7 continuous TI of the Apensu deposit built using sequential Gaussian simulations (Machuca-Mory, et al., 2011).

Figure 28 : Différents types d'images d'entraînement (tiré de Sell, 2015).

(4) Low rank matrix or tensor completion (LRMC ou LRTC) : Lorsque l'on génère une image d'entraînement avec l'une des méthodes citées ci-dessus, cette dernière IE produite ne respecte généralement pas les statistiques des données disponibles. Pour pallier à ce problème, il est possible d'utiliser des méthodes capables de générer des données exhaustives (c.-à-d. que toutes les portions de la matrice (2D) ou du tenseur (3D ou dimension supérieure) sont renseignées). Les méthodes d'interpolation spatiale ou de simulation sont capables de faire cela en utilisant les données les plus proches et/ou en générant des informations en étudiant la distribution des données. Mais il existe des méthodes (approximations de type « low-rank ») capables d'estimer la valeur des données manquantes en prenant en compte la structure globale des données (Figure 29). Ce type d'algorithme permet de reconstituer des signaux à partir d'une faible quantité de données et a des applications très diverses dans les domaines du jeu vidéo, de la photographie, etc. Le travail de Sell (2015) a été d'adapter la méthode à des données mal réparties dans l'espace (c.-à-d. données de forages), ce qui a été possible via la mise en place d'une méthodologie innovante et grâce à l'utilisation de l'algorithme LRTC.

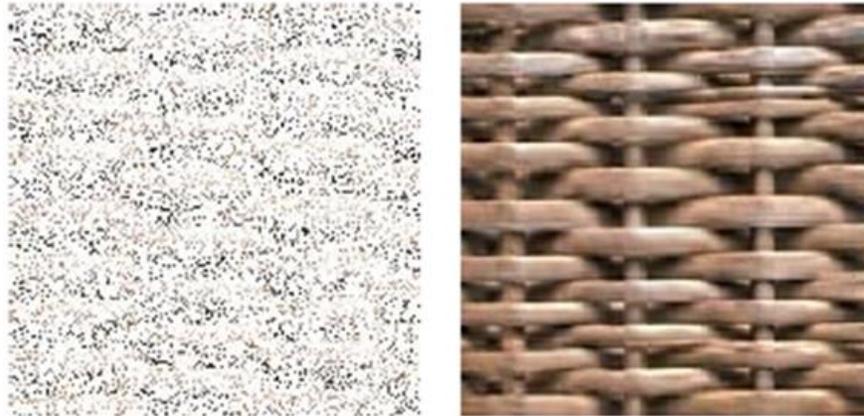


Figure 29 : Exemple de reconstruction de signal avec une méthode *low-rank* . La figure de gauche contient 80% d'informations manquantes, et celle de gauche correspond à la reconstruction de cette image (tiré de Liu et al., 2009).

4.3.2 Génération d'IE de type expertly-derived

La façon la plus simple de générer des IE est de tracer une forme en 2D (sous Illustrator dans le cas présent), de la traduire en 0 et 1 (avec un code Python), et de l'importer sous SGeMS. Le dessin est de type *expertly-derived*, car il correspond au modèle géologique ; c.-à-d. à l'idée que l'on se fait de la forme générale que peut avoir un gisement.

Plusieurs exemples de simulations 2D utilisant ce type de IE sont présentés ci-dessous. Dans cette section, la méthodologie utilisée pour importer ce type de données dans SGeMS est détaillée. Notez qu'il est difficile de générer des IE 3D qui ont une bonne consistance interne et qui représentent bien l'idée que l'on se fait du gisement avec ce type de méthodologie. La génération de IE en 3D sera explorée par les sections suivantes de ce rapport.

La méthodologie utilisée est la suivante :

- Dessiner le modèle géologique sous Illustrator (ou autres), et exporter l'image en .bmp SANS lissage. La résolution importe peu (ppp sous Illustrator), mais doit être d'une qualité suffisante). L'image doit être « à l'envers », parce que l'outil utilisé par le code Python considère que l'origine est située dans le coin supérieur gauche de l'image, alors que SGeMS considère que l'origine d'une grille est située dans le coin inférieur gauche (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**);
- Utiliser la routine Python pour transformer l'image en une suite de 0 et 1 (un fichier .txt est généré). La routine est disponible à l'Annexe I;
- Importer le .txt sous SGeMS en tant que *cartesian grid* « grille cartésienne ». La taille des cellules (ou blocs, ou résolution de la grille) doit correspondre aux chiffres utilisés sous Python, les coordonnées de l'origine doivent être procurés et le nombre de blocs doit être consistant (sinon SGeMS cesse de fonctionner sans produire de messages d'erreur) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



Figure 30 : Exemple de TI ; à gauche : image.bmp exportée à partir du logiciel Illustrator (notez que l'image est à l'envers) ; à droite : importations de la liste de 0 (bleu) et 1 (rouge) sous SGeMS (dans une grille 2D).

Génération d'IE avec un algorithme de type LRTC

La méthode mise au point par Sell (2015), qui utilise l'algorithme *Low-Rank Tensor Completion* (LRTC) de Liu et al. (2009) qui permet de générer des IE 3D qui ont une consistance interne (un prérequis pour les simulations conditionnelles) et qui respectent les statistiques des données disponibles. La méthode est très prometteuse pour le domaine minier. Elle est cependant complexe à implémenter.

Note : une tentative d'implémentation de la méthode a été effectuée dans le cadre de ce projet. Les algorithmes de *matrice completion* disponibles gratuitement sur internet sont très nombreux et sont faciles à utiliser depuis Matlab (pas Python, car Python est moins adapté à la manipulation de matrices). Cette tentative n'a pas abouti, car trop couteuse en temps. L'implémentation de ces méthodes devrait faire l'objet d'un projet CONSOREM à part entière.

4.3.3 Plaidoyer pour un logiciel

Les simulations conditionnelles, basées sur des statistiques multipoints, sont des techniques très prometteuses qui ont un grand potentiel pour le domaine minier. L'existence du logiciel SGeMS facilite grandement l'accès à deux types de simulations de ce type : *SNESIM* et *FILTERSIM*.

L'utilisation de ces algorithmes pour des tests en 2D est aisée (voir section 4.4), mais demande la manipulation de codes. L'utilisation de ces algorithmes pour des tests en 3D est limitée par notre capacité à générer des TI en 3D de qualité. Pour ce faire, la méthode développée par Sell (2015), par exemple, est prometteuse, mais difficile à implémenter.

Ainsi, pour que la méthode soit vraiment accessible au domaine minier, il semble nécessaire de procurer un outil logiciel qui facilite la génération des images d'entraînement. La confection d'un tel outil ne peut pas être réalisée dans le cadre de ce projet, par manque de temps et d'expertise. Mais le développement d'un tel outil est jugé crucial pour l'avenir de ces méthodes.

4.3.4 Présentation de la méthode FILTERSIM

La méthode *FILTERSIM*, disponible sous le logiciel SGeMS, est la méthode de simulation conditionnelle qui a été privilégiée dans le cadre de ce projet, car simple à paramétrer, rapide, et efficace. Cette méthode est rapidement présentée dans cette section (pour plus de détails, voir Remy et al. 2009 et références incluses).

La méthode *FILTERSIM* est capable de travailler avec une grande quantité de catégories, bien que la plupart des modèles présentés ci-dessous n'utilisent que deux catégories : 1) catégorie 1 = zones situées dans le gisement ; et 2) catégorie 0 = zones situées en dehors du gisement. La méthode est rapide, car elle optimise la façon dont elle classe les données obtenues à partir de l'image numérisée. *FILTERSIM* morcelle l'image d'entraînement, utilisant chaque morceau comme autant de pièces d'un puzzle que l'algorithme utilise ensuite pour produire des simulations qui respectent les données (de forage dans notre cas).

Notez que cette technique est plus rapide, mais moins rigoureuse que la stratégie employée par *SNESIM* (qui tente plutôt de conditionner l'IE par les données de forage).

Lorsqu'utilisée avec le logiciel SGeMS, la méthode *FILTERSIM* demande à l'utilisateur de fixer les paramètres suivants :

- **Outil** : *FILTERSIM_cont*;
- **Hard data** : données de forages. Pour des tests en 2D, ces données doivent avoir l'une de leurs coordonnées (x, y, ou z) constantes. Les propriétés doivent être classées à l'aide de chiffres allant de 0 à n (avec n=1 dans la plupart des tests effectués dans le cadre de ce projet);
- **Soft data** : il est possible d'ajouter des données venant d'autres sources (source géophysique par exemple) pour mieux conditionner la simulation. Cette avenue n'a pas été explorée dans le cadre de ce projet;
- **Image d'entraînement (IE)** : il s'agit d'une grille (2D avec nombre de blocs = 1 dans au moins une direction) ou 3D, rectangulaire. Le code utilisé doit correspondre à celui qui a été utilisé pour coder les lithologies observées en forages (p.ex. si norite = 4 en forage, alors norite doit être égale à 4 dans l'image d'entraînement). Notez que la résolution de l'image a une incidence sur le résultat final (il est recommandé d'effectuer des tests avec des IE deux fois mieux résolues et aussi bien résolues que la «Grille», et d'observer l'effet sur le résultat final);
- **Grille**: il s'agit de la grille qui va recueillir les données simulées. La taille de la grille et sa position doivent être consistantes avec les données de forages. La résolution (taille des blocs) de cette grille est à la discrétion de l'utilisateur (il est recommandé d'utiliser une technique de type essai-erreur pour contraindre la résolution);
- **Nombre de réalisations** : 100 est un bon chiffre qui permet de faire des calculs statistiquement représentatifs. La méthode implémentée par le logiciel SGeMS est si rapide que des chiffres plus importants peuvent être utilisés, mais cela n'apporte pas forcément une valeur ajoutée importante au résultat;
- **Seed** : laisser le paramètre par défaut;
- **Search Template Dimension (Search_TD) et Inner Patch Dimension (Inner_PD)** : paramètres très importants, qui conditionnent la taille des fenêtres de recherche. Utilisez des chiffres impairs pour les fixer (il s'agit de la taille des fenêtres en nombre de cellules, ou blocs, pas de distances en mètres). Plus la taille des fenêtres de recherche est grande, plus le résultat sera précis, et plus le temps de calcul sera long. La taille des objets simulés peut aussi varier selon les cas. Il est recommandé de fixer ces paramètres à l'aide d'une procédure essai-erreur. Note : apportez un soin particulier au choix de ces paramètres, car ils influent énormément sur la qualité du résultat;
- **Paramètres de l'onglet Advanced** : les paramètres par défaut ont été utilisés dans la plupart des cas. Le paramètre *Cross Partition* a été préféré au paramètre *Partition with K-mean* . Il est recommandé à l'utilisateur de faire varier ces paramètres pour les ajuster au mieux (procédure de type essai-erreur).

4.4 Simulations et statistiques multipoints : exemples 2D, données d'Arianne

Dans cette section, diverses simulations conditionnelles effectuées à partir des données de forages de la zone à Paul (forages d'Arianne Phosphate), à l'aide de la méthode *FILTERSIM*, sont présentées.

4.4.1 *FILTERSIM 1 : section horizontale*

Le premier test utilise des données de forages d'Arianne Phosphate situées entre les élévations 225 et 245 m pour effectuer un test en 2D, le long d'une coupe horizontale. L'élévation a été fixée à 235 m pour toutes les données et les valeurs ont été codées de la façon suivante : 1) 1 = dans la nelsonite ; et 2) 0 = à l'extérieur de la nelsonite.

Les images d'entraînement utilisées représentent des zones à nelsonite de morphologies différentes : ces morphologies sont conceptuelles (c.-à-d. qu'elles correspondent peu à la réalité géologique de la zone à Paul), mais sont utilisées ici pour montrer l'effet que le choix de l'image d'entraînement a sur le résultat final.

Les paramètres des simulations *FILTERSIM_cont* effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec *Search_TD* = [23 23 1] ; et *Inner_PD* = [11 11 1]). Dans le cas présenté, l'image d'entraînement a la même résolution que la grille utilisée pour recueillir les résultats des interpolations. Ceci n'est pas nécessaire dans tous les cas, et une modification de la résolution de l'image aura une influence sur le résultat final.

Les résultats sont présentés sous la forme de cartes de probabilité, qui représentent la probabilité que chaque cellule de la grille a, d'être située dans la zone à nelsonite. Selon la probabilité que l'on utilise (\pm selon le risque que l'on décide de prendre), l'aire de la nelsonite qui sera calculée sera différente. Il est d'ailleurs possible de calculer cette aire facilement à partir du « Script Editor » du logiciel SGeMS, en utilisant le langage Python (Figure 34). Notez que l'aspect général des cartes (des résultats) est très dépendant du type de l'IE (c.-à-d. du modèle géologique considéré) que l'on utilise.

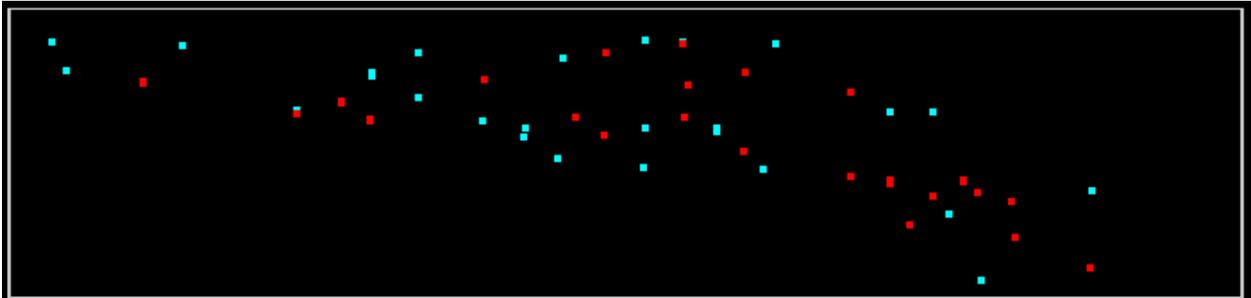


Figure 31 : Données de forages et grille dans laquelle l'interpolation a été effectuée (rectangle blanc). Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite).

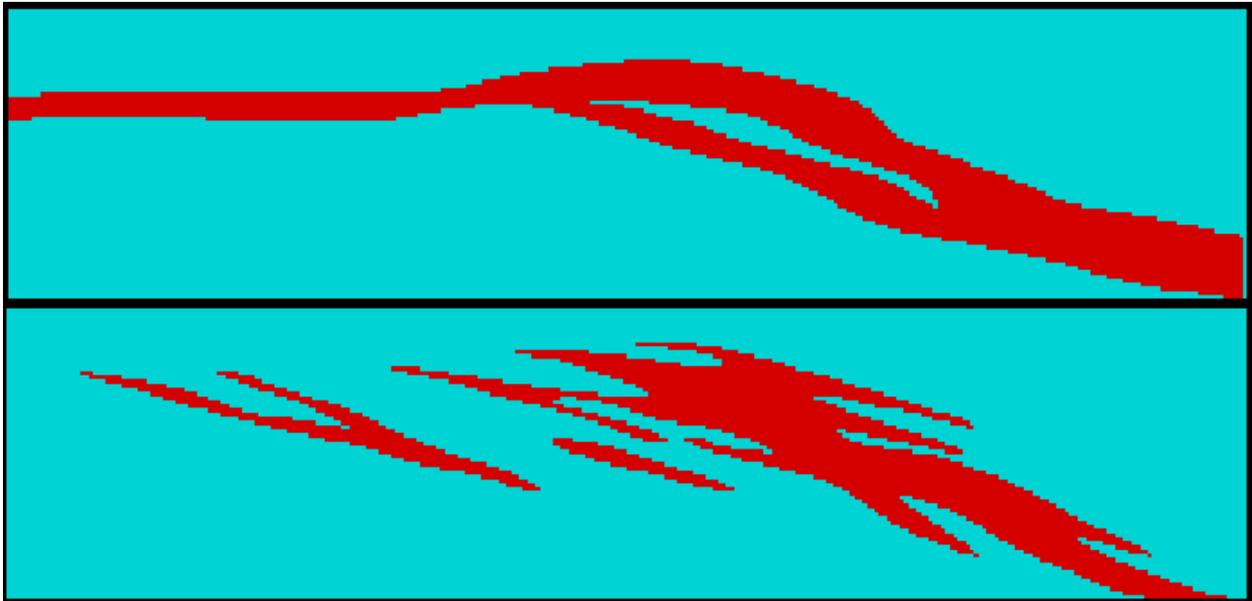


Figure 32 : Deux images d'entraînement représentées avec le logiciel SGeMS (cellules = 10 * 10 m). Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite).

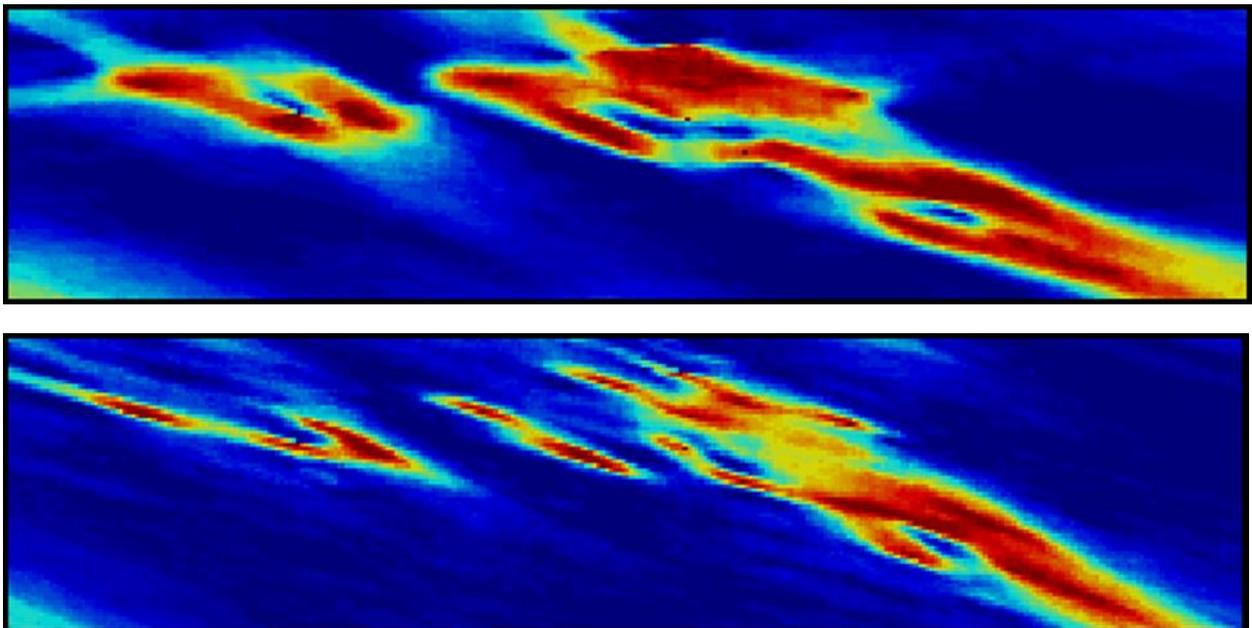


Figure 33 : Résultat de simulations effectuées avec différentes des images d'entraînement. Les cartes représentent la probabilité que chaque zone de la grille (cellules de 10 * 10 m) a, d'être située à l'intérieur du gisement. L'échelle des couleurs va de 0 (bleu, 0% de chances d'être situé dans la nelsonite) à 1 (rouge, 100% de chances d'être situé dans la nelsonite).

```

import sgems

data1 = sgems.get_property('SNESIM_grid03', 'ProbAbT_z2D_tr0.5')
data2 = sgems.get_property('SNESIM_grid03', 'ProbAbT_v2D_tr0.5')

TI1 = 0.0
TI2 = 0.0
for i in range( len(data1) ):
    if data1[i] >= 0.8:
        TI1 += 1

for i in range( len(data2) ):
    if data2[i] >= 0.8:
        TI2 += 1

AIR_TI1 = TI1*10*10
AIR_TI2 = TI2*10*10
print("Aire TI1 = %.0f m2" % AIR_TI1)
print("Aire TI2 = %.0f m2" % AIR_TI2)

```

Script Output Messages

```

Aire TI1 = 209100 m2
Aire TI2 = 101000 m2

```

Figure 34 : Calcul de l’aire de la nelsonite si on considère les zones qui ont 80% de chances de se situer dans cette unité, à partir du « Script Editor » du logiciel SGeMS. Le calcul est effectué pour les deux cartes de probabilités (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

4.4.2 *FILTERSIM 2 : section verticale YZ (X = 374782)*

Le second test illustre la capacité que *FILTERSIM* a de modéliser des zones contenant des catégories multiples. Pour ce test, une section verticale YZ a été prise dans la zone à Paul (forages pour lesquels X = 374782 m, UTM). Seule la lithologie principale a été prise en considération et une IE a été dessinée à partir de ces informations (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les lithologies observées en forages ont été classées de la façon suivante : 1) diorite; 2) « AnGab » = gabbro anorthositique à apatite ou non; 3) gabbro = gabbro, péridotite, amphibolite, pyroxénite, dunite; 4) intrusion = syénite, granodiorite, tonalite, monzonite, troctolite, norite; 5) nelsonite.

L’IE utilisée pourra certainement être améliorée via l’acquisition des connaissances du gisement par les personnes qualifiées d’Arianne Phosphate. L’image a les caractéristiques suivante : 1) l’unité de nelsonite forme un corps cohérent et épais; 2) les unités de diorites sont situées dans et en bordure de la nelsonite; 3) l’encaissant est principalement constitué de « AnGab » (gabbro anorthositique qui contient quelques horizons de gabbro et des intrusions felsiques à intermédiaires); 4) le gabbro et les intrusions ont des volumes faibles, et se situent surtout dans l’unité « AnGab », mais peuvent se situer en bordure et dans la nelsonite.

Les paramètres des simulations *FILTERSIM_cont* effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec Search_TD = [1 11 23] ; et Inner_PD = [1 7 9]).

Chaque réalisation de *FILTERSIM* respecte les caractéristiques principales de l'IE (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Notez, par exemple, que les intrusions sont principalement restreintes à l'unité « AnGab » et ne traversent pas la nelsonite, puisque l'IE ne les autorise pas à le faire. La dernière carte montre la probabilité de se trouver dans l'unité de nelsonite (calculé avec l'outil « PostSIM » de SGeMS ; voir figure 36).

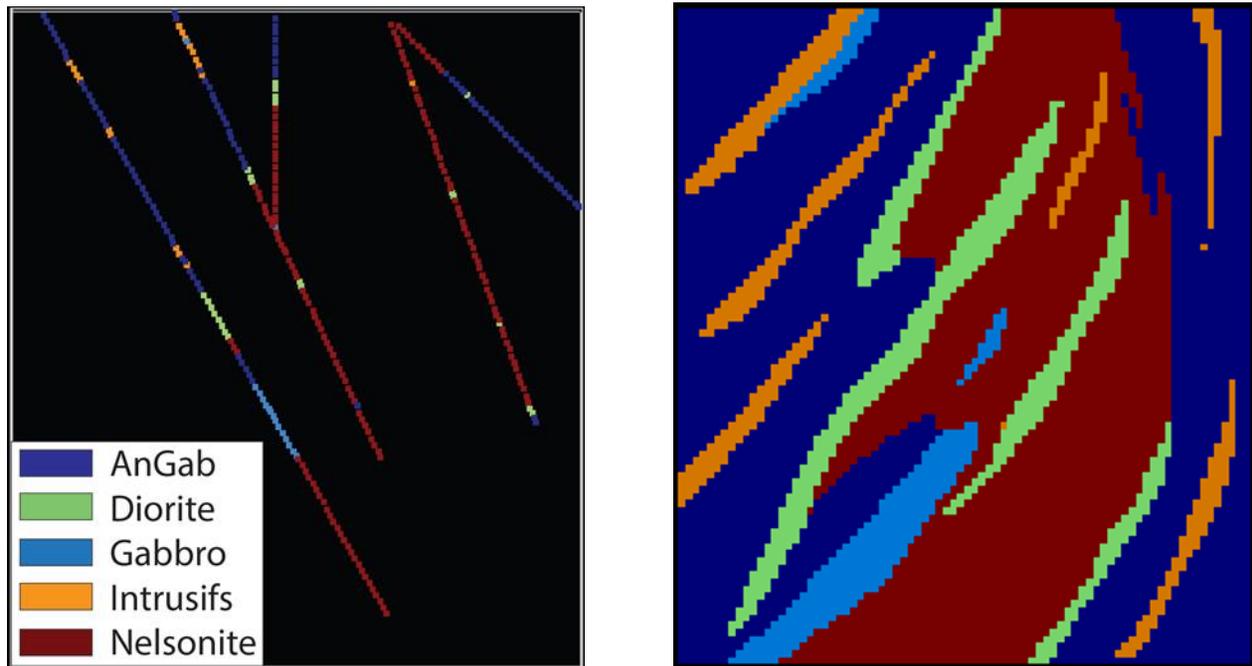


Figure 35 : Image de gauche : lithologies intersectées en forage ; Image de droite : IE (résolution = 5 * 5 m).

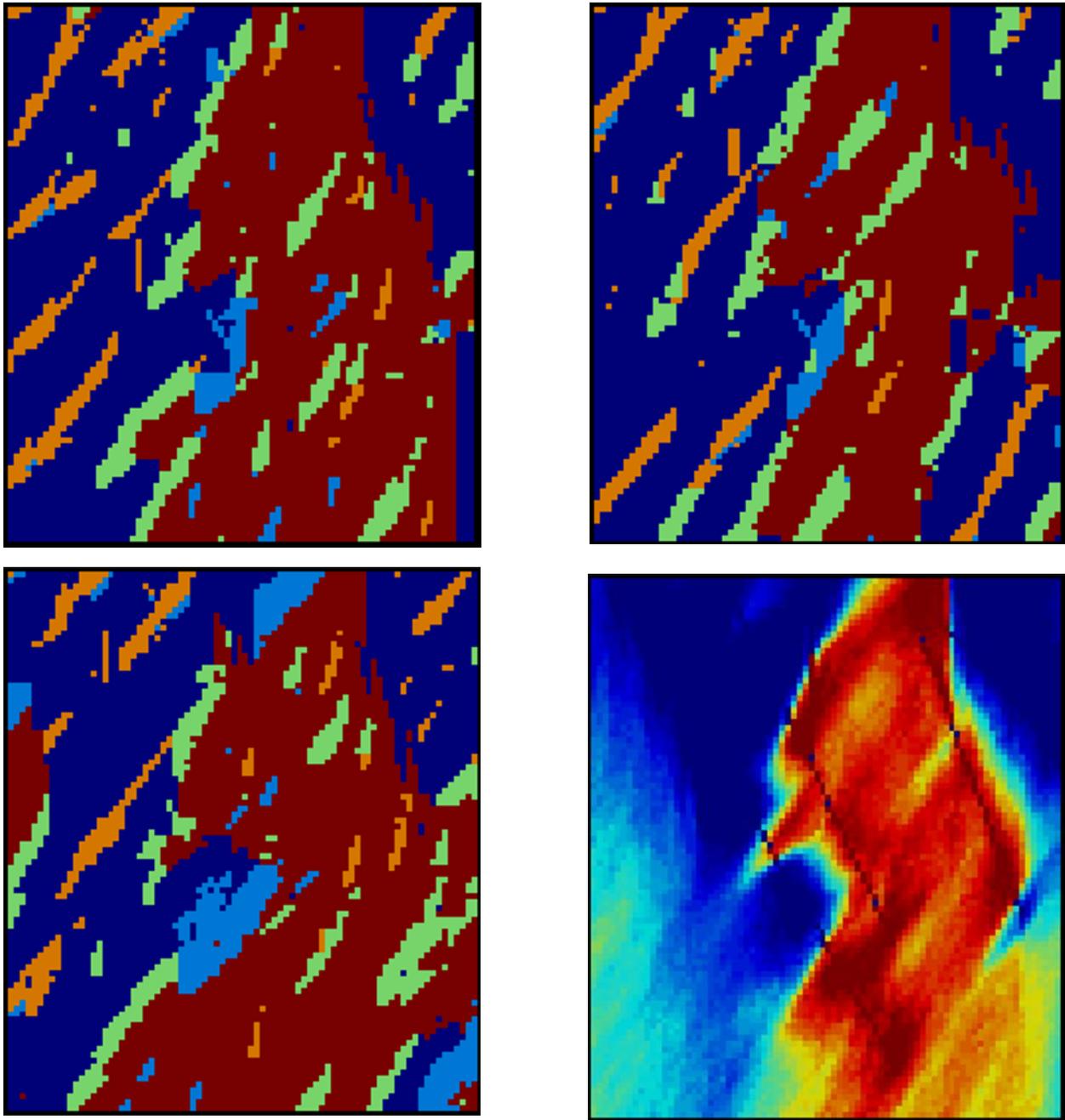


Figure 36 : Exemples de 3 réalisations FILTERSIM (sur les 100 réalisées). En bas à droite : carte de probabilité d'avoir une valeur $> 3,5$ (c.-à-d. de se situer dans l'unité de nelsonite).

4.4.3 FILTERSIM 3 : sections verticales YZ

Le troisième test a permis de simuler la forme de l'unité de nelsonite le long de sections verticales (YZ et XZ) et horizontales (XY). Les TI sont des modèles géologiques qui présentent les caractéristiques suivantes : 1) l'unité de nelsonite est volumineuse, cohérente, et peut former des extensions fines dans la roche hôte ; 2) la nelsonite peut contenir beaucoup de morceaux de roche hôte, mais la roche hôte ne peut pas contenir beaucoup de morceaux de nelsonite (c.-à-d. que l'unité de nelsonite est plutôt continue).

Les paramètres des simulations FILTERSIM_cont effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec Search_TD = [1 11 23] ; et Inner_PD = [1 7 9]).

Le résultat de ces simulations est présenté par les annexes II et III. Les cartes de probabilités reflètent le fait que l'unité de nelsonite pend vers le nord à l'est du gisement et que son pendage s'inverse vers le sud lorsque l'on se dirige vers l'ouest. Les sections horizontales montrent que la nelsonite est plus épaisse en profondeur qu'en surface. Ces caractéristiques sont connues d'Arianne. Ce que les simulations apportent, c'est une quantification des incertitudes sur la géométrie de l'unité de nelsonite. Cependant, pour être complet, ce type de test devrait être effectué en 3D et non le long de sections (voir sections suivantes).

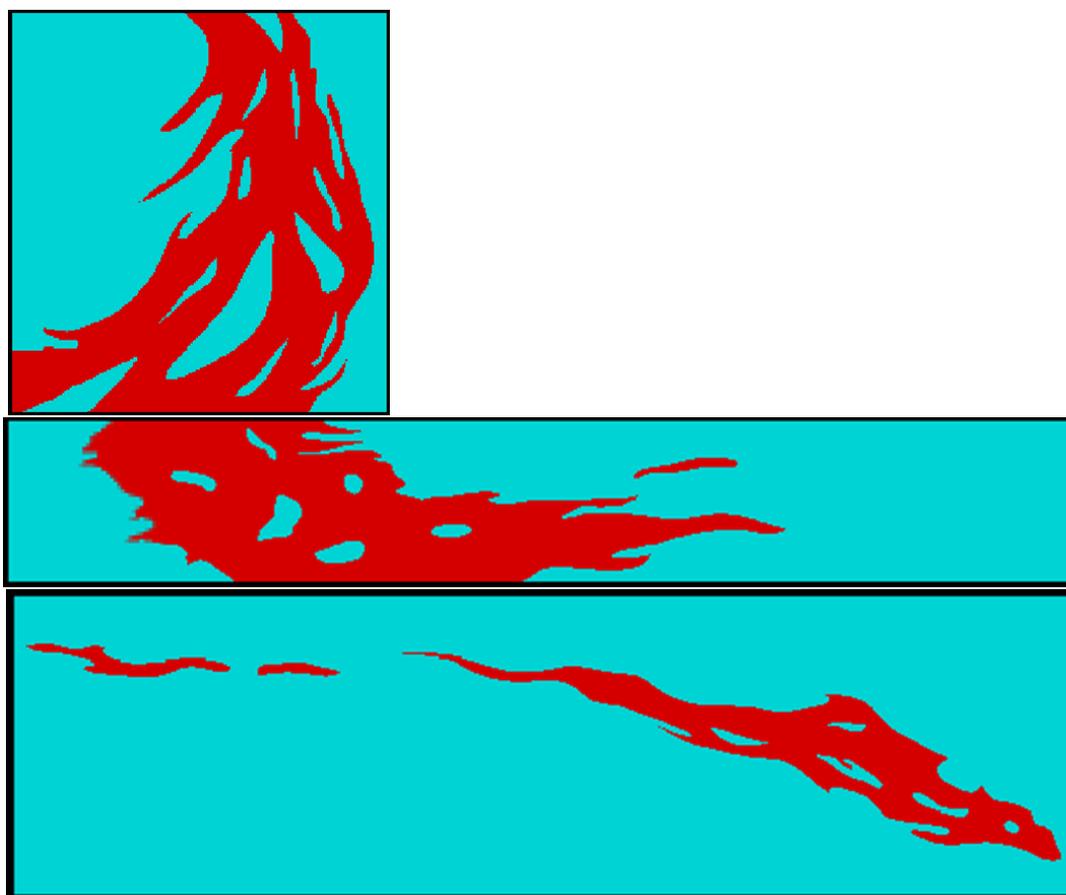


Figure 37 : Les 3 IE en 2D utilisées pour simuler le volume et la forme de l'unité de nelsonite. De haut en bas, les sections sont les suivantes : YZ, XZ, et XY. Le code couleur est le suivant : rouge (dans la nelsonite) et bleu (à l'extérieur de la nelsonite). Les IE ont des résolutions de 2 * 2 m (section YZ) et de 5 * 5 m (sections XY et XZ).

4.5 Simulations et statistiques multipoints : exemple 3D, données d'Arianne Phosphate

4.5.1 *FILTERSIM 1 : modèle de blocs d'Arianne*

Dans cette section, une image d'entraînement 3D a été confectionnée à partir du modèle de blocs des teneurs en P_2O_5 d'Arianne Phosphate (Figure 38). La procédure suivie pour effectuer cette opération est la suivante :

- Ce modèle a été importé avec le logiciel SGeMS, chaque bloc étant traité comme un point caractérisé par sa position dans l'espace et sa teneur en P_2O_5 ;
- Ensuite, ces données ont été transférées à une grille 3D, ayant des cellules de 20*20*20 m. Pour ce faire, les points du modèle de blocs situés dans chaque cellule de la grille ont été moyennés et la moyenne a été entrée dans la grille (si aucun point n'était présent, une valeur de 0 a été ajoutée dans la grille). Cette opération a été effectuée en 6 étapes (6 tranches horizontales) pour optimiser les calculs, et a été effectuée à partir du « Script Editor » de SGeMS;
- Ensuite, le code 1 a été attribué aux cellules contenant une teneur de $P_2O_5 > 4\%$ pds, et le code 0 a été attribué aux cellules ayant une teneur inférieure (Figure 39). Cette dernière étape a permis d'obtenir une image d'entraînement 3D à deux catégories (1 = zone minéralisée, 0 = zone située non minéralisée) (Figure 38).

Les données de forages ont ensuite été importées dans le logiciel SGeMS. Il s'agit des échantillons pour lesquels P_2O_5 a été analysé (chaque échantillon étant localisé dans l'espace grâce à un point situé au milieu de l'échantillon – données exportées depuis *Leapfrog®*). Ces échantillons ont été codés 1 ($P_2O_5 > 4\%$) et 0 ($P_2O_5 < 4\%$) (voir Figure 39 et Figure 40). Notez qu'aucune autre opération n'a été effectuée sur ces données (pas de composites, pas de recouvrement, etc.).

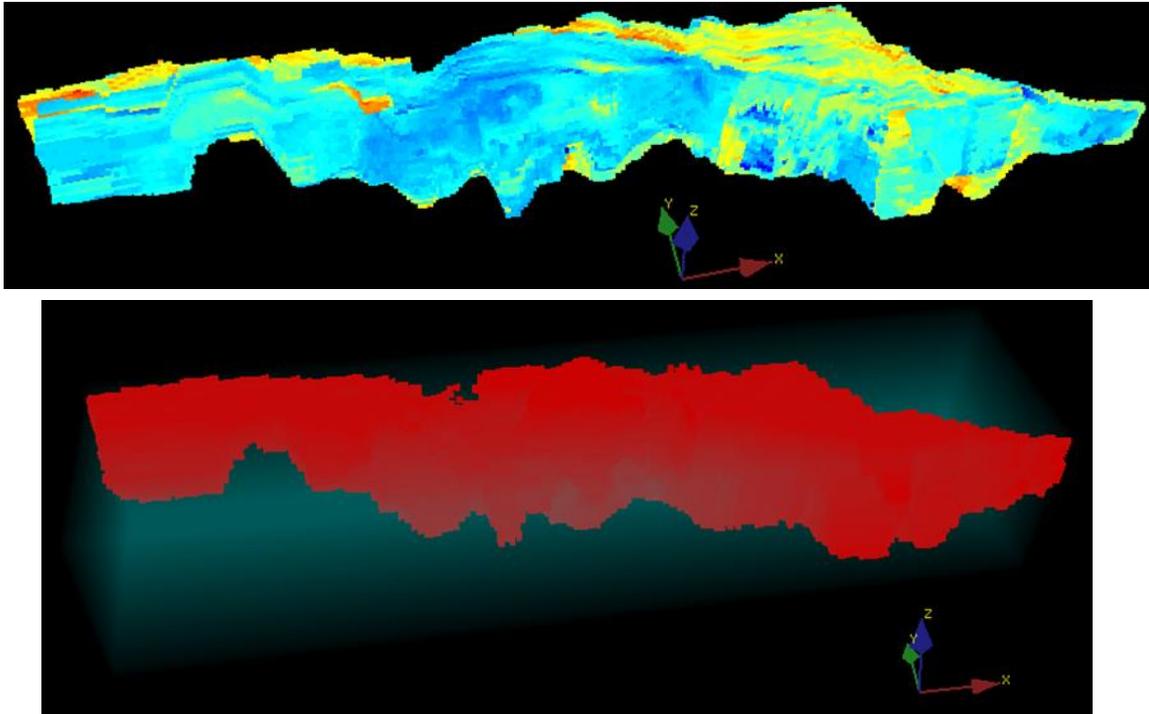


Figure 38 : Modèle de blocs d'Arianne Phosphate (teneurs en P_2O_5 interpolées) et image d'entraînement 3D dérivée de ce modèle.

```

import sgems

P = sgems.get_property('Forage_P2O5', 'P2O5')

New = []
for i in range( len(P) ):
    if P[i] >= 4:
        New.append(1)
    else:
        New.append(0)

sgems.set_property('Forage_P2O5', 'P01_4wt', New)

```

Figure 39 : Script ayant permis d'attribuer des valeurs de 0 ou 1 aux données de forages (exemple montré ici) et aux données dérivées du modèle de bloc d'Arianne Phosphate (c.-à-d. l'image d'entraînement).

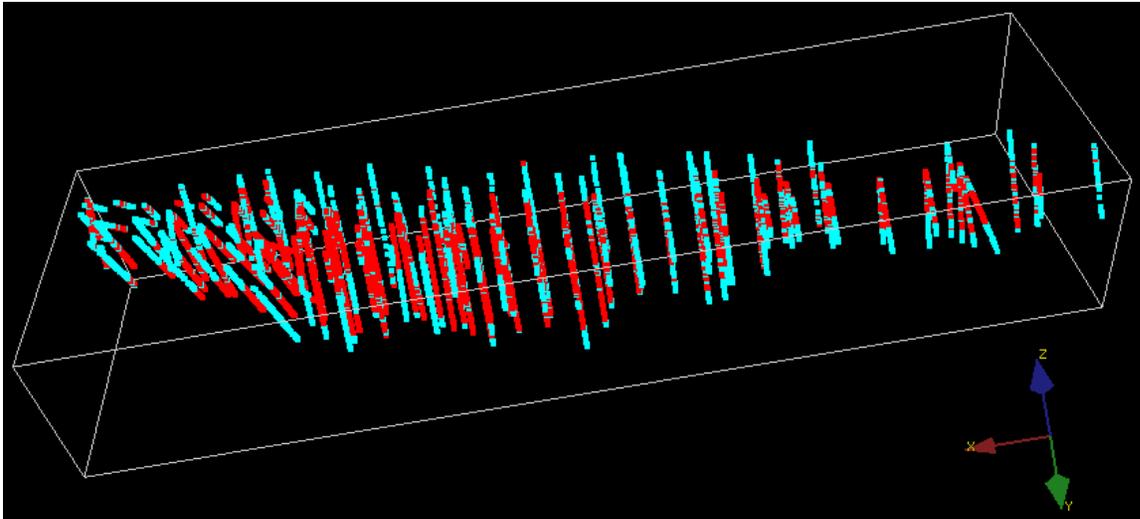


Figure 40 : Échantillons de forage (teneurs en P_2O_5) classés selon les catégories 0 et 1 (test 1). L'encadré blanc montre la grille qui a reçu les données des simulations (résolution = $20*20*20$).

Les paramètres des simulations *FILTERSIM_cont* effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec $Search_TD = [11\ 11\ 5]$; et $Inner_PD = [7\ 7\ 3]$). Les résultats sont montrés sous la forme de probabilités allant de 0 (0% de chances d'être dans la zone minéralisée) à 1 (100% de chance d'être situé dans une zone ayant une teneur de $P_2O_5 > 4\%$ pds) (Figure 41 et Fig. Figure 42).

Les cellules ayant diverses probabilités d'être situées dans la zone minéralisée ont ensuite été comptées grâce au « Script Editor » du logiciel SGeMS (Figure 43) et le tonnage de ces zones a été estimé en utilisant une densité moyenne de $3,4\ g/cm^3$. Le résultat de ce calcul est montré au Tableau 4. Notez que d'après ces résultats, les ressources mesurées par Ariane Phosphate (voir Tableau 3) ont le même tonnage que les zones ayant une probabilité de 90% d'être situées dans la zone minéralisée (d'après la simulation effectuée ici avec tous les forages = test 1), et que les ressources indiquées + mesurées ont un tonnage similaire aux zones ayant une probabilité de 80% d'être situées dans la zone minéralisée.

Le test décrit ci-dessus a été effectué avec tous les forages et est nommé test 1. Deux tests supplémentaires ont été effectués avec la moitié des forages (tests 2 et 3) : les forages utilisés pour chacun des tests étant ceux utilisés à la section 4.2. Un quatrième test (test 4) a été effectué avec un tiers des forages (Figure 44). Les résultats de ces tests sont montrés au Tableau 4. Notez que le tonnage des zones ayant $> 80\%$ de chances d'être minéralisées est moindre pour les tests 2 et 3 que pour le test 1, qui utilise tous les forages, mais que ces tonnages restent similaires. Pour le test 4 (Tableau 4, Figure 45), la différence est plus importante, ce qui montre une perte notable de précision.

Les 4 tests sont également comparés grâce aux courbes de fonction de distribution cumulée (Figure 46), qui montrent que la différence entre les tests est faible. La visualisation 3D des résultats montre des différences plus importantes (voir Figure 41 et Figure 45).

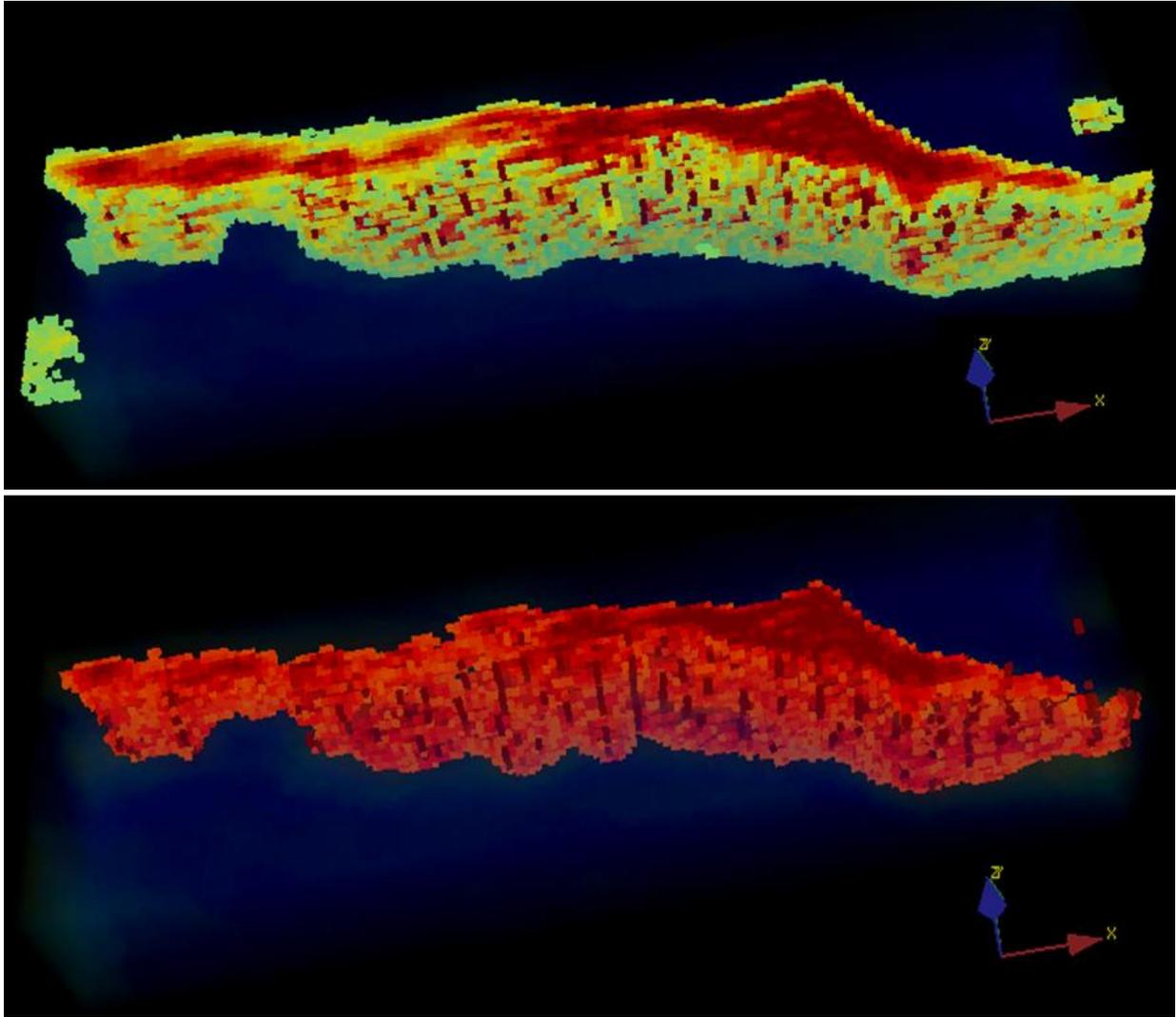


Figure 41 : Probabilités d'être situé dans une zone ayant une teneur de $P_2O_5 > 4\%$ pds (test 1). Seules les zones ayant une probabilité $> 50\%$ (carte du haut) et $> 80\%$ (carte du bas) sont montrées, les autres étant mises en transparence.

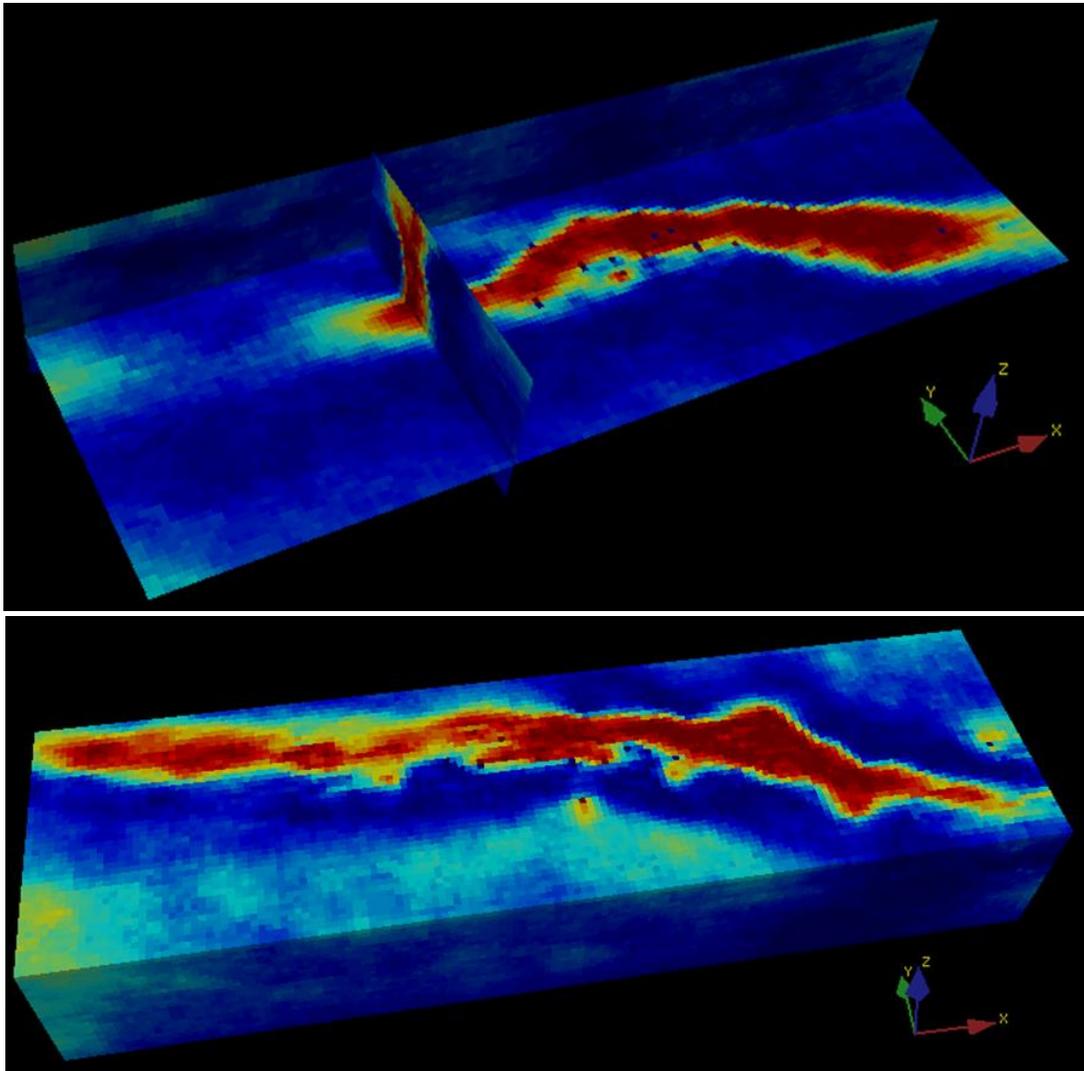


Figure 42 : Probabilités d’être situé dans une zone ayant une teneur de $P2O_5 > 4\%$ pds (test 1). Le résultat est montré le long de 3 sections (en haut) et avec l’entièreté de la grille (en bas).

```

import sgems

data = sgems.get_property('Grid', 'PrAbTr_tr0.5')

Count = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]

for i in range( len(data) ):
    for j in range(0,10,1):
        if j == 9 and data[i] >= 0.9:
            Count[j] += 1
        elif data[i] >= (float(j)/10) and data[i] < ((float(j)+1)/10):
            Count[j] += 1
for C in Count:
    print(C)

```

Figure 43 : Script ayant permis de compter les blocs des grilles contenant les données de probabilités (voir Figure 41 et Figure 42).

Tableau 4 : Résultats de la simulation *FILTERSIM*

Probabilité d'être > 4% pds P2O5	Tonnage en tonnes (avec densité = 3,4 g/cm3)			
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
50%	2 936 920 000	2 534 550 400	2 687 305 600	2 181 684 800
60%	2 156 198 400	1 804 203 200	1 899 104 000	1 503 752 000
70%	1 466 569 600	1 176 753 600	1 227 182 400	946 940 800
80%	874 833 600	661 476 800	687 860 800	516 364 800
90%	368 342 400	249 315 200	264 438 400	191 433 600
Lignes de forages	~100 m	~200 m	~200 m	~300 m

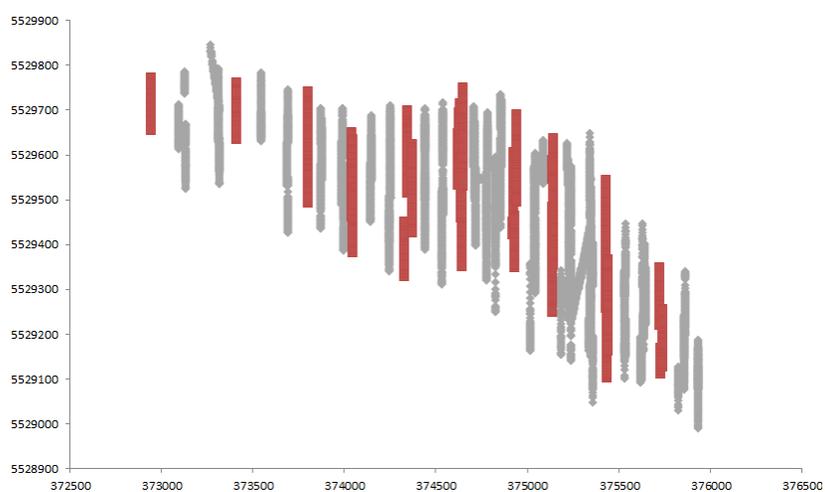


Figure 44 : Forages d'Arianne Phosphate représentés selon leurs coordonnées x et y. Les forages en rouge sont ceux utilisés par le test 4.

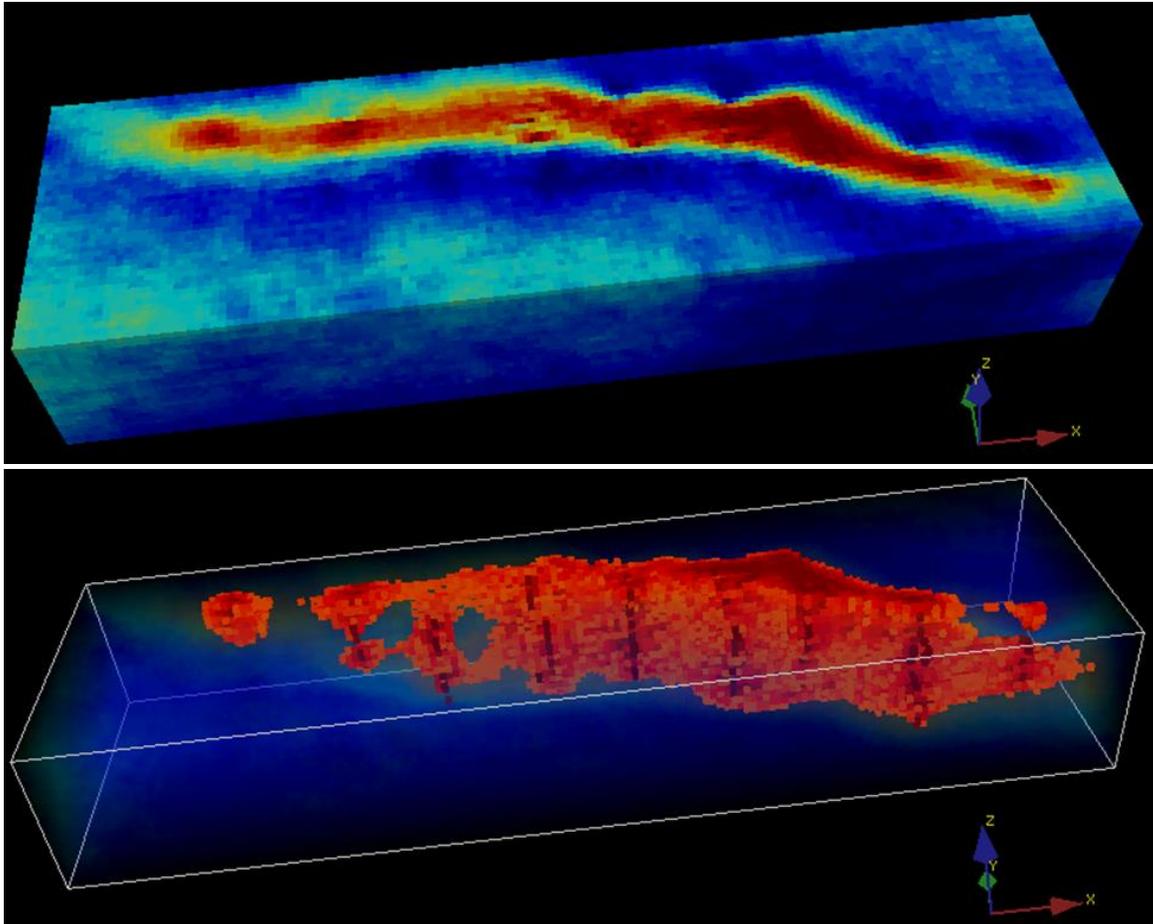


Figure 45 : Probabilités d'être situé dans une zone ayant une teneur de $P_2O_5 > 4\%$ pds (test 4). Le résultat est montré en entier (en haut) ou en partie (en bas; seules les zones ayant une probabilité $> 80\%$ sont montrées, les autres étant mises en transparence).

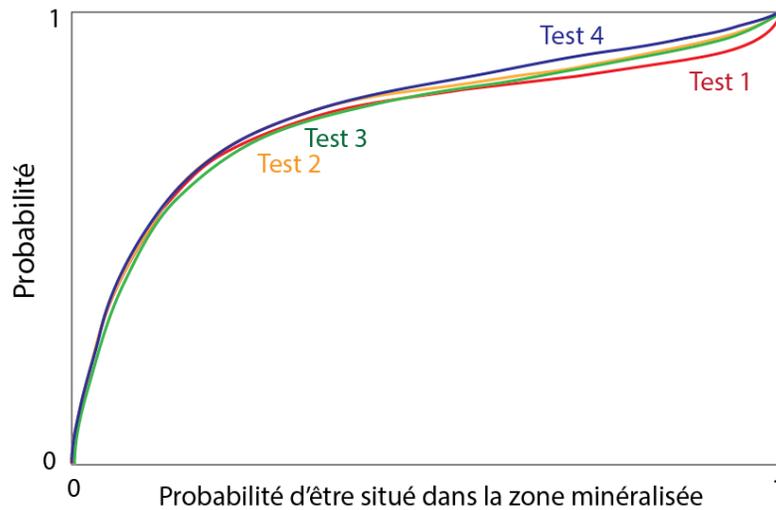


Figure 46 : Courbes de fonction de distribution cumulée des probabilités située dans une zone ayant une teneur de $P_2O_5 > 4\%$ pds, montrées pour les 4 tests.

4.6 Simulations et statistiques multipoints : données de Glencore

4.6.1 Présentation des données et extraction des forages

Les données utilisées correspondent à la base de données des forages effectués dans le camp de Matagami par Glencore. Seules de petites zones du camp ont été traitées dans le cadre de ce projet. L'extraction des forages depuis cette base de données, et leurs représentations avec le logiciel SGeMS, a été effectuée selon la procédure suivante :

1. Visualisation des forages sous Leapfrog® : sélection d'une zone densément forée pour les tests ;
2. Les étapes suivantes se font avec des routines Python (avec l'IDL Anaconda) :
 - a) Extraction des forages d'intérêt en fonction des coordonnées X_min, X_max, Y_min, Y_max de la position des trous (fichier « LF_Header »);
 - b) Faire des « composites » aux 5 m avec les données lithologiques ;
 - c) Correction des erreurs dans le fichier « LF_SURVEY.txt » (ajout de données d'arpentage au début et à la fin des trous si manquants);
 - d) Effectuer un desurvey des données (grâce au module PyGSLIB, qui utilise la technique *minimum curvature*) (Figure 47);
 - e) Exporter les coordonnées des points centraux des données de lithologies (portions de 5 m de longueur ou moins) et d'analyse de contrôle des teneurs (portions de 1 m de longueur en général);
 - e) Coder les données lithologiques (regrouper les lithologies et transformer les textes en chiffres entiers).
3. Visualisation des données avec le logiciel SGeMS.

```
55 import pandas as pd
56 import pygslib
57
58 #Import data
59 collar = pd.read_csv('COLLAR_Header.csv')
60 survey = pd.read_csv('SURVEY.csv')
61 assay = pd.read_csv('Assay.csv')
62 litho = pd.read_csv('Litho.csv')
63
64 #Create drillhole object
65 mydholedb = pygslib.drillhole.Drillhole(collar=collar, survey=survey)
66
67 #Add interval tables to it
68 mydholedb.addtable(assay, 'assay', overwrite = False)
69 mydholedb.addtable(litho, 'litho', overwrite = False)
70
71 #Desurveying (using minimum curvature)
72 mydholedb.desurvey('litho',warns=False, endpoints=True)
73 mydholedb.desurvey('assay',warns=False, endpoints=True)
74
75 #Exporting results
76 mydholedb.table["litho"].to_csv('Litho_OUT.csv', index=False)
77 mydholedb.table["assay"].to_csv('Assay_OUT.csv', index=False)
78
```

Figure 47 : Script ayant permis d'effectuer le « desurvey ». Notez qu'avec le module PyGslib, une ligne de code est suffisante pour effectuer l'opération (lignes 72-73).

4.6.2 Test 1 – Equinox

Le premier test a été effectué sur les données de forages qui documentent la minéralisation de la lentille de sulfures massifs Equinox (test 1 – Equinox). La procédure utilisée est la suivante :

1. Extraction des forages situés entre les coordonnées 298590-299510 m (x, UTM) et 5515040-5515960 m (y, UTM);
2. *Desurvey* et autres opérations avec des routines Pythons;
3. Pour ce premier test, les lithologies observées en forages ont été codées de la façon suivante : 1) SM et SSM ont reçu le code 1 ; et 2) toutes les autres lithologies ont reçu le code 0;
4. Sous-échantillonnage : le premier test a été effectué avec tous les forages (
5. Figure 48-a), les suivants ont été effectués avec une partie des forages seulement, ce qui a permis de tester différentes mailles de forages. La procédure utilisée pour la sélection des forages est présentée ci-dessous;
6. TI 3D : une image d’entraînement 3D a été confectionnée à partir du modèle conceptuel d’Equinox, qui a été produit par Glencore. La procédure pour cette opération est présentée ci-dessous. L’image d’entraînement est une grille contenant 56 * 33 * 39 blocs de 5 * 5 * 5 m et contient deux codes : 1) 1 pour la zone minéralisée ; et 2) 0 pour les stériles (
7. Figure 48-b);
8. Les forages et l’image d’entraînement ont ensuite été importés avec le logiciel SGeMS. Une grille contenant 66 * 38 * 46 blocs de 5*5*5 m a ensuite été créée pour recevoir le résultat des simulations;
9. Les simulations conditionnelles ont été effectuées avec la méthode FILTERSIM_cont, avec les paramètres reportés à la section 4.3.4 (avec Search_TD = [11 11 11] ; et Inner_PD = [7 7 7]). Chaque simulation a été effectuée 100 fois, et les résultats sont présentés grâce à un modèle de blocs qui contient la probabilité que chaque zone a d’être située à l’intérieur de la zone minéralisée.

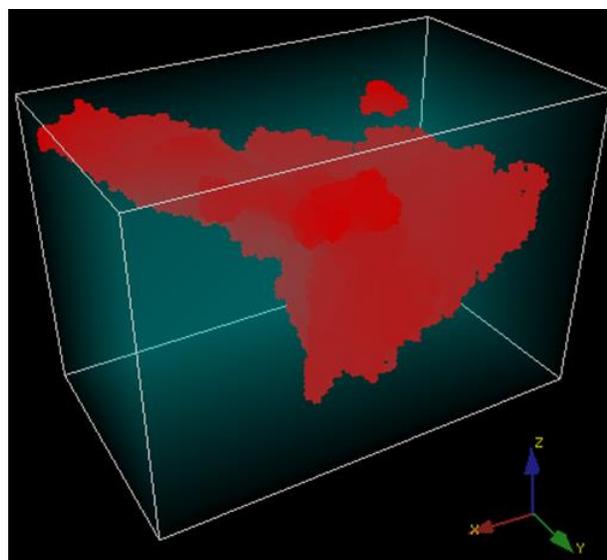
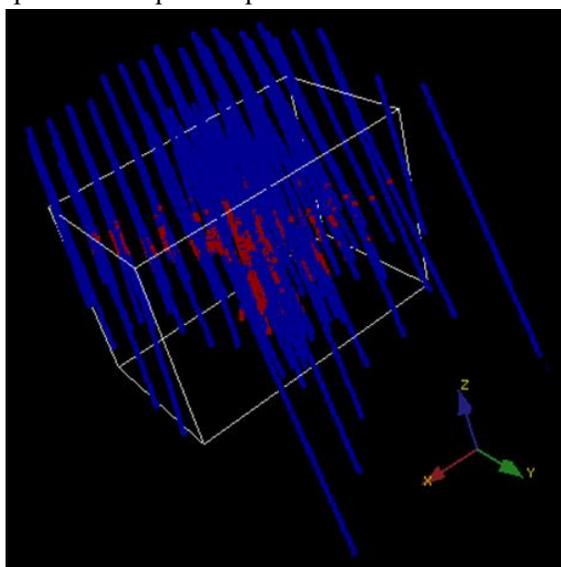


Figure 48 : a) Données lithologiques des forages documentant la lentille Equinox, avec les codes 1 (rouge – lentille de sulfures massifs) et 0 (bleu – autres lithologies); b) TI 3D confectionnées à partir du modèle conceptuel d’Equinox (seules les zones codées 1, en rouge, sont montrées).

Confection de la TI 3D : procédure I

La première procédure utilisée pour produire la TI a échoué parce que le modèle conceptuel disponible ne contient pas qu’un seul objet fermé, mais plusieurs, et qui ne sont pas tous fermés. Cette procédure est cependant présentée ici, car plus simple et plus efficace que celle qui a dû être utilisée dans le cas d’Equinox, et qui est présentée ci-après.

La procédure consiste à utiliser une fonctionnalité du module PyGSLIB. La première chose à faire est de convertir le modèle conceptuel (.dxf dans ce cas) dans un format que PyGSLIB peut lire (.stl et .vtp seulement). Pour ce faire, le logiciel MeshConv, disponible gratuitement sur le web, a été utilisé. Ce logiciel est un petit .exe qui s’utilise depuis la « prompt command » de Windows. Pour convertir le fichier « Equinox.dxf », utilisez la ligne de commande suivante, qui produit le fichier « Equinox_2.stl » :

«C:\Users > meshconv Equinox.dxf -c stl -tri -o Equinox_2 ».

L’opération suivante s’effectue avec une routine Python, qui utilise l’outil « blockmodel » de PyGSLIB pour remplir le modèle conceptuel de blocs (Figure 49).

```
8 import pygslib
9
10 domain=pygslib.vtktools.loadSTL('Equinox_2.stl')
11
12 #Define the GRID
13 xorg = 6600
14 yorg = 16600
15 zorg = 2740
16 dx = 5
17 dy = 5
18 dz = 5
19 nx = 58
20 ny = 60
21 nz = 40
22
23 #Create an empty block model
24 mymodel=pygslib.blockmodel.Blockmodel(nx,ny,nz,xorg,yorg,zorg,dx,dy,dz)
25
26 # filling wireframe with blocks, rename field created
27 mymodel.fillwireframe(domain)
28 mymodel.bmtable.rename(columns={'__in': 'D1'},inplace=True)
29
30 #Create partial model (blocs inside wireframe), and export it as .vtu and .csv
31 mymodel.set_blocks(mymodel.bmtable[mymodel.bmtable['D1']> 0])
32 mymodel.blocks2vtkUnstructuredGrid(path='model.vtu')
33 mymodel.bmtable.to_csv('Equinox_3.csv', index=False)
```

Figure 49 : Script permettant de créer un modèle de blocs à partir d’un modèle conceptuel.

Confection de la TI 3D : procédure II

Dans le cas d'Equinox, une routine Python a dû être développée pour remplir le modèle conceptuel de blocs de 5 * 5 * 5 m. Le principe de cette procédure est présenté pour un cas 2D, plus simple à visualiser, mais a été généralisé au cas 3D pour produire l'image d'entraînement désirée. La procédure, pour un cas 2D, est la suivante :

1. Exporter les points (« vertex ») de « Equinox.dxf » vers un fichier .csv. Cette opération peut être effectuée à partir de Leapfrog®, par exemple (ou ParaView, un logiciel gratuit). Pour le cas 2D, extraire une tranche de 5 m d'épaisseur, à partir des coordonnées (x) des points, afin d'obtenir une coupe YZ;
2. La suite s'effectue avec une routine Python. Le calcul s'effectue en 2 étapes (3 en 3D) : par tranches de (y), puis par tranches de (z). Pour chaque intervalle de 5 m dans la direction (y), le code cherche les valeurs minimales et maximales de (z) (Z_min et Z_max) et stock, dans une grille 2D, les données suivantes : 1) la valeur 1 est attribuée aux blocs de la grille située entre Z_min et Z_max; et 2) la valeur 0 pour les autres blocs. La procédure est ensuite répétée pour la direction (z), dans une autre grille, puis les grilles sont additionnées. Une fois l'addition effectuée, les blocs qui prennent la valeur 2 (ou 3, en 3D), sont ceux situés à l'intérieur du modèle conceptuel (Figure 50). Une correction est ensuite appliquée pour améliorer les résultats. La routine utilisée est disponible à l'ANNEXE IV;
3. Confection de l'image d'entraînement : les blocs identifiés comme étant situés dans le modèle conceptuel, grâce à la procédure décrite au point (2), se voient attribuer le code 1, et ceux situés en dehors prennent le code 0, ce qui permet de produire une image d'entraînement 3D (
4. Figure 48-b).

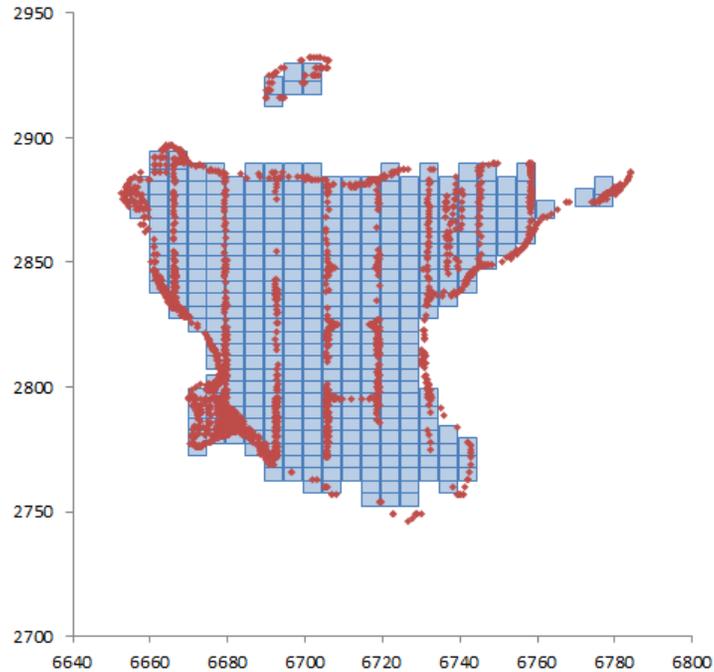


Figure 50 : Blocs (bleu) identifiés comme étant situés à l'intérieur du modèle conceptuel avec la procédure décrite dans le texte. Les points rouges correspondent aux « vertex » exportés depuis le fichier « Equinox.dxf » (pour une tranche de 5 m d'épaisseur dans la direction x).

Sous-échantillonnage des forages : procédure

La sélection d'une partie des forages, effectuée pour tester plusieurs mailles de forages, a été réalisée avec une routine Python qui fonctionne de la façon suivante :

1. Utilisation de la position, en coordonnées (x, y), de l'échantillon de forage situé à l'élévation maximale. Cette opération permet de ne conserver qu'un seul point par forage : ces points, auxquels le nom du forage est attaché, serviront à effectuer la sélection;
2. Dans le cas d'Equinox, les lignes de forages sont orientées N030 environ. Les points extraits à l'étape (1) ont été pivotés à l'aide d'une rotation de 30° autour de l'axe des z, dans le sens antihoraire;
3. Ensuite, l'espace a été mis en grille selon des pas en (x) et (y) (pasX et pasY) égaux. Ces pas correspondent à la maille de forage testée, et des pas de 20 m (similaires à la maille de forage utilisée par Glencore), 30 m, 40 m, 60 m, 80 m, et 100 m ont été testés;
4. Selon la grille utilisée : 1) tous les forages situés à l'intérieur d'un bloc de la grille sont sélectionnés; puis 2) l'un de ces forages est choisi au hasard (Figure 51). Comme une fonction *random* est utilisée, l'extraction a été répétée plusieurs fois, et ceci afin de tester chaque maille de forages à plusieurs reprises.

En tout, 20 tests ont été effectués pour tester les mailles de forages suivantes : 1) utilisation de tous les forages (n = 1 test) ; 2) mailles aux 20 m (n = 1) ; 3) mailles aux 30 m (n = 2) ; 4) mailles aux 40 m (n = 3) ; 5) mailles aux 60 m (n = 3); 6) mailles aux 80 m (n = 3); et 7) mailles aux 100 m (n = 7).

```

42 pasX, pasY = 60, 60
43 X2_max = np.max(Rotated_data[:,0]) + pasX
44 X2_min = np.min(Rotated_data[:,0])
45
46 Y2_max = np.max(Rotated_data[:,1]) + pasY
47 Y2_min = np.min(Rotated_data[:,1])
48
49 Selected_drill = []
50 for i in range(int(X2_min), int(X2_max), pasX):
51     for j in range(int(Y2_min), int(Y2_max), pasY):
52
53         Store = []
54         for D in Rotated_data:
55             if D[0] >= i and D[0] < (i+pasX) and D[1] >= j and D[1] < (j+pasY):
56                 Store.append(D)
57
58         Store = np.array(Store)
59
60         if len(Store) > 0:
61             if len(Store) == 1:
62                 Selected_drill.append([Store[0,0], Store[0,1], Store[0,2]])
63             else:
64                 n = int(np.random.rand() * len(Store))
65                 Selected_drill.append([Store[n,0], Store[n,1], Store[n,2]])
66
67 Selected_drill = np.array(Selected_drill)

```

Figure 51 : Script permettant d'extraire les forages selon diverses mailles de forages (extrait).

Résultats des différents tests / test 1 – Equinox

Le résultat des 20 tests effectués sur la lentille d'Equinox est présenté au Tableau 5 et à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les résultats montrent comment le volume de la zone la plus probablement minéralisée diminue lorsque la maille de forage augmente (ou lorsque la quantité de forages utilisée diminue).

Les résultats montrent également que même dans le meilleur des cas (mailles aux 20 m, avec tous les forages ou une partie d'entre eux), la zone ayant une probabilité > 80% d'être minéralisée correspond à environ la moitié du volume du modèle conceptuel (ligne grise sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Avec une maille aux 60 m, le volume de cette zone a diminué de moitié. Avec des mailles aux 80 et 100 m, les résultats deviennent chaotiques : certaines combinaisons de forages permettent une estimation d'une qualité légèrement moindre que celle obtenue avec une maille aux 60 m, alors que d'autres combinaisons produisent un résultat de très faible qualité.

Pour ce gisement et d'après ces tests, des mailles aux 80 et 100 m sont trop lâches. Celles aux 60 m produisent un résultat de meilleure qualité, mais pour lequel la zone qui est le plus probablement minéralisée est de petit volume (risque élevé). Le risque semble moindre avec une maille aux 40 m. Le risque est moins important avec des mailles aux 20 m et 30 m, qui sont quasiment équivalentes pour Equinox.

En comparant les résultats, convertis en tonnes à l'aide d'une valeur unique de densité (3,97 g/cm³ ;

Figure 53), aux ressources calculées par Noranda (Noranda, 2001), il est observé que ce qui a été classé comme ressource mesurée a le même volume que la zone ayant une probabilité ≥ 80% de se situer dans la zone minéralisée d'après les simulations conditionnelles, alors que les ressources indiquées + mesurées semblent avoir une probabilité ≥ 60% de se situer dans la zone minéralisée. Si on conserve ce type de

probabilité pour classer les ressources, le graphique montre le tonnage des ressources mesurées et indiquées qui peut être attendu si l'on utilise des mailles aux 40 m, 60 m, etc. (voir

Figure 53).

La forme des résultats obtenus a également été comparée. Puisqu'il est difficile de comparer, visuellement des formes 3D, les résultats sont comparés le long d'une coupe XZ réalisée pour $Y = 5515413,5 \pm 2,5\text{m}$ (ANNEXE V). Les coupes présentent le contour des blocs ayant une probabilité $> 70\%$ de se situer dans la zone minéralisée. Il est observé qu'avec des mailles aux 20 et 30 m, la forme obtenue avec tous les forages est quasiment reproduite. Les différences sont plus importantes, mais restent raisonnables avec une maille aux 40 m. Avec une maille aux 60 m, les différences sont très importantes, et les résultats deviennent chaotiques avec des mailles aux 80 et 100 m (voir ANNEXE V).

Tableau 5 : Résultats des tests effectués, présentés en quantité de blocs ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée. Pour obtenir le volume, multipliez les chiffres par 5 * 5 * 5.

Mailles	n forages		n blocs ayant une probabilité > m de se situer dans la zone minéralisée									
	n1*	n2*	m>0%	m>10%	m>20%	m>30%	m>40%	m>50%	m>60%	m>70%	m>80%	m>90%
Tous les forages**	121	83	94134	9656	3400	1377	832	577	651	604	837	3300
20 m	89	50	90367	11860	4650	2060	901	627	657	589	861	2796
30 m	62	38	89892	12856	4047	1889	1074	656	658	595	968	2733
30 m	64	39	90697	12399	3717	2073	965	747	781	632	960	2397
40 m	51	29	85671	17356	4587	1503	1032	751	780	640	1057	1991
40 m	47	29	87883	14363	4256	2173	1342	889	904	674	977	1907
40 m	49	29	84078	17057	5625	2276	1324	838	843	673	1039	1615
60 m	33	18	89414	14648	3984	1936	1107	748	732	545	960	1294
60 m	34	18	78556	23346	6123	2574	1404	868	650	490	633	724
60 m	34	18	81603	19087	6828	2838	1330	710	639	514	758	1061
80 m	24	13	76116	20061	6615	3445	2642	1778	1334	940	1203	1234
80 m	23	9	80174	22719	7718	2160	823	705	435	269	236	129
80 m	24	11	73366	26286	9322	3574	1363	632	406	166	138	115
100 m	19	12	75730	24697	7033	2351	1720	1054	783	551	717	732
100 m	18	11	79314	18281	5534	3870	2443	1777	1267	860	950	1072
100 m	18	10	68430	27712	9359	3971	2619	1738	813	306	235	185
100 m	19	10	78846	19629	5788	3712	2498	1431	974	715	830	945
100 m	19	10	68706	28951	8088	2994	2436	1794	968	640	492	299
100 m	19	8	73322	27213	8760	2370	1306	916	657	318	314	192
100 m	19	10	71081	29240	8236	3457	1716	861	411	170	114	82
TI 3D			65265									6807

*n1 : n forages utilisés pour effectuer un test.

*n2 : parmi les forages utilisés, forages qui recourent la minéralisation.

**Tous les forages : maille aux 20 m environ.

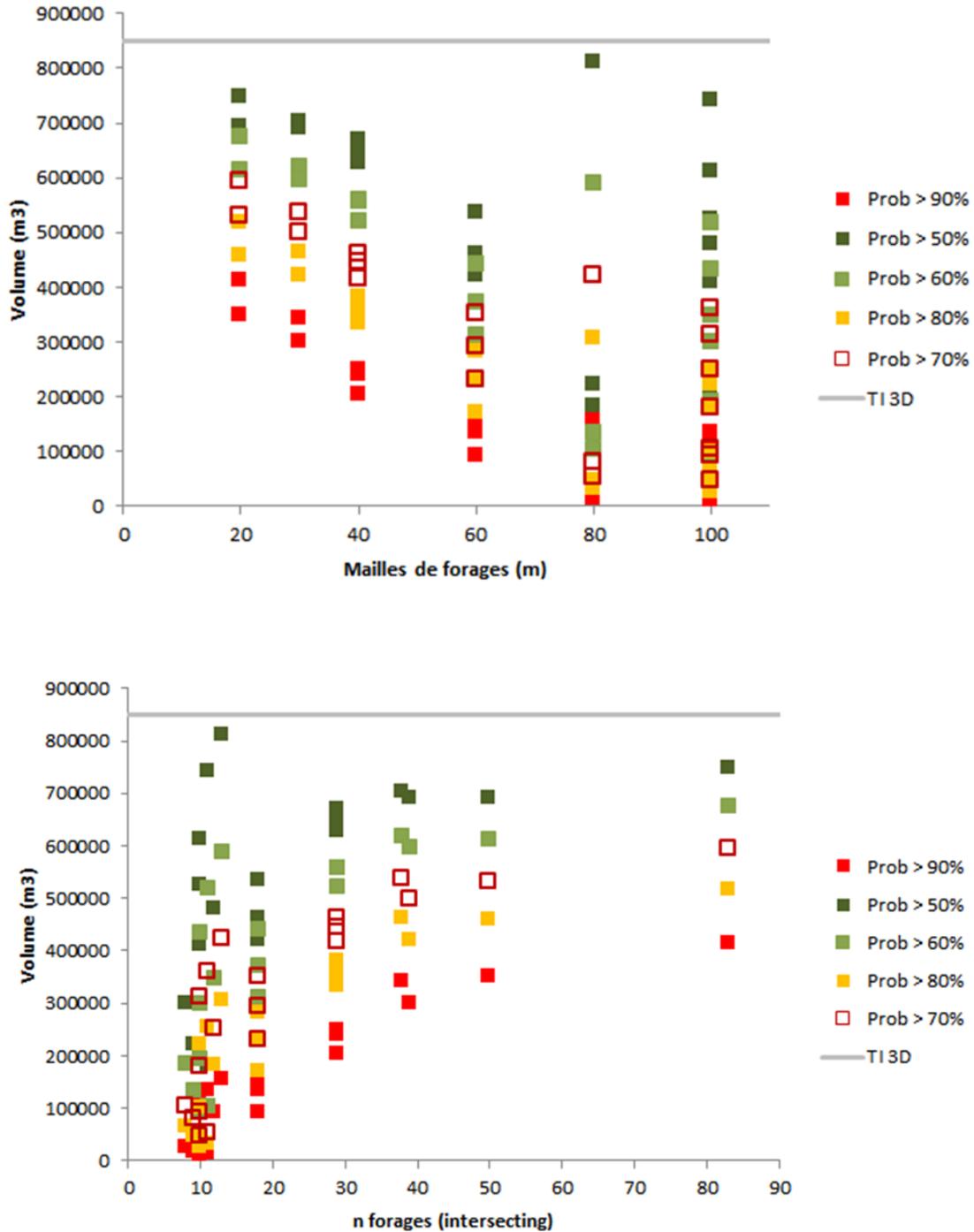


Figure 52 : Résultats des 20 tests. Les graphiques montrent le volume des blocs ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée en fonction des mailles de forages testées (a) et en fonction de la quantité de forages ayant intersectés la minéralisation utilisée pour chaque test (b).

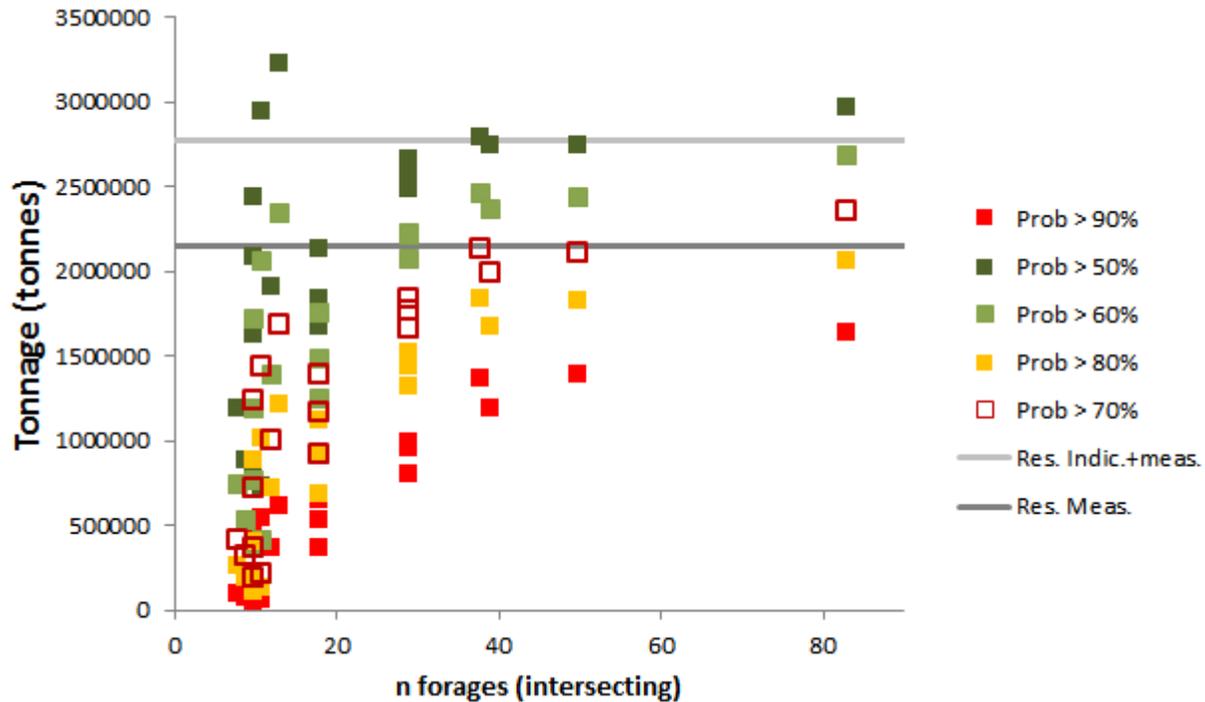


Figure 53 : Résultats des 20 tests. Les graphiques montrent le poids (tonnages calculés avec une valeur unique de densité = 3,97 g/cm³) ayant diverses probabilités de se situer dans la zone minéralisée en fonction de la quantité de forages (utilisés pour chaque test) ayant intersectés la minéralisation. Les résultats sont comparés aux ressources indiquées et mesurées (estimé de Noranda 2001).

4.6.3 Test 2 – Bracemac Key tuffite – Forages de surface

Le test 2, effectué sur la lentille de sulfures massifs de Bracemac Key Tuffite, est similaire au test présenté à la section précédente. Pour cette lentille, tous les forages dont le point de départ est situé à > 200 m de profondeur (forages effectués sous terre) ont été retirés de la base de données, ce qui permet de concentrer l'étude sur les forages ayant été effectués depuis la surface (c.-à-d. avant l'initiation des opérations de minage).

Les paramètres du test 2 sont les suivants :

1. Extraction des forages situés entre les coordonnées 307323-307755 m (x, UTM) et 5506007-5506310 m (y, UTM);
2. *Desurvey* et autres opérations avec des routines Pythons (voir section précédente);
3. Les lithologies observées en forages ont été codées de la façon suivante : 1) *SM* et *SSM* ont reçu le code 1 ; et 2) toutes les autres lithologies ont reçu le code 0;
4. Sous-échantillonnage : idem (voir section précédente, et précisions apportées ci-dessous);

5. Image d'entraînement 3D (voir ci-dessous). Les diverses images d'entraînement utilisées sont des grilles contenant 46 * 68 * 80 blocs de 5 * 5 * 5 m, avec une origine située à (307464, 5506045, -327,747).
6. Les forages et les images d'entraînement ont ensuite été importés avec le logiciel SGeMS. Une grille contenant 40 * 47 * 66 blocs de 5 * 5 * 5 m, avec une origine située à (307479, 5506146, -237), a ensuite été créée pour recevoir le résultat des simulations.
7. Les simulations conditionnelles ont été effectuées avec la méthode *FILTERSIM_cont*, avec les paramètres reportés à la section 4.3.4 (avec *Search_TD* = [11 11 11] ; et *Inner_PD* = [7 7 7]). Chaque simulation a été effectuée 100 fois, et les résultats sont présentés grâce à un modèle de blocs qui contient la probabilité que chaque zone d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée.

Préparation des données de forages

Comme indiqué ci-dessus, pour le test 2, seuls les forages ayant été faits depuis la surface sont considérés. Ces forages sont au nombre de 105, dont 56 ont intersecté des sulfures massifs.

Les données lithologiques ont été codées de deux façons : 1) sulfures massifs (SM, = 1) et autres roches (= 0) ; et 2) sulfures massifs (SM, = 2), altérations (PIPE, KT = 1) et autres roches (= 0).

Comme pour la section précédente, des composites aux 5 m ont ensuite été utilisés pour subdiviser les zones observées en forage, et le point central de ces composites a ensuite été exporté pour être utilisable par la modélisation. Pour une partie des tests, des composites aux 1 m, pour les zones à sulfures massifs uniquement (et aux 5 m pour les autres lithologies), ont été utilisés. Ces composites permettent de plus précisément localiser les zones à sulfures massifs.

Aussi, pour une partie des tests, les lithologies observées en forages ont été utilisées directement. Pour d'autres tests, ces lithologies ont été modifiées de la façon suivante : 1) lorsque > 2 zones de sulfures massifs étaient présentes et étaient proches dans l'espace, ces zones ont été reliées ; et 2) lorsque les altérations ont également été modélisées, une procédure similaire a été appliquée. Ces modifications ont permis de produire des zones plus continues. Elles permettent d'enlever une partie des variations locales et facilitent la modélisation d'une zone minéralisée relativement continue. Un exemple du type de modification apportée est présenté par la figure (Figure 54).

Confection des images d'entraînement

Divers types d'images d'entraînement ont été utilisées. Ces images ont été confectionnées soit à partir de modèles conceptuels existants (wireframe), suivant la procédure II décrite à la section précédente, soit à partir de Leapfrog®. Le modèle conceptuel utilisé à ce stade correspond au modèle conceptuel_I, qui est le modèle produit en 2010 pour les besoins de l'étude de faisabilité (GENIVAR 2010). Ce modèle a été obtenu avec le logiciel Gemcom et a permis d'effectuer le calcul des ressources sur la lentille de Bracemac KT. La zone modélisée, qui représente la zone de sulfures massifs, a un volume de 310 170 m³.

Pour obtenir une image d'entraînement des zones à sulfures massifs à partir de Leapfrog®, la procédure suivante a été utilisée :

- La position du début et de la fin des intervalles de sulfures massifs (S1 et S2, Figure 54) a été identifiée à partir des données de forage;
- La position de ces contacts a ensuite été importée comme points sous Leapfrog®. La fonction RBF de Leapfrog® a ensuite été utilisée pour dessiner deux surfaces à partir de ces points;
- Ensuite, l'espace compris entre deux surfaces a été comblé par des blocs de 5 * 5 * 5m sous Leapfrog®. Ces blocs correspondent à la zone minéralisée des images d'entraînement. Ces blocs ont reçu le code 1, et les blocs situés dans le reste des images ont reçu le code 0.

X	Y	Z	Fo_Obs	Fo_Modif	CONTACT
307604.4	5506374	28.96019	1	1	A1
307604	5506373	31.62631	0	1	
307603.5	5506373	34.27651	0	1	
307603	5506372	37.37873	0	1	
307602.6	5506371	39.98311	0	1	
307602.1	5506370	43.18672	0	1	
307601.6	5506370	46.22299	0	1	
307601.4	5506369	47.514	2	2	S1
307601.2	5506369	48.86239	1	2	
307600.7	5506368	51.95604	1	2	
307600.3	5506367	54.70541	2	2	
307600.1	5506367	55.93905	2	2	
307599.9	5506367	57.24918	2	2	
307599.6	5506366	58.55454	1	2	
307599.4	5506366	59.81686	1	2	
307599.3	5506366	60.61538	2	2	S2
307599.2	5506366	61.49996	1	1	A2
307598.7	5506365	64.22543	0	0	
307598	5506364	68.8635	0	0	
307597.6	5506363	71.27817	0	0	
307597.2	5506362	73.69284	0	0	
307596.5	5506361	78.47437	0	0	
307595.8	5506360	82.80165	0	0	
307595.1	5506359	87.12893	0	0	
307594.7	5506358	89.56272	0	0	
307594.3	5506358	91.99652	0	0	
307593.8	5506357	95.4679	0	0	

Figure 54 : Exemple de modifications effectuées sur les données de forages. « Fo_Obs » correspond aux lithologies observées en forage, et « Fo_Modif » montre le résultat d'une modification apportée à ces données. La colonne « contact » correspond aux contacts utilisés pour confectionner des images d'entraînement sous Leapfrog® (voir section suivante).

Aussi, une partie des images d'entraînement ne contient que deux codes (1 pour les zones minéralisées, et 0 pour les autres roches), alors que d'autres contiennent un code supplémentaire pour désigner la zone altérée (lithologies PIPE et KT vue en forage). Ces zones altérées ont été dessinées sous Leapfrog®, à partir des contacts A1 et A2 (Figure 54), selon la même procédure que celle utilisée pour modéliser la zone minéralisée.

Les images d'entraînement utilisées sont les suivantes (Figure 55) :

- TI01 : codes 0 et 1 – confectionnée à partir du modèle conceptuel_I de Glencore;
- TI02 : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir du modèle conceptuel_I de Glencore et des zones altérées vues en forage;
- TI03 : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir des zones minéralisées et des zones altérées vues en forage;
- TI04 : codes 0 et 1 – confectionnée à partir des zones minéralisées vues en forage.

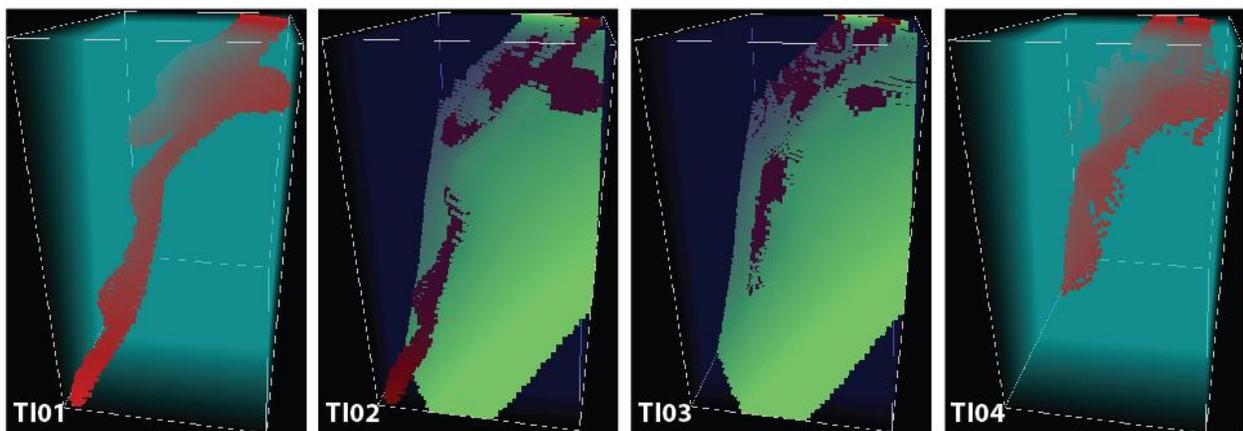


Figure 55 : Vues des diverses images d'entraînements utilisées. Les zones minéralisées sont représentées en rouge, les zones altérées en verts, et les autres types de roches sont représentés en bleu.

Tests effectués

Les tests effectués sont résumés au Tableau 6 et leurs résultats sont présentés aux **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et 57.

Les résultats des divers tests ont été comparés au modèle conceptuel final de la lentille minéralisée (désigné modèle conceptuel_II). Ce modèle délimite la position des sulfures massifs, et a été mis à jour en 2016 à partir de toutes les informations recueillies à ce jour pendant les opérations de minage.

Tableau 6 : Caractéristiques des tests effectués.

Test	Composites	Lithologies	TI
Test 7_1	Aux 5 m	Observées	TI01
Test 7_2	Aux 5 m	Modifiées	TI01
Test 7_3	Aux 5 m	Modifiées	TI01
Test 8_1	Aux 5 m	Observées	TI02
Test 8_2	Aux 5 m	Modifiées	TI02
Test 8_3	Aux 5 m, et 1 m pour les sulfures massifs	Modifiées	TI02
Test 8_4	Aux 5 m, et 1 m pour les sulfures massifs	Observées	TI02
Test 8_5	Aux 5 m, et 1 m pour les sulfures massifs	Modifiées	TI03
Test 8_6	Aux 5 m, et 1 m pour les sulfures massifs	Observées	TI03
Test 8_7	Aux 5 m, et 1 m pour les sulfures massifs	Modifiées	TI04

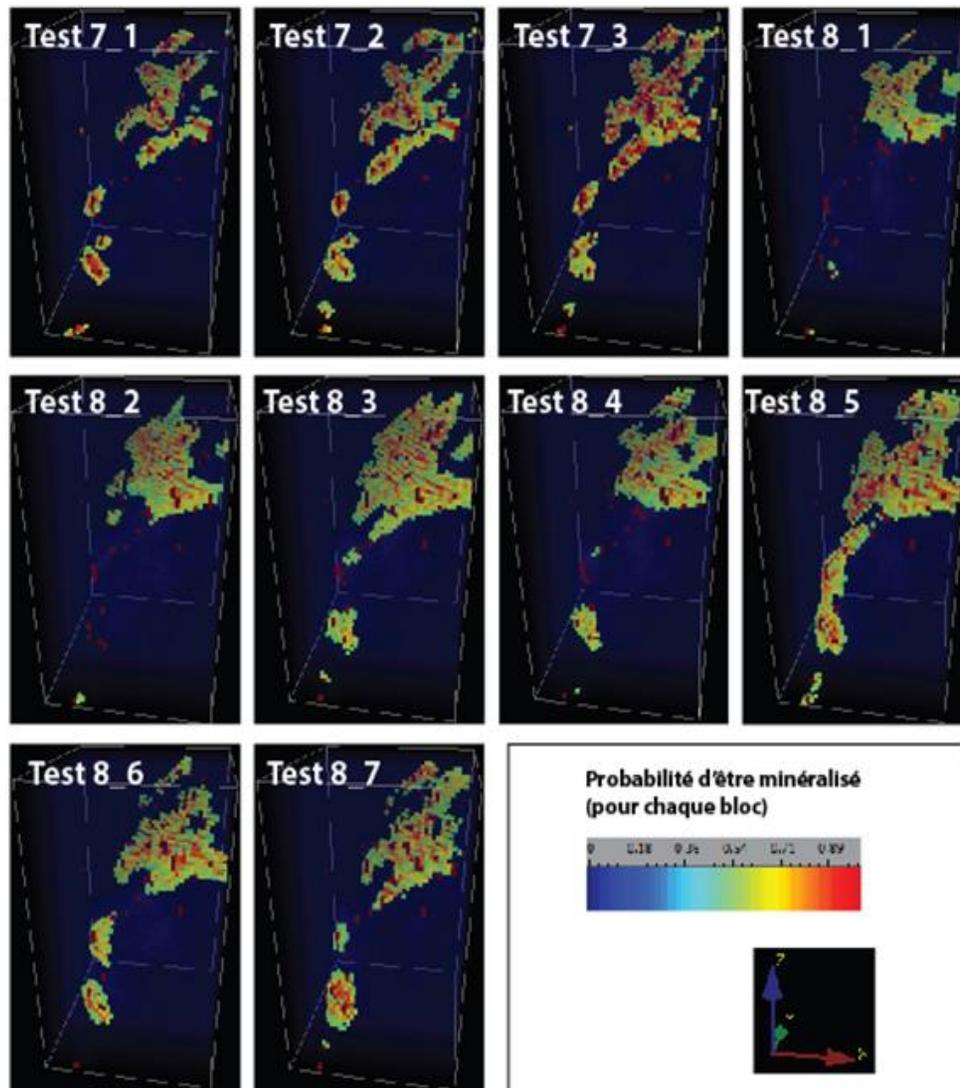


Figure 56 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est $> 0,5$ (50%) sont montrés.

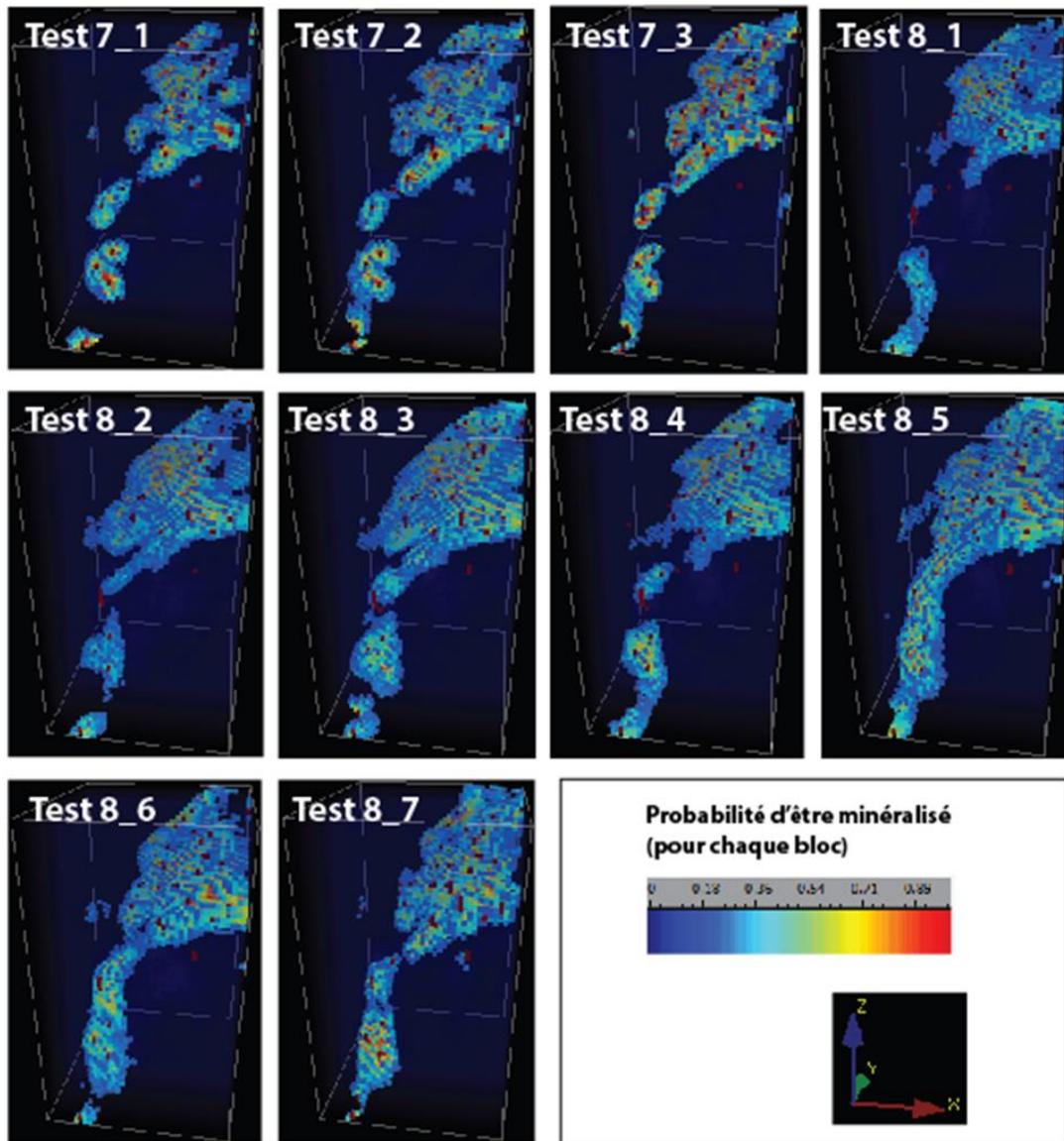


Figure 57 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d’être située à l’intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d’être minéralisé est $> 0,2$ (20%) sont montrés.

Résultats des tests effectués

Les résultats des tests sont présentés aux Figure 58 et Figure 59 et montrent le volume des zones ayant une certaine probabilité d'être minéralisées versus le volume du modèle conceptuel_II (ligne noire sur les figures), uniquement pour la partie située à l'intérieur de la zone considérée par la modélisation.

Ces figures montrent que les résultats sont améliorés lorsque l'on modifie les lithologies observées en forages, et lorsqu'on localise plus précisément la zone minéralisée par l'utilisation de composites aux 5 et 1 m (Figure 58). Aussi, notez que le volume du modèle conceptuel_II n'est approché que pour des probabilités d'environ 0,2 (voir 0,3 pour les meilleurs modèles) d'être minéralisé. Cette faible probabilité est probablement due au fait que la zone minéralisée est fine, ayant parfois une épaisseur < 5 m, et que l'on tente de la modéliser avec une grille contenant des blocs de 5 * 5 * 5 m. La simulation conditionnelle semble avoir de la difficulté à bien positionner cette zone minéralisée, et hésite possiblement entre un bloc et un autre à divers endroits. Ainsi, pour cette lentille de sulfures massifs, une probabilité > 0,2 ou 0,3 d'être minéralisé doit être considéré comme une probabilité élevée d'être situé dans la zone minéralisée.

La Figure 59 montre que les moins bons résultats sont obtenus avec TI01 et TI04, c.-à-d. les images d'entraînement pour lesquelles seules les zones minéralisées ont été modélisées. Aussi, l'utilisation d'une zone de sulfures massifs redessinée sous Leapfrog® produit de meilleurs résultats que de confectonner cette zone à partir du modèle conceptuel_I de Glencore. Possiblement que ce dernier est trop interprété, alors que la zone dessinée rapidement sous Leapfrog® semble mieux respecter les données de forages et représente possiblement mieux leurs statistiques.

La Figure 59 montre également que les meilleurs résultats sont obtenus avec TI02 et TI03, c.-à-d. les images d'entraînement pour lesquelles les zones minéralisées et les zones altérées ont été modélisées. Ainsi, il semble que la modélisation de la zone altérée guide le modèle et lui permette de mieux prédire la position de la zone minéralisée. La zone altérée ajoute des paramètres au modèle et, comme elle est spatialement associée aux sulfures massifs, permet d'améliorer la modélisation de ces derniers.

Afin de mieux exploiter le résultat des tests, la grille regroupant les probabilités que chaque bloc a d'être minéralisé a été comparée à la portion du modèle conceptuel_II située dans la zone considérée par la modélisation. Pour ce faire, il a été converti en grille contenant des blocs de 5 * 5 * 5 m à l'intérieur de chaque bloc. Le pourcentage de surface réellement occupée par le modèle a été exprimé par un chiffre allant de 0 à 100 % (Figure 60). Ensuite, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 10), les valeurs des blocs dérivés du modèle conceptuel_II, et situés au même endroit que les blocs d'un intervalle de probabilité donné, ont été additionnés puis divisées par le nombre de blocs additionnés, afin d'obtenir les pourcentages montrés par les axes "Y" des Figure 61 et 62.

Le modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II a également été comparé aux résultats des simulations conditionnelles, bloc par bloc, grâce à un calcul d'erreur classique ($\text{erreur} = [\sum \text{abs}(\text{Bloc_modèle conceptuel_II} - \text{Bloc_simulé}) / \text{Bloc_modèle conceptuel_II} * 100] / n_{\text{blocs}}$). Les résultats (Tableau 7) indiquent que les tests produisent des résultats satisfaisants et similaires.

Le graphique de la Figure 61 montre que plus la probabilité d'être minéralisé est élevée, plus la quantité de blocs situés dans le modèle conceptuel_II augmente. Ceci indique que la zone modélisée est bien positionnée dans l'espace, car elle couvre environ la même zone que celle occupée par le modèle conceptuel_II. La Figure 61 montre également que les tests effectués avec divers types de données de forage présentent des résultats relativement similaires. La Figure 62 montre que les tests effectués avec la TI01 produisent les moins bons résultats, et que les meilleurs résultats sont obtenus avec les autres types de IE.

Il en ressort également que le meilleur résultat est obtenu pour le Test 8_5, qui utilise des forages avec lithologies modifiées et des composites aux 1&5m, et une IE confectionnée sous Leapfrog® et qui représente les zones minéralisées et altérées. Ce type de test étant le plus performant, des tests similaires seront effectués dans la section suivante (« Test 3 »), à partir de divers jeux de données de forage.

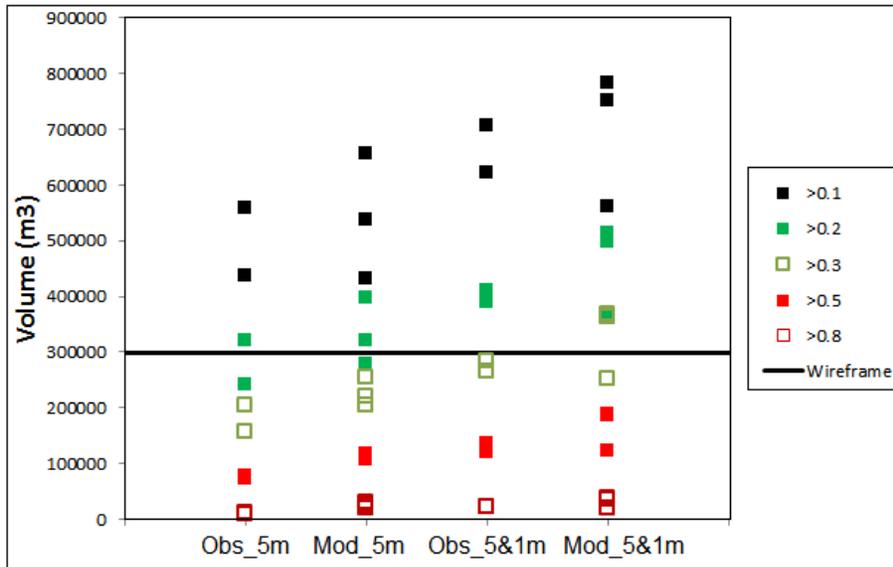


Figure 58 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multiplié par 5 * 5 * 5) de chaque zone ayant une probabilité > 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, ou 0,8 d’être minéralisé sont reportés sur le graphique. Les tests sont regroupés en fonction du type de jeu de données de forage (observés ou modifiés, avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.

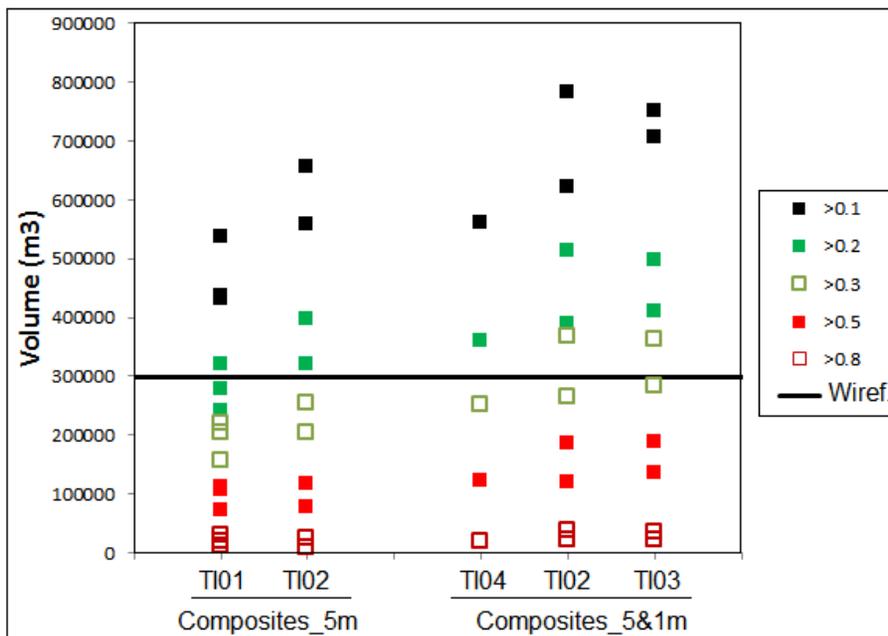


Figure 59 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multiplié par 5 * 5 * 5) de chaque zone ayant une probabilité de valeur supérieure à 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, ou 0,8 d’être minéralisée, sont reportés sur le graphique. Les tests sont regroupés en fonction du type d’image d’entraînement et de forages (avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.

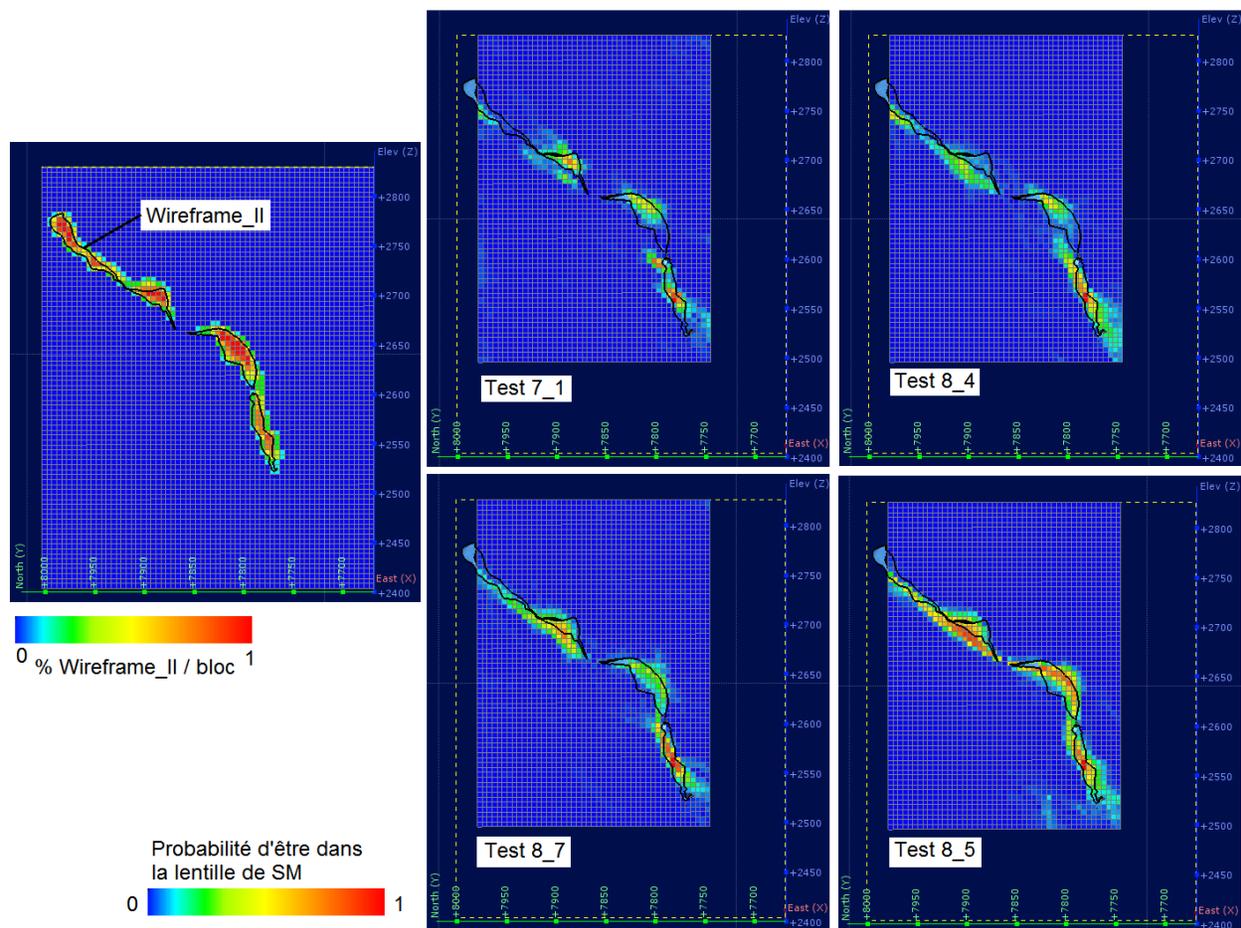


Figure 60 : Coupes au travers des modèles de blocs suivants : à droite, modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II ; et à gauche (4 coupes), résultats des divers tests (pour une vue en 3D de ces modèles de blocs, voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et Figure 57.

Tableau 7 : Caractéristiques des tests effectués et erreurs générales.

Test	Composites	Lithologies	IE	Erreur
Test 7_1	Aux 5 m	Observées	TI01	4.26
Test 7_2	Aux 5 m	Modifiées	TI01	4.51
Test 7_3	Aux 5 m	Modifiées	TI01	4.86
Test 8_1	Aux 5 m	Observées	TI02	4.46
Test 8_2	Aux 5 m	Modifiées	TI02	4.74
Test 8_3	Aux 5 m & 1 m	Modifiées	TI02	4.22
Test 8_4	Aux 5 m & 1 m	Observées	TI02	4.31
Test 8_5	Aux 5 m & 1 m	Modifiées	TI03	4.60
Test 8_6	Aux 5 m & 1 m	Observées	TI03	4.71
Test 8_7	Aux 5 m & 1 m	Modifiées	TI04	5.00

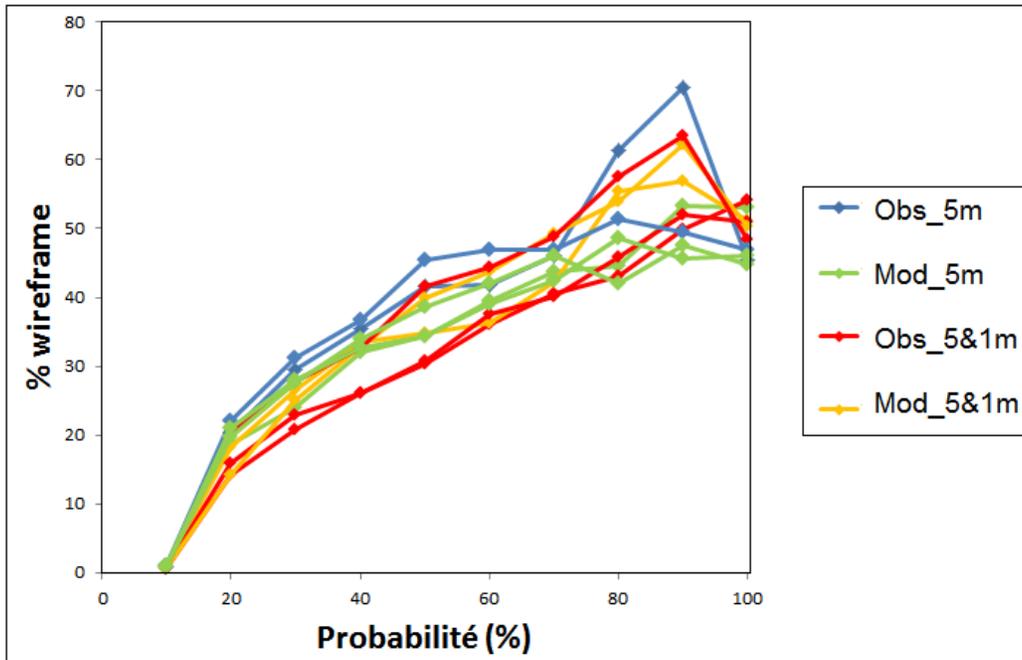


Figure 61 : Résultats des divers tests. La surface occupée par les blocs simulés, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 0,1) [axes des X], est comparée au pourcentage de cette surface réellement occupée par la lentille minéralisée (représentée par le modèle conceptuel_II) [axes des Y]. Les tests sont regroupés en fonction du type d'IE et de forages (avec composites aux 5 m ou aux 5 et 1 m) utilisés.

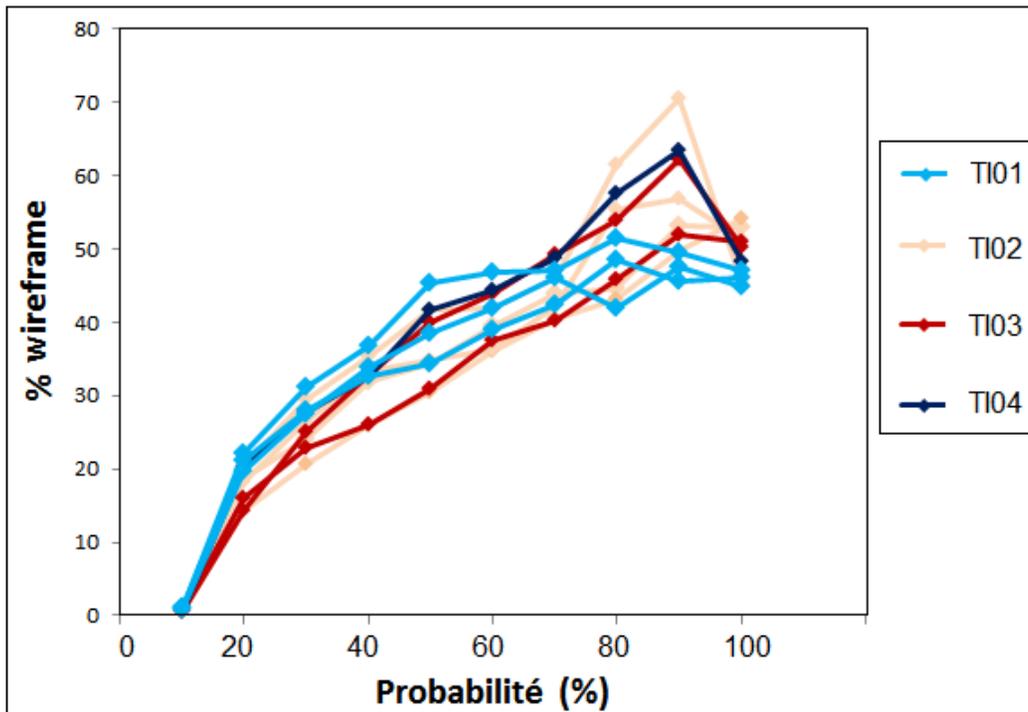


Figure 62 : Résultats des divers tests (idem à Figure 61). Les tests sont regroupés en fonction du type d'IE utilisé.

4.6.4 Test 3 – Bracemac Key tuffite – Divers jeux de forages

Le test 3, effectué sur la lentille de sulfures massifs de Bracemac Key Tuffite, a été effectué à partir des mêmes paramètres que le test 2 (voir section précédente). La seule différence correspond aux quantités de forages utilisés.

Préparation des données de forages

Les modélisations ont été effectuées avec les forages suivants :

- **Fo_2007** : Forages qui étaient disponibles en 2007 (dont le nom commence par BRC-07, BRC-04, BRC-95, BRC-92, ou BRC-86). Ces forages sont au nombre de 28, dont 10 ont intersecté les sulfures massifs;
- **Fo_2008** : Forages qui étaient disponibles en 2008 (Fo_2007 et forages dont le nom commence par BRC-08). Ces forages sont au nombre de 28, dont 10 ont intersecté les sulfures massifs;
- **Fo_surface** : Forages effectués à partir de la surface. Ces forages correspondent à ceux utilisés pour effectuer le test 2. Dans cette section, seuls les résultats des tests 8_5 et 8_6 seront présentés, pour comparaison. Ces forages sont au nombre de 105, dont 56 ont intersecté les sulfures massifs;
- **Fo_all** : Forages effectués à partir de la surface et sous terre, pour mieux définir la ressource. Ces forages sont au nombre de 352, dont 166 ont intersecté les sulfures massifs.

Les mailles de ces différents jeux de données sont les suivantes (Figure 63) :

- **Fo_2007** : les forages sont assez dispersés. Le long de la ligne de forages, la distance entre les trous est de 20 à 50 m environ. Ailleurs, la distance entre les trous est le plus souvent de 40, 50, voir 70 m (maille aux 40-50 m environ);
- **Fo_2008** : les distances entre les forages sont assez similaires à celles des Fo_2007. Pour ce jeu de données, des forages ont été ajoutés au nord de la zone minéralisée ;
- **Fo_surface** : la distance entre les forages varie de 15 à 60 m environ, et est souvent comprise entre 20 et 30 m (maille aux 20-30 m environ);
- **Fo_all** : maille difficile à estimer, car ces forages sont courts et ont divers points de départ. La lentille minéralisée est traversée par ces forages tous les 10-30 m (maille aux 20 m environ).

Confection des IE

Diverses images d'entraînement ont été utilisées, qui modélisent toute la zone de sulfures massifs et la zone altérée. Ces zones ont toutes été modélisées sous Leapfrog® (voir test2 pour le détail des manipulations effectuées).

Les IE utilisées sont les suivantes (Figure 64) :

- **TI03** : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir des zones minéralisées et altérées vues en forage (Fo_surface) ;
- **TI05** : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir des zones minéralisées et altérées vues en forage (Fo_2007) ;

- **TI06** : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir des zones minéralisées et altérées vues en forage (Fo_2008) ;
- **TI07** : codes 0, 1, et 2 – confectionnée à partir des zones minéralisées et altérées vues en forage (Fo_all) ;

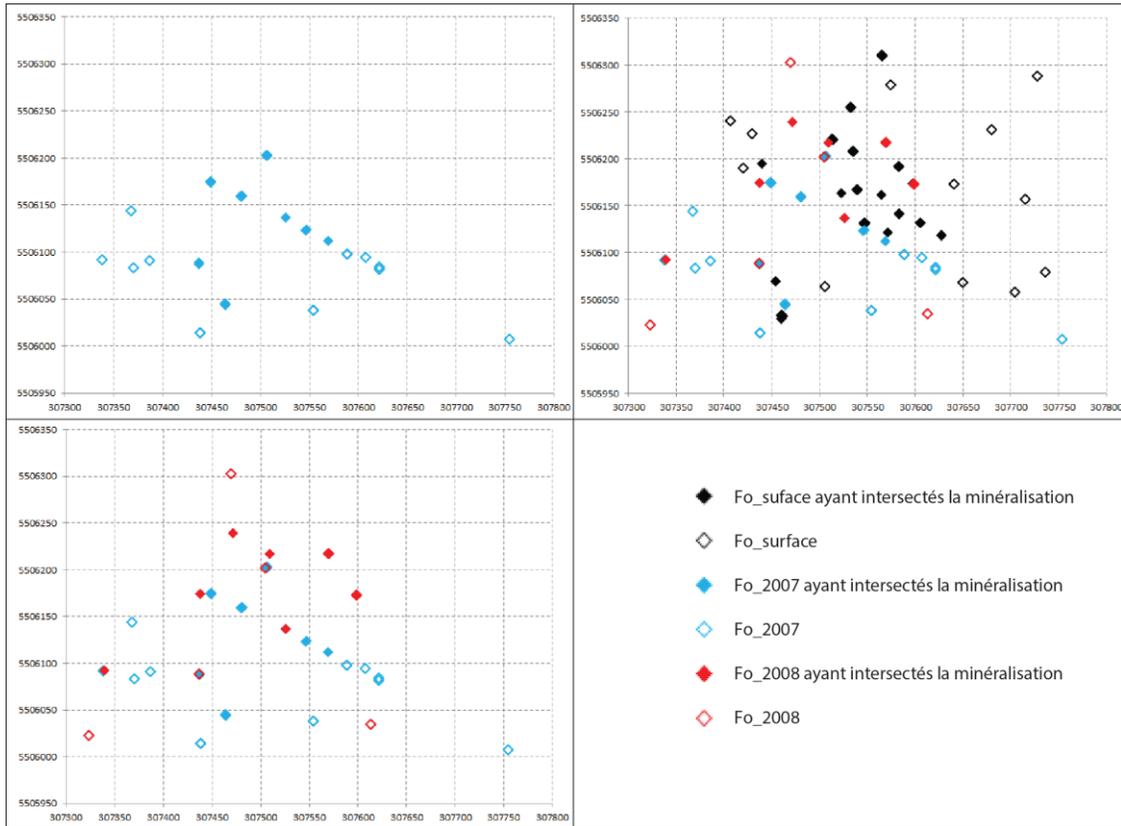


Figure 63 : Position, en plan (coordonnées UTM18, NAD83), des colliers des forages utilisés pour effectuer les tests présentés dans cette section.

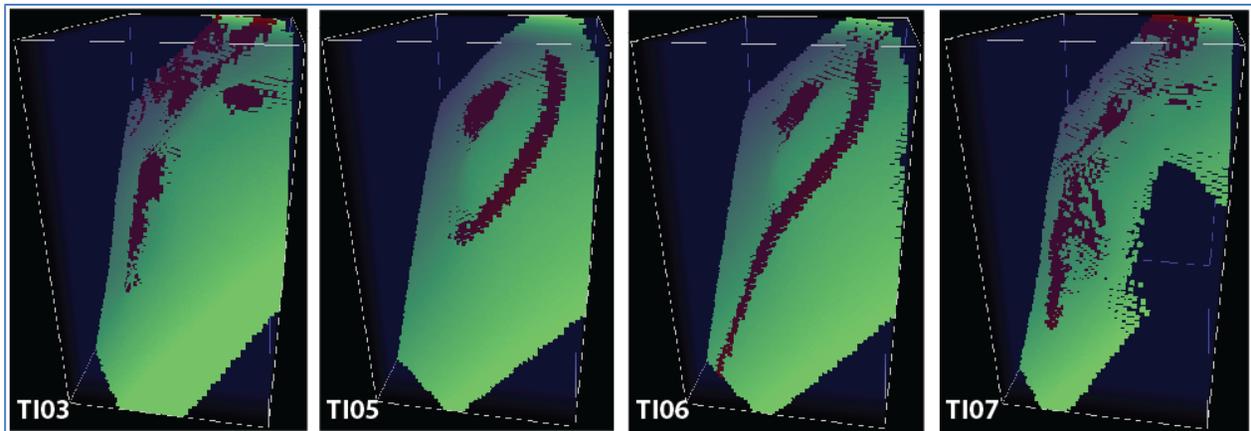


Figure 64 : Vues des diverses images d'entraînement utilisées. Les zones minéralisées sont représentées en rouge, les zones altérées en verts, et les autres types de roches sont représentés en transparence.

Tests effectués

Les tests effectués sont résumés au Tableau 8 et leurs résultats sont présentés aux Figure 65 et Figure 66.

Les résultats des divers tests ont été comparés au modèle conceptuel final de la mine (désigné modèle conceptuel_II). Ce modèle conceptuel délimite la position des sulfures massifs et a été mis à jour en 2016 à partir de toutes les informations recueillies à ce jour pendant les opérations de minage.

Tableau 8 : Caractéristiques des tests effectués.

Test	Forages	Composites	Lithologies	IE
Test 8_5	Fo_surface	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI03
Test 8_6	Fo_surface	Aux 5 m & 1m	Observées	TI03
Test 8_8	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Observées	TI03
Test 8_9	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI03
Test 9_1	Fo_2007	Aux 5 m & 1m	Observées	TI05
Test 9_2	Fo_2007	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI05
Test 9_3	Fo_2008	Aux 5 m & 1m	Observées	TI06
Test 9_4	Fo_2008	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI06
Test 9_5	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Observées	TI07
Test 9_6	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI07

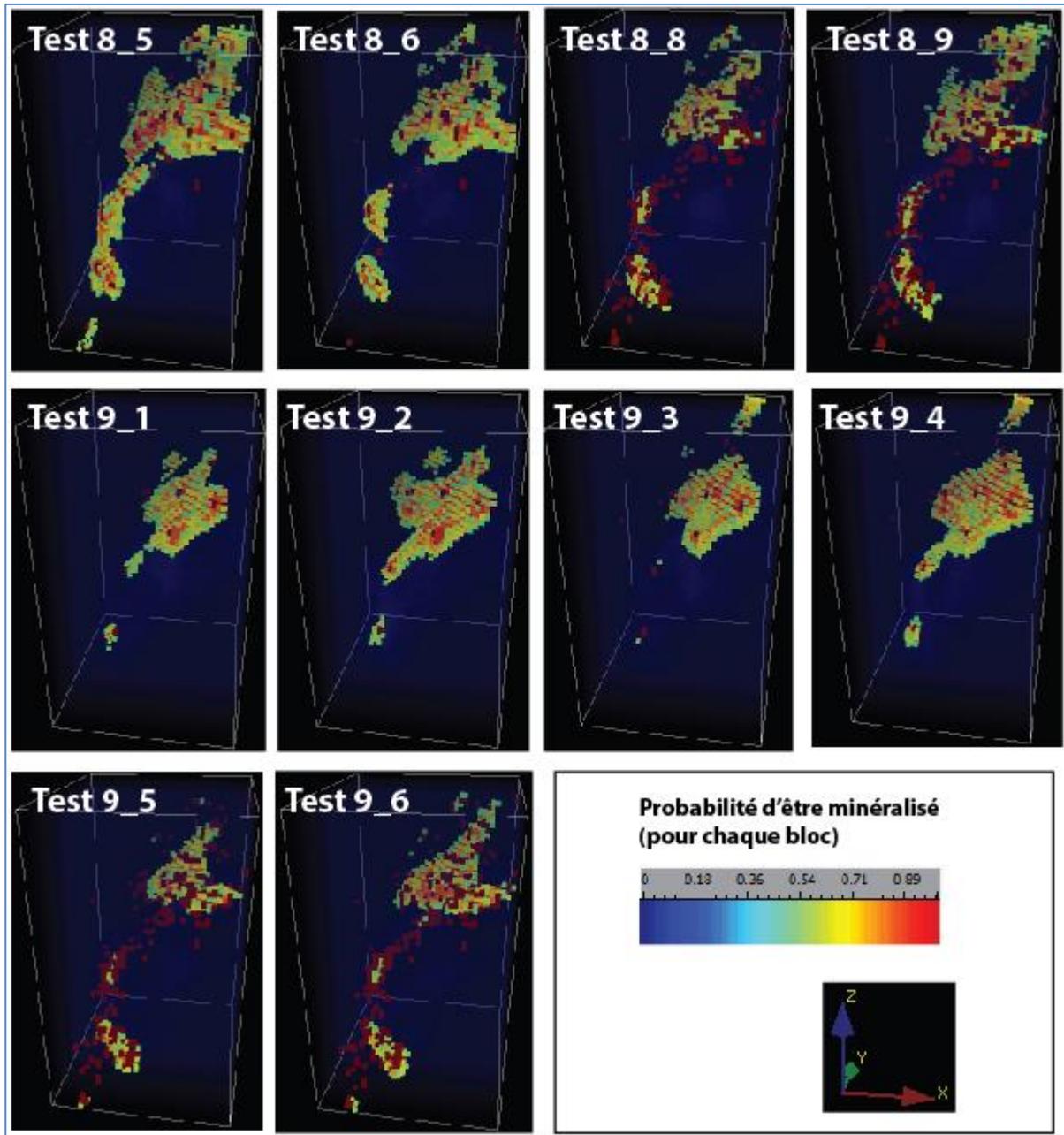


Figure 65 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est $> 0,5$ (50%) sont montrés.

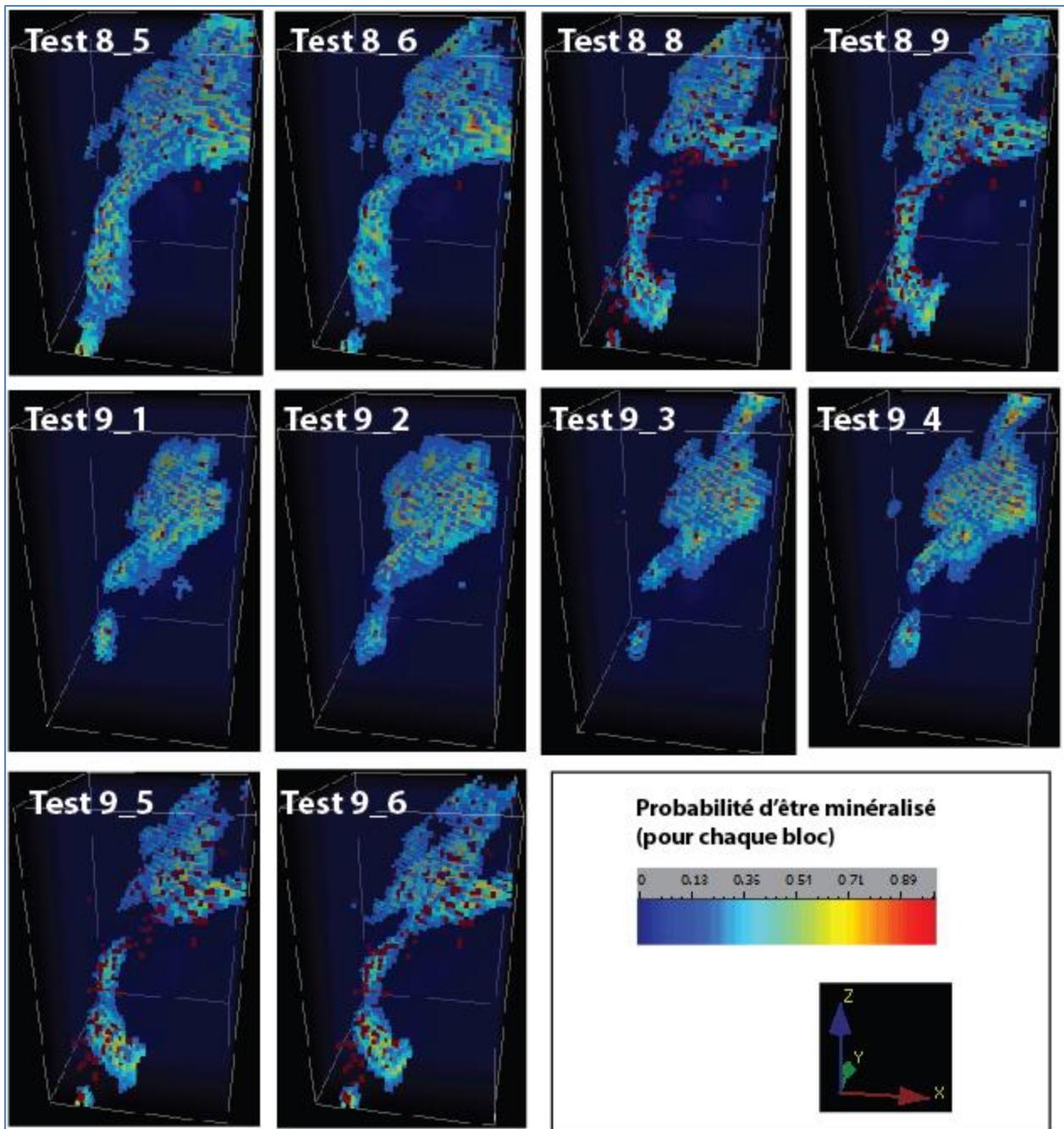


Figure 66 : Résultats des divers tests, montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être située à l'intérieur de la zone minéralisée. Seuls les blocs dont la probabilité d'être minéralisé est $> 0,2$ (20%) sont montrés.

Résultats des tests effectués

Les résultats des tests présentés à la Figure 68, montrent le volume des zones ayant une certaine probabilité d'être minéralisées versus le volume du modèle conceptuel_II (ligne noire sur les figures), pour la partie de ce dernier qui est situé uniquement à l'intérieur de la zone modélisée.

Afin de mieux exploiter le résultat des tests, la grille regroupant les probabilités que chaque bloc a d'être minéralisé a été comparée à la portion du modèle conceptuel_II située dans la zone considérée par la modélisation. Pour ce faire, le modèle a été converti en grille contenant des blocs de 5 * 5 * 5 m, à l'intérieur de chaque bloc, le pourcentage de surface réellement occupée par le modèle conceptuel_II, a été exprimé par un chiffre allant de 0 à 100 % (Figure 67). Ensuite, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 10), les valeurs des blocs dérivés du modèle conceptuel_II, et situés au même endroit que les blocs d'un intervalle de probabilité donné ont été additionnées puis divisées par le nombre de blocs additionnés, afin d'obtenir les pourcentages montrés par les axes « Y » à la Figure 69.

Le modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II a également été comparé aux résultats des simulations conditionnelles, bloc par bloc, grâce à un calcul d'erreur classique :

$$\text{(erreur} = \frac{|\sum \text{abs}(\text{Bloc_modèle conceptuel II} - \text{Bloc_simulé})}{\text{Bloc modèle conceptuel II}} * 100) / \text{n_blocs}.$$

Les résultats (Tableau 8) indiquent que les tests produisent des résultats satisfaisants et similaires.

La Figure 68 montre que les tests effectués avec les lithologies modifiées (partie droite de la figure) donnent de meilleurs résultats que ceux effectués avec les lithologies observées (partie gauche de la figure), ce qui est en accord avec les observations faites précédemment (voir section « Test 2 »). Aussi, les résultats obtenus avec les forages de 2007 (10 forages recoupant la zone minéralisée) et 2008 (17 forages recoupant la zone minéralisée) sont similaires, ce qui n'est pas surprenant puisque, en 2008, deux fois plus de forages sont disponibles, mais la maille de forage reste similaire à celle de 2007.

Avec les forages de 2008 et 2007, le volume du modèle conceptuel_II est retrouvé avec les blocs ayant une probabilité d'environ 0,1-0,2 d'être minéralisés, alors que cette probabilité est d'environ 0,3-0,4 avec l'ensemble des forages de surface. Ainsi, comparés aux tests effectués avec tous les forages de surface, les tests effectués à partir des forages de 2007 et 2008 produisent des résultats 2 fois moins bons.

La Figure 69 montre que, quel que soit le jeu de données utilisé (Fo_2007, Fo_2008, ou Fo_surface), les résultats sont similaires ; c.-à-d. que les zones prédites comme ayant la probabilité maximale d'être minéralisées sont situées à l'intérieur de la zone délimitée par le modèle conceptuel_II.

Pour les tests effectués avec toutes les données de forage souterrains et de surface (Fo_all), les résultats sur le volume prédit sont aussi mauvais que ceux obtenus à partir des forages Fo_2007 et Fo_2008 (Figure 68). Ainsi, avec une telle quantité de données, la simulation semble avoir de la difficulté à prédire la zone minéralisée. Par contre, lorsque l'on étudie la distribution des zones prédites, il est observé que ces zones sont, en majorité, situées dans la zone délimitée par le modèle conceptuel_II (voir Figure 69). L'utilisation des forages de définition permet donc de préciser la position spatiale du modèle et lui permet de prédire des zones dont la position spatiale correspond mieux à la « réalité ».

Les tests effectués avec Fo_all donnent possiblement de moins bons résultats, car les forages documentent une quantité importante de détails (résolution élevée), que l'on tente de modéliser avec une grille de faible résolution (avec des blocs de 5 * 5 * 5 m). Pour travailler avec ce type de données, il faudrait probablement utiliser une IE et une grille mieux résolue. Des tests ont été effectués avec des blocs de 2 * 2 * 2 m, ce qui

a nécessité 2 jours de calculs (contre 1-2 H pour les autres tests), et les résultats ne sont pas non plus satisfaisants. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre la zone, et confectionner une IE mieux résolue ou, alternativement, simplifier la lithologie des forages (en diminuer la résolution en quelque sorte). Ces pistes pourraient être explorées par un autre projet CONSOREM.

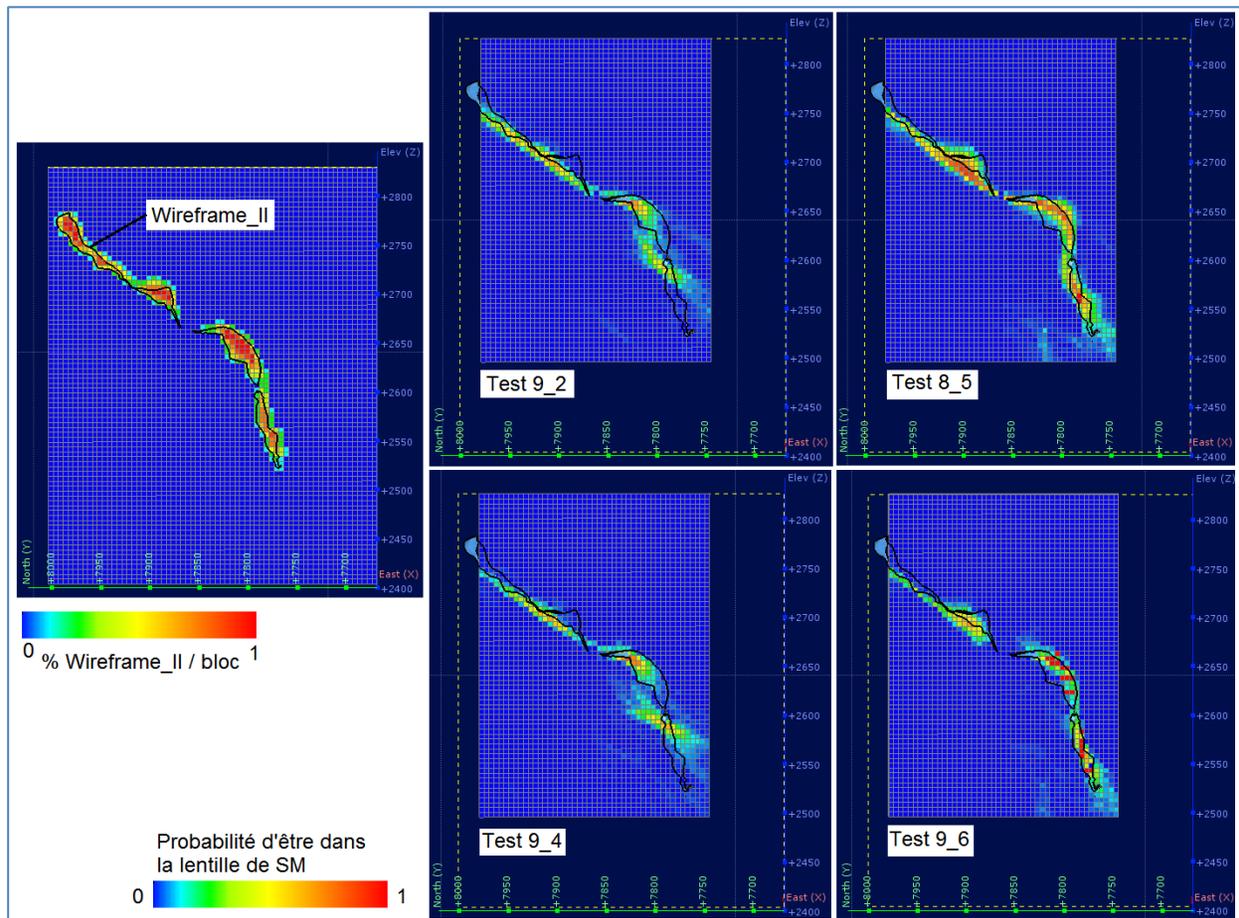


Figure 67 : Coupes au travers des modèles de blocs suivants : à droite, modèle de blocs représentant le modèle conceptuel_II ; et à gauche (4 coupes), résultats des divers tests (pour une vue en 3D de ces modèles de blocs, voir Figure 66 et Figure 65).

Tableau 9 : Caractéristiques des tests effectués et erreurs générales.

Test	Forages	Composites	Lithologies	IE	Erreur
Test 8_5	Fo_surface	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI03	4.74
Test 8_6	Fo_surface	Aux 5 m & 1m	Observées	TI03	4.22
Test 8_8	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Observées	TI03	4.36
Test 8_9	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI03	4.67
Test 9_1	Fo_2007	Aux 5 m & 1m	Observées	TI05	4.59
Test 9_2	Fo_2007	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI05	4.78
Test 9_3	Fo_2008	Aux 5 m & 1m	Observées	TI06	4.65
Test 9_4	Fo_2008	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI06	4.83
Test 9_5	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Observées	TI07	4.23
Test 9_6	Fo_all	Aux 5 m & 1m	Modifiées	TI07	4.32

Figure 68 : Résultats des divers tests. Les volumes (c.-à-d. le nombre de blocs de la grille « résultats » multiplié par $5 * 5 * 5$) de chaque zone ayant une probabilité $> 0,1, 0,2, 0,3, 0,5,$ ou $0,8$ d'être minéralisé, sont reportés sur le graphique.

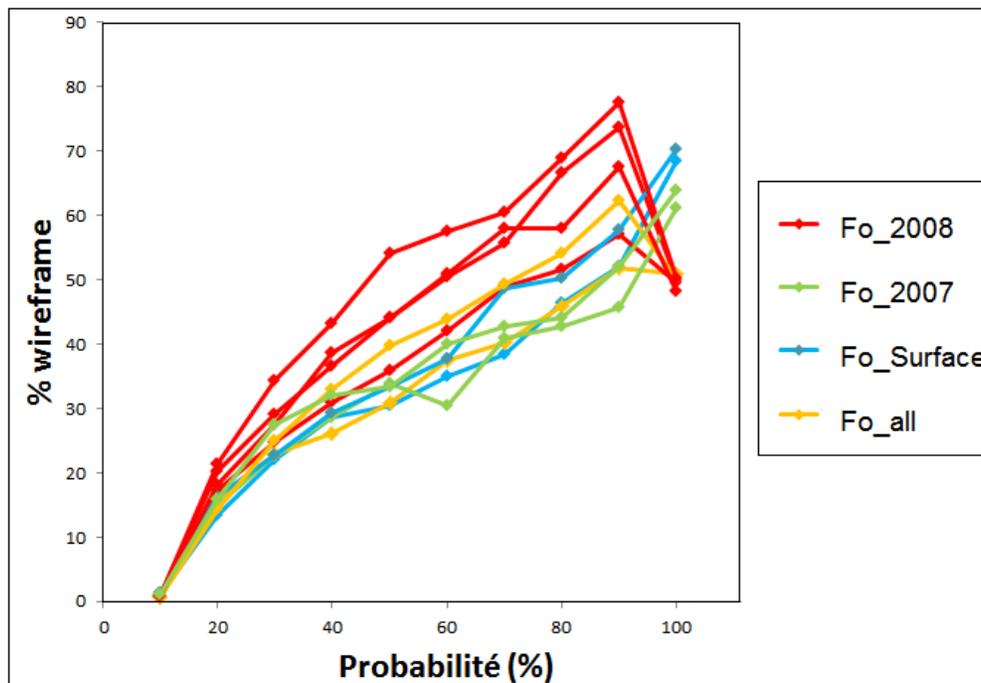


Figure 69 : Résultats des divers tests. Résultats des divers tests. La surface occupée par les blocs simulés, pour chaque intervalle de probabilité (intervalles de 0,1) [axes des X], est comparée au pourcentage de cette surface réellement occupée par la lentille minéralisée (représentée par le modèle conceptuel_II) [axes des Y].

4.7 Simulations et statistiques multipoints : données d'Agnico

4.7.1 Présentation des données et extraction des forages

Les données utilisées dans le cadre de ce projet sont des données de forage qu'Agnico Eagle a récolté dans la zone nord (secteur IVR) du gisement Amaruq. Ce gisement d'or semble à la fois être contrôlé par la lithologie (formation de fer, etc.), qui a été fortement déformée (plissée), et par des corridors de déformation qui semblent plus tardifs. Le but de ce projet n'est pas une étude du gisement Amaruq, et les modèles géologiques utilisés ci-dessous pour effectuer les simulations conditionnelles (c.-à-d. les IE), qui ne reflètent que le contrôle que les corridors de déformations semblent avoir sur la minéralisation, servent seulement à démontrer le potentiel des simulations. Ces modèles devront être raffinés par les personnes qualifiées d'Agnico Eagle, qui connaissent le gisement, afin d'obtenir des résultats de simulations pouvant être utiles au calcul des ressources.

Les données de forages contiennent les informations suivantes :

- **Analyse de contrôle des teneurs Au** : résultats des analyses des teneurs en or ;
- **Lithologies 1 et 2** : observations de la lithologie provenant de données de forages. Les données sont séparées en lithologie principale (1) et secondaire (2) ;
- **Pourcentage veine** : observations des veines de quartz et autres provenant de données de forages. Ces observations sont reportées sous la forme de pourcentage de veines observées pour divers intervalles. Dans le cadre de ce projet, ces pourcentages ont été additionnés, et seule l'information « pourcentage total de tous types de veines par intervalles » a été utilisée.

Les tests proposés ci-dessous ont été effectués en 2D. La procédure décrite pourra facilement être étendue à la 3D par Agnico Eagle. Le seul obstacle à la modélisation en 3D est la production d'une IE 3D réaliste et consistante. En effet, elle devrait représenter de fines veines de quartz ayant des orientations variées, et/ou des zones riches en or de formes complexes. L'auteur ne disposait pas des outils nécessaires à la confection d'une IE 3D de structure aussi complexe. Ceci, encore une fois, démontre la nécessité de développer un logiciel permettant de faciliter sa confection (voir discussions sur ce sujet proposées dans les sections précédentes).

4.7.2 Test 1 – Lithologie en section

Pour le Test 1, effectué en section, seules les données lithologiques ont été considérées. Le but de ce test est de modéliser la position et la forme des veines de quartz observées en forage.

Les forages considérés pour ce test sont les suivants : AMQ15-538, AMQ16-658, AMQ16-734, AMQ16-778, AMQ16-879, AMQ16-772, AMQ16-834, AMQ16-844, IVR14-062, IVR14-066, IVR14-069.

Les données lithologiques ont été traitées de la façon suivante :

- Suppression de quelques doublons;
- Assemblage des lithologies principales et primaires;
- Simplification des données lithologiques et répartition des données selon les classes suivantes : 1) veines de quartz (QV); 2) gabbro; 3) komatiite; et 4) S3 (greywacke, basalte et chert). Les autres lithologies sont mineures et n'ont pas été prises en compte pendant la modélisation;
- Segmentation des intervalles en segments de tailles $\leq 5\text{m}$;

- Desurvey;
- Rotation antihoraire de 55,5° autour de l'axe des Z (avec un Y = Cst. utilisé).

La TI_2D a été confectionnée selon la méthode décrite à la section 4.3.2. L'image d'entraînement a été dessinée avec *Illustrator*, à partir des données de forage accessibles du gisement Amaruq d'Agnico Eagle (Figure 70). Ce modèle géologique devra être éventuellement raffiné.

Les forages et la TI_2D ont ensuite été importés avec le logiciel SGeMS (Figure 71 et Figure 70). Les paramètres des simulations *FILTERSIM_cont* effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec *Search_TD* = [11 5 11] ; et *Inner_PD* = [7 3 7]). Les résultats des simulations ont d'abord été stockés par des grilles ayant une résolution de 10 m. Cette résolution s'est révélée trop faible pour modéliser des éléments aussi fins que les veines de quartz. Une grille contenant des blocs de 5 * 5 * 5 m a finalement été utilisée.



Figure 70 : Image d'entraînement 2D (résolution de 5 m), confectionnée avec *Illustrator* à partir des données de forage. Le code couleur est le suivant : bleu-foncé (komatiite), bleu clair (S3), jaune (gabbro), et rouge (QV).

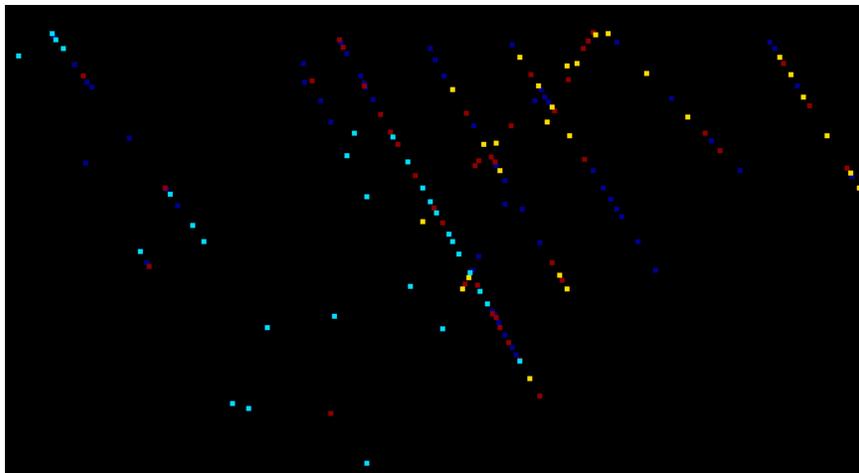


Figure 71 : Données de forages représentées avec le logiciel SGeMS. Le code couleur est le suivant : bleu-foncé (komatiite), bleu clair (S3), jaune (gabbro), et rouge (QV).

Le résultat de cette simulation est montré ci-dessous (Figure 72). Ce résultat montre que le logiciel SGeMS peut être utilisé pour modéliser des veines de quartz. Si ces veines sont porteuses d'or, alors de tels résultats pourraient être intégrés à un calcul de ressource. Notez que ce type de carte est peu utile en tant que tel : pour être utilisable, la résolution de la grille devrait être réduite pour que les blocs aient des tailles plus proches de la SMU.

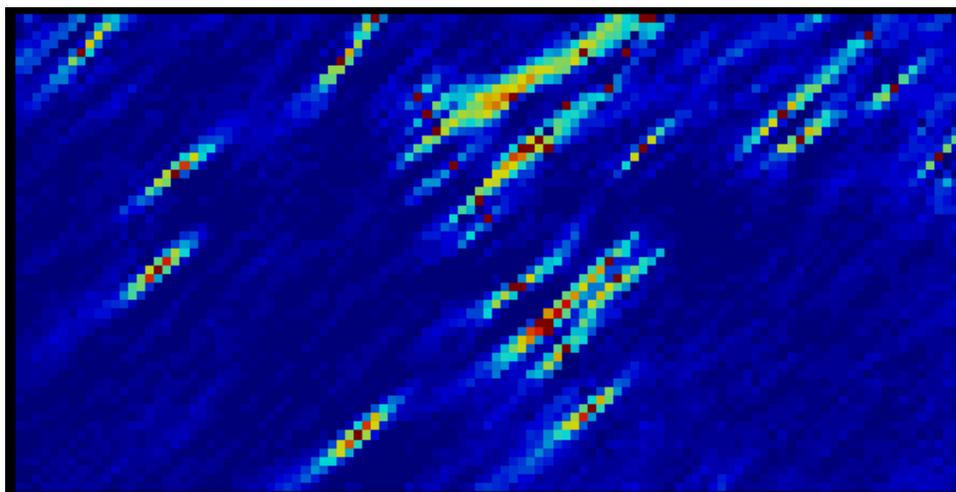


Figure 72 : Résultats du test 1 montrés sous la forme d'un modèle de blocs qui contient la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge).

4.7.3 Test 2 – Lithologie et analyse de contrôle des teneurs en section

Pour le Test 2, effectué en section, les diverses données disponibles ont été intégrées. Le but de ce test est de montrer comment les données d'analyses de contrôle des teneurs (Au) et lithologiques peuvent être combinées.

Les forages considérés pour ce test sont les suivants : AMQ15-538, AMQ16-658, AMQ16-734, AMQ16-778, AMQ16-879, AMQ16-772, AMQ16-834, AMQ16-844, IVR14-062, IVR14-066, IVR14-069.

Les données ont été traitées de la façon suivante :

- Extraction des forages d'intérêt;
- Transformation des données lithologiques : les lithologies principales ont été converties en 1 (veines de quartz observées) et 0 (autres lithologies). Pour les lithologies secondaires, seules les veines de quartz ont été considérées (code 1) et les intervalles à veines ont été combinés aux intervalles des lithologies principales;
- Des composites aux 2 m ont ensuite été calculés pour les données d'analyse de contrôle des teneurs (Au). Pour les autres données, les intervalles ont été segmentés (intervalles ≤ 5 m);
- Desurvey;
- Rotation antihoraire de 55,5° autour de l'axe des Z (avec un Y = Cst. utilisé).

La *TI_2D* a été confectionnée selon la méthode décrite à la section 4.3.2. L'IE a été dessinée sous Illustrator, à partir des données de forage accessibles du gisement d'Amaruq (Figure 70).

Ce modèle géologique devra être raffiné à l'avenir. Aussi, notez que la même IE a été utilisée pour modéliser les données d'analyse de contrôle des teneurs et des veines de quartz. Il est possible que la modélisation des teneurs en Au doivent être faite avec une IE différente (p.ex. qui reflète le contrôle que la lithologie exerce sur la minéralisation, entre autres). Cette piste pourra être explorée par les personnes qualifiées d'Agnico Eagle.

Les forages et la TI_2D ont ensuite été importés avec le logiciel SGeMS. Les paramètres des simulations *FILTERSIM_cont* effectuées sont ceux reportés à la section 4.3.4 (avec *Search_TD* = [11 5 11] ; et *Inner_PD* = [7 3 7]). Les résultats des simulations ont été stockés par des grilles contenant des blocs de 5 * 5 * 5 m.

Une série de simulations ont été effectuées sur les données de forages suivantes :

- **SIM01** – avec les teneurs en Au (analyse de contrôle des teneurs) codées de la façon suivante : 1 si Au > 80^{ième} centile (0,26975 ppb Au), et 0 pour les teneurs plus faibles ;
- **SIM02** – avec les teneurs en Au (analyse de contrôle des teneurs) codées de la façon suivante : 1 si Au > 50^{ième} centile (0,0635 ppb Au), et 0 pour les teneurs plus faibles ;
- **SIM03** – avec les données sur le pourcentage de veines observées en forage, codées de la façon suivante : 1 si veines > 20%, et 0 pour les autres ;
- **SIM04** – avec les données sur le pourcentage de veines observées en forage, codées de la façon suivante : 1 si veines > 50%, et 0 pour les autres ;
- **SIM05** – avec les données sur le pourcentage de veines observées en forage, codées de la façon suivante : 1 si veines > 80%, et 0 pour les autres ;
- **SIM06** – avec les données de lithologies principales et secondaires, codées 1 si des veines ont été observées (correspond à 100% de veine présente dans un intervalle donné), et 0 pour les autres lithologies.

Le résultat de ces simulations est montré ci-dessous, sous la forme de cartes montrant la probabilité d'avoir de l'or ou d'avoir une veine de quartz (Figure 74 et Figure 75). Les résultats des différents tests ont ensuite été multipliés par diverses valeurs (poids) et ont été combinés (additions) (voir figures 74, 75 et 76). Les poids choisis sont arbitraires et devront être raffinés. Cet exemple montre comment des données diverses, difficilement combinables dans une même simulation peuvent être assemblées sur une même grille.

La dernière combinaison (Figure 76) accorde un poids plus important aux teneurs en Au mesurées, mais prend tout de même en compte les informations sur les veines de quartz. S'il y a une association spatiale entre veines et or, il est important de considérer cette information et les combinaisons proposées ici sont une façon de prendre en compte ces types de données diverses.

Pour d'autres gisements, il pourrait être intéressant de simuler les teneurs en Au, d'autres indicateurs (As, etc.), les lithologies contrôlant la minéralisation (p.ex. formations de fer), les réseaux de veines de quartz et les failles qui les contrôlent, etc., et d'ensuite assembler les simulations effectuées à partir de ces données diverses pour produire une grille montrant les zones qui ont le plus de chances de contenir des zones minéralisées. Une bonne pratique serait, par la suite, de modifier la résolution de cette grille pour que les blocs aient une taille proche de celle de la SMU.

Ce type de démarche ne peut cependant être effectué que si le mode de mise en place du gisement est bien compris, et que les éléments associés et contrôlant la minéralisation ont été identifiés (compréhension du gisement) et mesurés (forage, analyses). Ceci montre que pour des gisements de géométries complexes, le modèle géologique (c.-à-d. l'image d'entraînement) prend une place prépondérante dans la simulation.

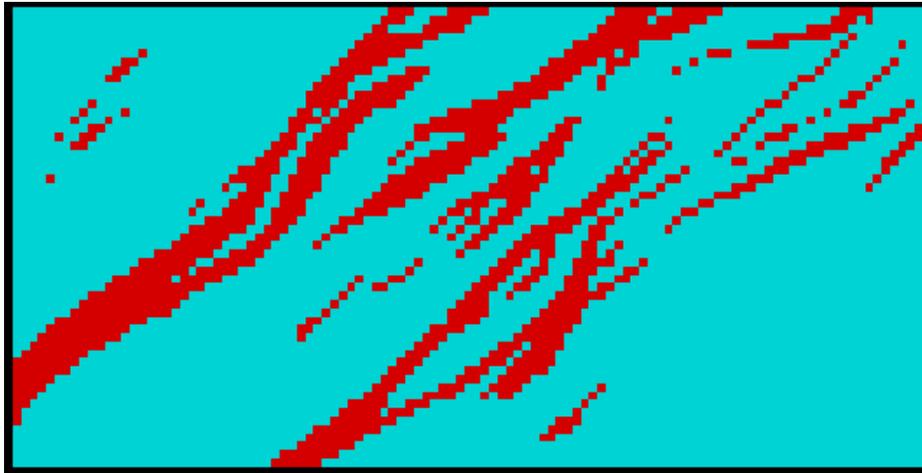


Figure 73 : TI 2D (résolution de 5 m), confectionnée avec *Illustrator* à partir des données de forage. Le code couleur est le suivant : bleu (stériles) et rouge (zones d'intérêt, veines de quartz et/ou zones minéralisées en or).

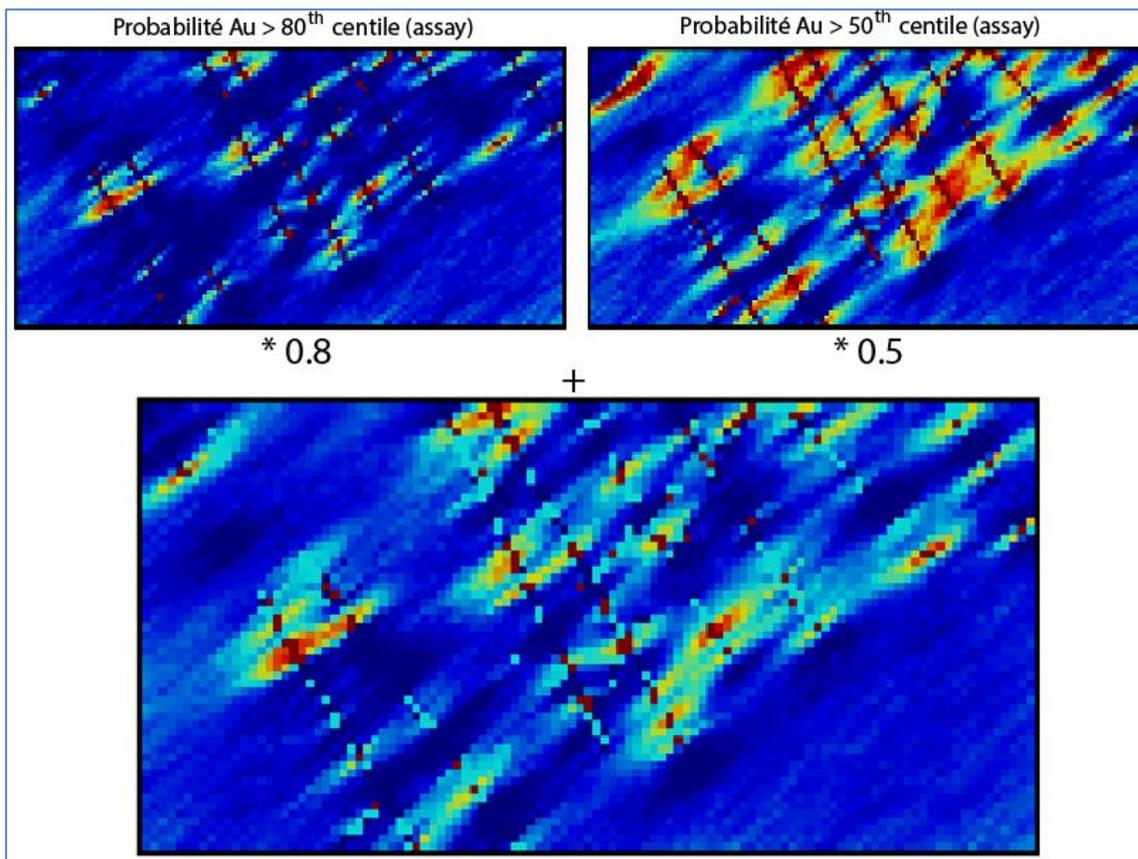


Figure 74 : Résultats des simulations SIM01 (en haut à gauche) et SIM02 (en haut à droite) du test 2 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). La carte montrée en bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM01 et SIM02.

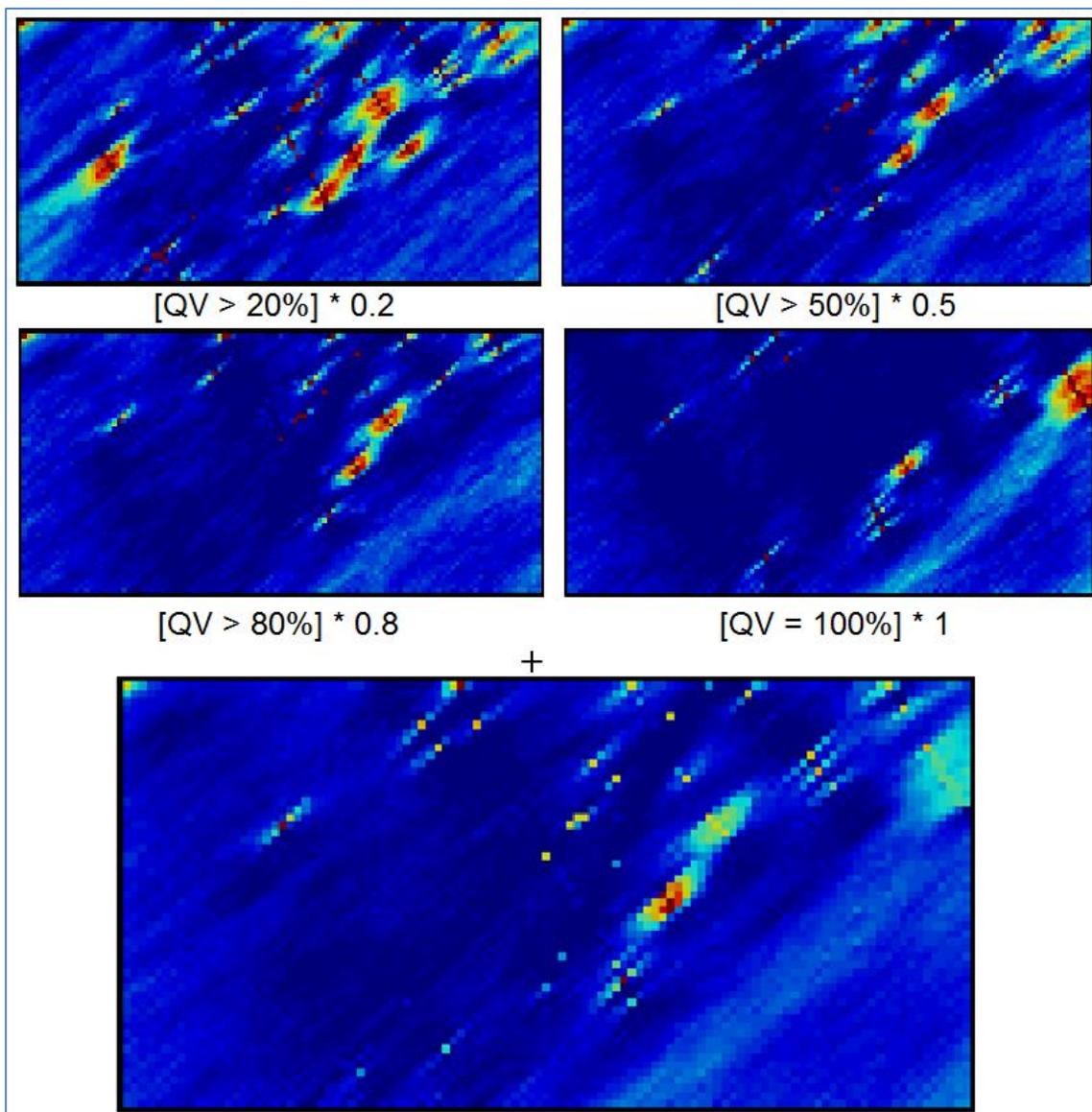


Figure 75 : Résultats des simulations SIM03 (en haut à gauche), SIM04 (en haut à droite), SIM05 (au milieu à gauche), et SIM06 (au milieu à droite) du test 2 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond à la combinaison des résultats de SIM03, SIM04, SIM05, et SIM06.

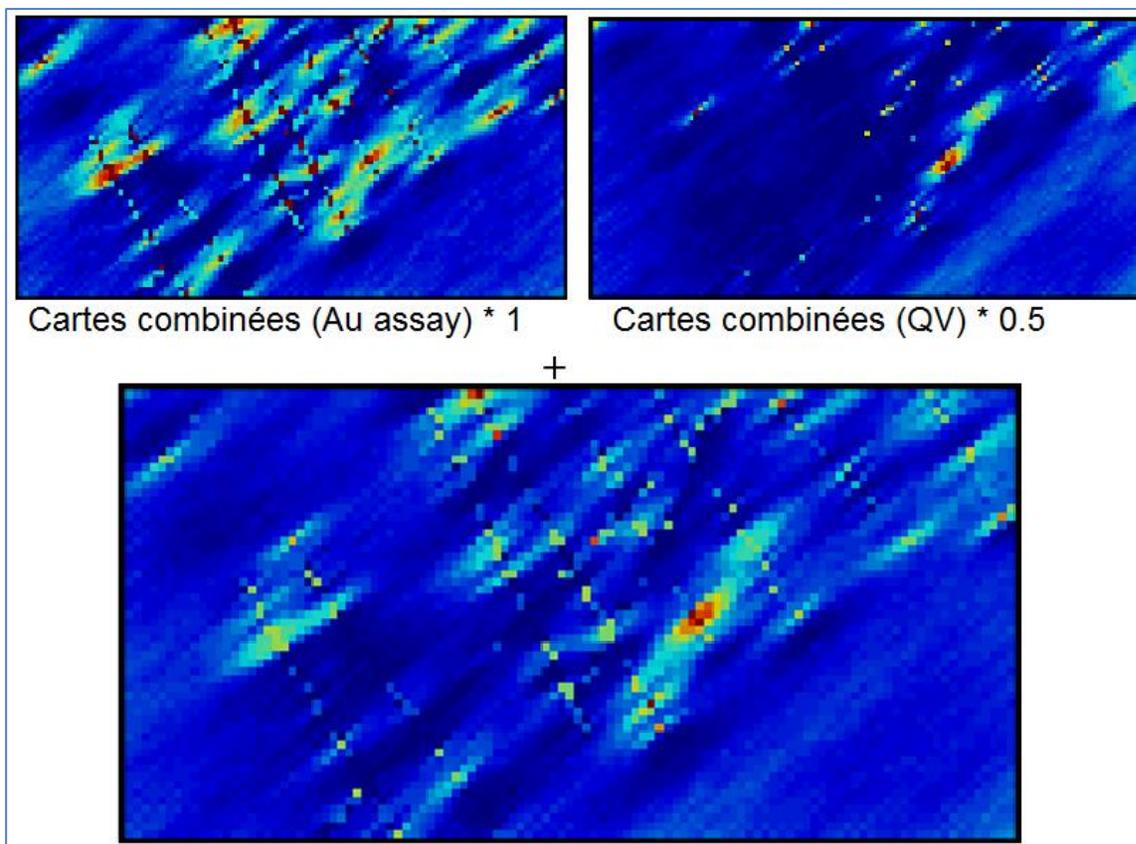


Figure 76 : Résultats combinés des 2 simulations effectuées à partir des teneurs en Au (en haut à gauche) et 4 simulations effectuées à partir des veines de quartz (en haut à droite) montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des 6 simulations.

4.7.4 Test 3 – Lithologie et analyse de contrôle des teneurs en section

Le test 3 est en tout point similaire au test 2, mais a été effectué avec les forages suivants : AMQ16-810, IVR14-019, AMQ16-846, AMQ16-747, AMQ16-713, AMQ16-740, AMQ16-752, AMQ16-592, AMQ16-762, AMQ15-491, AMQ16-780, AMQ16-598, AMQ16-770, AMQ16-774, IVR14-021, AMQ16-726, AMQ16-797, IVR14-022.

Les résultats de ces tests sont montrés ci-dessous (Figure 77 et Figure 78).

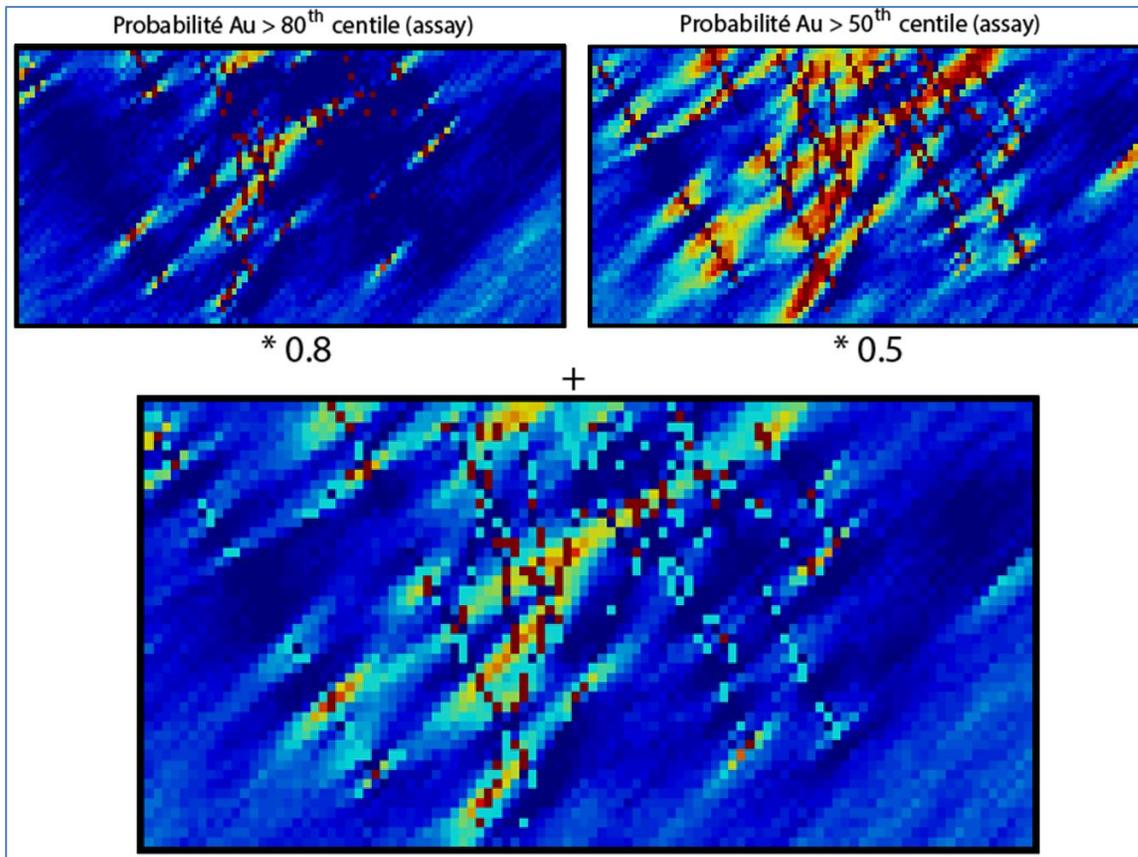


Figure 77 : Résultats des simulations SIM01 (en haut à gauche) et SIM02 (en haut à droite) du test 3 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d’être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L’image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM01 et SIM02.

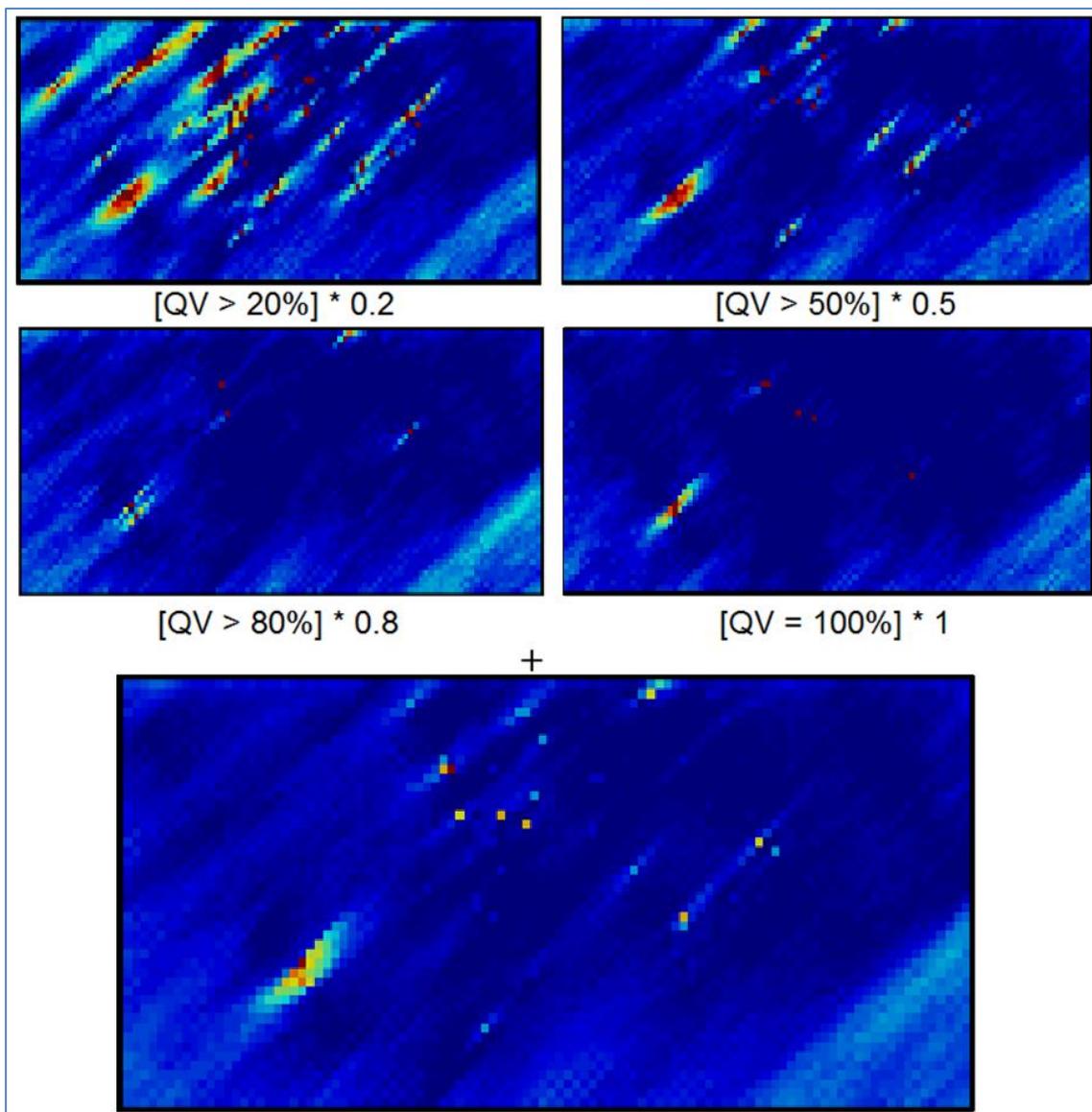


Figure 78 : Résultats des simulations SIM03 (en haut à gauche), SIM04 (en haut à droite), SIM05 (au milieu à gauche), et SIM06 (au milieu à droite) du test 3 montrés sous la forme de modèles de blocs qui contiennent la probabilité que chaque zone a d'être une veine de quartz (échelle de 0 à 1, de bleu foncé à rouge). L'image au bas de la figure correspond au résultat de la combinaison des résultats de SIM03, SIM04, SIM05, et SIM06.

5 AJUSTER UN ELLIPSOÏDE À DES POINTS 3D

Cette section présente quelques résultats préliminaires et quelques pistes de recherche afin de développer un outil permettant d'estimer un volume approximatif et l'extension de la minéralisation à partir d'un jeu partiel et limité de forages. L'idée est de se placer au début d'une campagne de forages et de pouvoir faire une appréciation préliminaire du potentiel de développement.

Cette conception idéalisée des gisements sous la forme d'un ellipsoïde tire sa source d'un projet CONSOREM réalisé au début des années 2000. La géométrie des gisements abitibiens a ainsi été approximée à des ellipsoïdes par V. Pearson dans les projets CONSOREM 2002-08 et 2003-04. Il avait été établi, lors de ces projets, que les gisements exploités de l'Abitibi permettaient d'être approximé par une forme géométrique simple en un ellipsoïde unique ou en une série d'ellipsoïdes. L'avantage de cette forme simple est qu'elle peut être construite à partir de peu de données de forages et permet donc une approximation préliminaire du volume de la zone minéralisée. Ce projet permet de reprendre ce concept et tente d'amener des avenues permettant une certaine automatisation de la définition de l'ellipsoïde.

Le concept visé ici est d'ajuster un ellipsoïde à un ensemble de points. Les points représentent une série d'intersections obtenues en forages (contact entre une lentille de sulfure massif et son encaissant, par exemple) et l'ellipsoïde représente une approximation du volume général de l'enveloppe minéralisée. Une fois l'extension générale de la lentille connue, il devient plus aisé de planifier la quantité de forages qui seront nécessaires pour couvrir la zone, et de planifier le coût associé à ces forages en fonction de la maille choisie.

NB : l'outil décrit dans cette section n'est pas au point (des pistes de recherche sont, par ailleurs, proposées à la fin de cette dernière). Le projet n'a pas permis d'achever le développement de cet outil. Il est toutefois ici décrit afin que les idées présentées puissent être reprises dans le cadre de futurs projets.

5.1 Revue de la littérature : ellipsoïdes

La littérature documentant l'ajustement d'un ellipsoïde à des points 3D est très abondante et seul un bref aperçu sera présenté ici.

Une définition claire de l'ellipsoïde est proposée par Bektas (2015). L'équation de l'ellipsoïde est simple (Équation 1). Les ellipsoïdes sont généralement définis par 9 paramètres : coordonnées 3D du centre (3 paramètres), 3 demi-axes, et 3 angles de rotation.

$$1 = \frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{b^2} \quad (\text{Équation 1})$$

Avec a_x , a_y , b , la longueur des demi-axes (Figure 79)

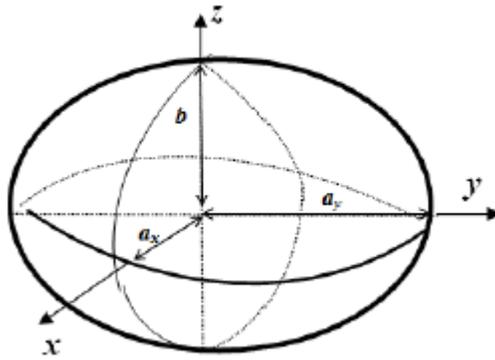


Figure 79 : Ellipsoïde (tiré de Bektas 2015).

Les méthodes de type moindre carré utilisées pour ajuster un ellipsoïde à des points sont :

1. **Méthodes algébriques** : linéaires, simples, et rapides à calculer (ex. Fitzgibbon et al., 1999);
 2. **Méthodes géométriques** : solutionnent un problème non linéaire (Ray et Srivastava, 2008);
- L'une de ces méthodes s'appelle « orthogonal fitting » (Bektas,2015).

Une fois l'ellipsoïde ajusté, il y'a deux façons de le décrire :

- Description algébrique, qui comprend 9 coefficients (A à I), que l'on utilise pour écrire l'équation générale de l'ellipsoïde ($Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Exz + 2Fyx + 2Gx + 2Hy + 2Iz - 1 = 0$) ;
- Description géométrique, qui comprend 9 paramètres : position du centre (x, y, z), longueur des demi-axes (a, b, c; ou a_x, a_y, b sur la Figure 79), et rotation des axes (qui peut être exprimé sous la forme d'une matrice de rotation, ou traduit en termes de *pitch*, *yaw*, *roll*).

5.2 Description de logiciel « Générateur d'ellipsoïdes »

Le logiciel proposé ajuste un ellipsoïde à une série de points 3D. L'ajustement de l'ellipse est inspiré par un code Matlab (« *Ellipsoid fit* ») publié en ligne en 2009 sur le site internet *MathWorks*. Ce code semble être une adaptation de la méthode de Fitzgibbon et al., (1999).

Ce code a été traduit en langage python, puis modifié et un GUI a été créé. Il permet à l'utilisateur d'effectuer les tâches suivantes :

1. **Ouvrir une série de points 3D (fichier .dat)** : ces points localisent les positions du contour de l'enveloppe minéralisée et correspondent généralement à des intersections de forage. Le code livré n'accepte que des points en entrée. Le mieux est d'utiliser un système de coordonnées de type UTM pour représenter ces points (le logiciel considérera que les points ont des coordonnées cartésiennes, et que l'unité de base est le mètre). Ouvrez ces points avec le bouton « OUVRIER FICHER (.dat) » (Figure 81);

2. **Calculer un ellipsoïde « best fit »** : lorsque vous ouvrez le fichier .dat qui contient les coordonnées (x, y, z) des points, le logiciel calcul automatiquement l'ellipsoïde « best fit ». Il affiche ensuite les caractéristiques de cet ellipsoïde (position du centre, longueur des axes, angles de rotation, volume), affiche l'ellipsoïde et les points dans un graphique 3D, et affiche les ratios des demi-axes sur un graphique binaire décrit ci-dessous (affichage en rouge) (Figure 82);
3. **Calculer un ellipsoïde personnalisé** : lorsque le logiciel charge les points, il propose une série de valeurs qu'il montre dans la partie droite de la fenêtre de dialogue (ellipsoïde (2)). Ces paramètres correspondent aux angles de rotation de l'ellipsoïde « best fit », à un centre quelconque, qui correspond au centre des points chargés, et à des longueurs de demi-axes quelconques, qui sont définies à partir des points chargés (exemple : demi-axe a = $X_{min} + (X_{max} - X_{min}) / 2$). Ces paramètres peuvent être modifiés à loisir. Ensuite, appuyez sur le bouton « CALCULER NOUVEAU ELLISPOIDE (2) » pour visualiser l'ellipsoïde personnalisé (2) sur les graphiques 3D et 2D (il s'affiche en bleu) (Figure 83).

Description du graphique binaire :

Le graphique binaire affiché par le code compare la géométrie des ellipsoïdes calculés à celle de gisements de l'Abitibi. La géométrie des gisements abitibiens approximée à des ellipsoïdes a été compilée par V. Pearson (projets CONSOREM 2002-08 et 2003-04). Ces géométries sont décrites par les ratios de longueurs des demi-axes suivants : (axe intermédiaire / axe minimum) en abscisse et (axe maximum / axe intermédiaire) en ordonnée.

Ainsi, les ellipsoïdes situés dans la partie inférieure droite du graphique ont des formes prolates (ou « en cigare », une géométrie fréquente dans les gisements étirés par un épisode de déformation par exemple). Ceux situés dans la partie supérieure gauche du graphique ont des formes oblates (ou « disques aplatis », une géométrie de minéralisation en forme de filon, par exemple). Aussi, plus les deux ratios ont des valeurs proches de 1, plus l'ellipsoïde a une forme sphérique.

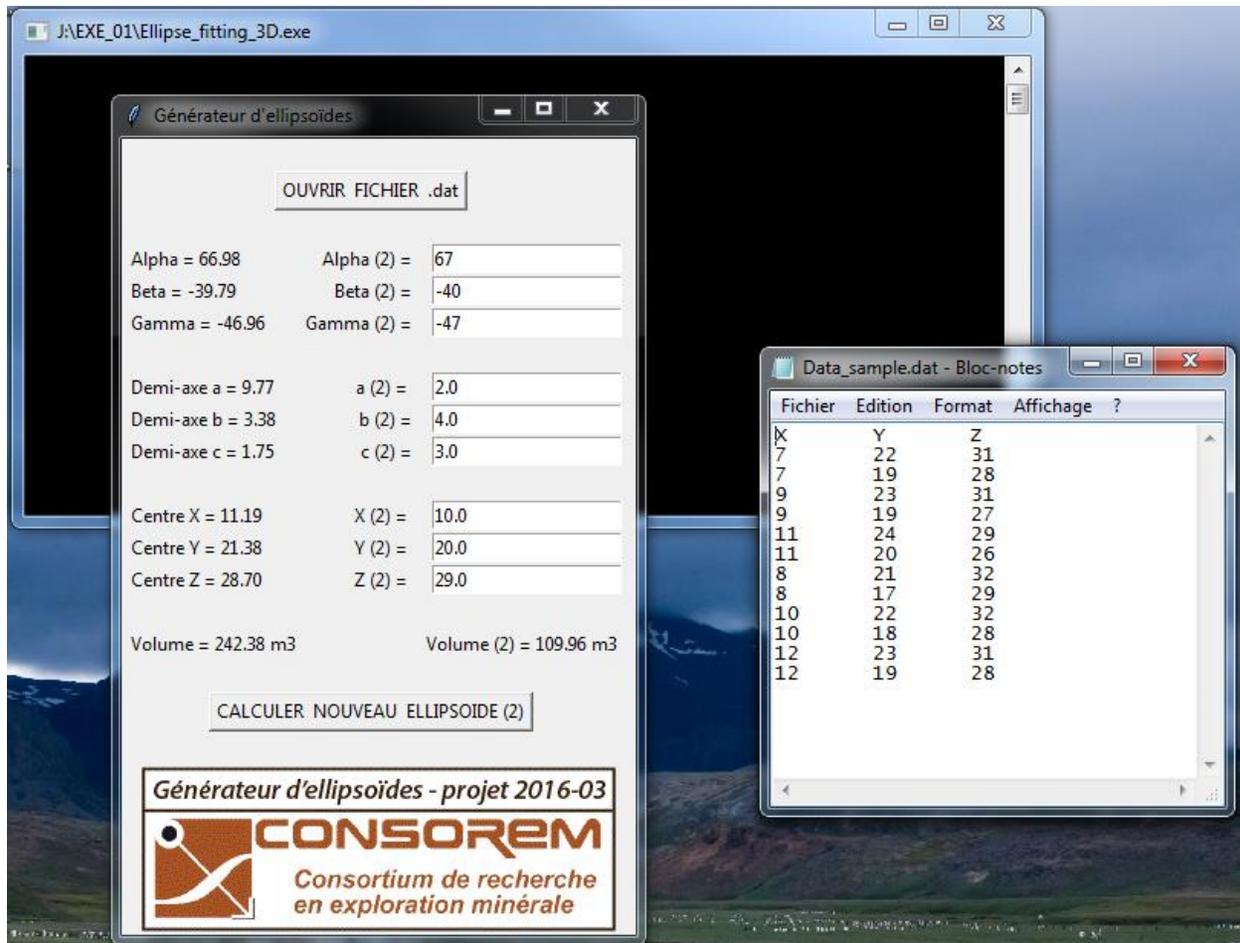


Figure 80 : Ouverture de l'exécutable « Générateur d'ellipsoïdes » et exemples de fichier .dat (format acceptable en entrée). Le fichier « *Data_sample.dat* » montré à droite de l'image a été ouvert depuis le logiciel, et les paramètres des ellipsoïdes ont pu être calculés à partir de ces points.

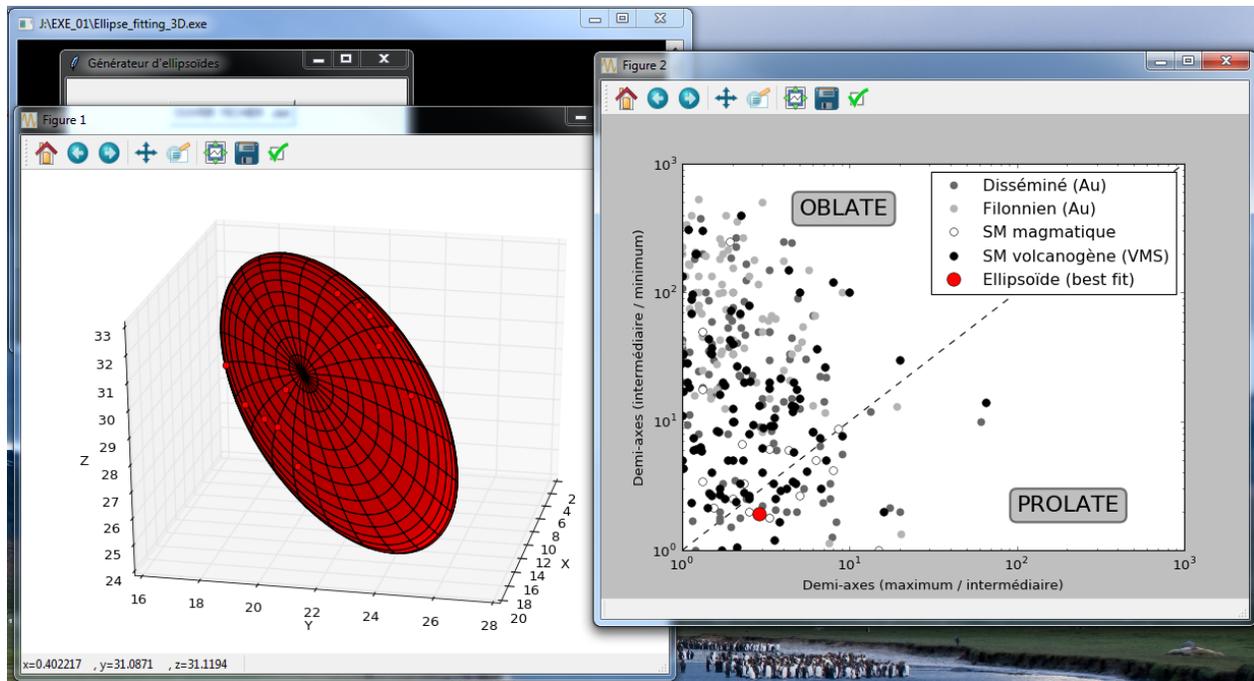


Figure 81 : Génération de l'ellipsoïde « best fit » (graphique 3D) et du graphique 2D montrant la géométrie de gisements abitibiens. Ces graphiques s'obtiennent en ouvrant un fichier .dat avec le bouton « ouvrir fichier .dat ».

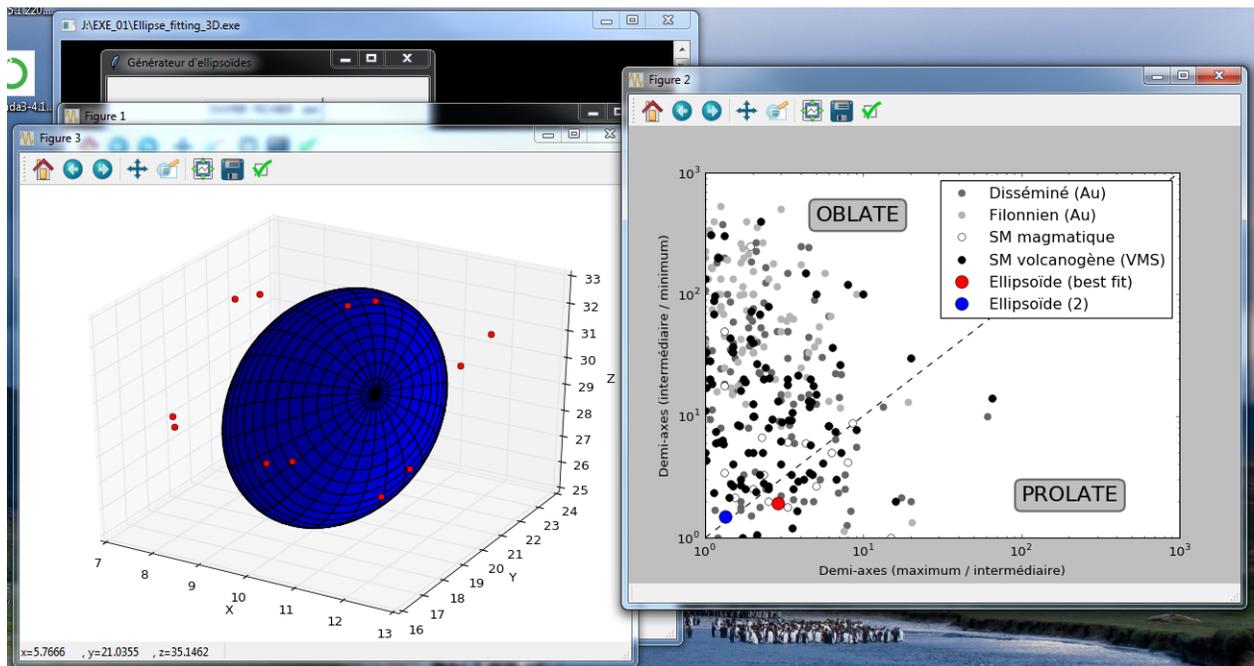


Figure 82 : Génération de l'ellipsoïde personnalisée (graphique 3D) et du graphique 2D montrant la géométrie de gisements abitibiens. Ces graphiques s'obtiennent avec le bouton « calculer nouvel ellipsoïde (2) ».

5.3 Logiciel proposé : détails pratiques

Le code a été développé avec le langage python 3.5 (Python 2016). Il utilise les modules suivants :

- **Numpy** (pour travailler avec les listes, etc. – opérations de base) (nombreux développeurs ; ex. Oliphant 2006);
- **Math** (calculs de base) (Python 2016);
- **Matplotlib** (pour les graphiques) (Hunter 2007);
- **Pandas** (pour importation et conversion des données du fichier .dat) (McKinney 2010)
- **Tkinter** (pour la confection du GUI) (Python 2016);
- **Nuitka** (pour la compilation du code) (développé par un particulier – Kay Hayen, sur son blog personnel - <http://nuitka.net/pages/overview.html>).

Pour utiliser le logiciel « Générateur d'ellipsoïdes », il est nécessaire d'avoir le langage python et quelques modules d'installés sur votre ordinateur. Il est possible d'obtenir ces prérequis de plusieurs façons :

Première méthode - Installez « anaconda », qui est un package (il installera le langage python de base et une grande quantité de modules). Installez la dernière version d'anaconda ; c.-à-d. celle qui utilise python 3.5. Cette version peut être téléchargée à l'adresse suivante : <https://www.continuum.io/downloads>.

Notez cependant qu'anaconda est un logiciel qui prend de la place sur un ordinateur (environ 350 Mo). Il est possible d'en installer une version allégée (voir ci-dessous).

Deuxième méthode – Installez Miniconda, qui est la version allégée d'anaconda (environ 40 Mo). Ce logiciel peut être téléchargé à l'adresse suivante (téléchargez la version qui fonctionne avec Python 3.5) : <http://conda.pydata.org/miniconda.html>. Ensuite, il vous faudra installer les modules listés ci-dessus. Pour ce faire, lancez le « Anaconda Prompt » qui vient de s'installer, et entrez les lignes de code suivantes (une par une, en laissant le temps aux modules de s'installer) et entrez-« y » lorsque demandé :

- conda install numpy;
- conda install matplotlib;
- conda install pandas.

Ensuite, vous pouvez utiliser le code (ou le logiciel) de trois façons :

Première possibilité – Pour utiliser l'exécutable directement, double cliquez sur le fichier « `Ellipse_fitting_3D.exe` »;

Deuxième possibilité : à partir de Spider (si anaconda est installé au complet) – Dans le menu démarrez, dans le dossier « Anaconda », lancez le logiciel « Spider », qui est un IDL. Ensuite, ouvrez le fichier « `Ellipse_fitting_3D.py` » à partir de Spider et cliquez sur « Run » (qui est un triangle vert);

Troisième possibilité : à partir de Command Prompt – Ouvrir l'invite de commandes de Windows (située dans Menu> Accessoires> Invite de commandes). Ensuite, copiez le fichier « `Ellipse_fitting_3D.py` » dans un dossier de votre choix (par exemple, dossier « MonDossier » situé dans « Utilisateurs »). Ensuite, ouvrir le fichier .py en tapant la ligne suivante :

```
C:\Utilisateurs\MonDossier>python Ellipse_fitting_3D.py.
```

Pour plus de détails sur comment utiliser la « prompt command », voir la page suivante : <https://docs.python.org/3/faq/windows.html#how-do-i-run-a-python-program-under-windows>

5.4 Notes sur le logiciel proposé

Deux remarques seront faites sur le logiciel proposé :

(1) La première remarque est mineure : Python est plus adapté à la confection de modules qu'au développement de .exe (d'où la succession d'étapes qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour utiliser l'exécutable ; voir Section 5.3). À l'avenir, il serait peut-être plus judicieux de se concentrer sur le développement d'un module, ou de produire une interface logicielle différente. Ce projet ne visant pas au développement d'outils logiciels, ces pistes n'ont pas été explorées.

(2) La seconde remarque est plus problématique : l'approximation mathématique d'un ellipsoïde à partir d'une série de points ne fonctionne bien que si les points ne sont pas répartis de façon trop aléatoire (c.-à-d. s'ils sont situés le long de l'ellipsoïde en question, avec une marge d'erreur relativement faible). Des tests effectués sur des données d'intersection prises à partir de forages réels montrent que l'outil est incapable de générer un ellipsoïde dans la plupart des cas réels.

Pour adresser le second point, une piste de recherche intéressante est offerte par l'une des fonctions du module « *OpenCV* » (disponible sous Python ; docs.opencv.org) : fonction « *fitEllipse* ». Un exemple de l'utilisation de cette fonction est présenté ici (voir Figure 83).

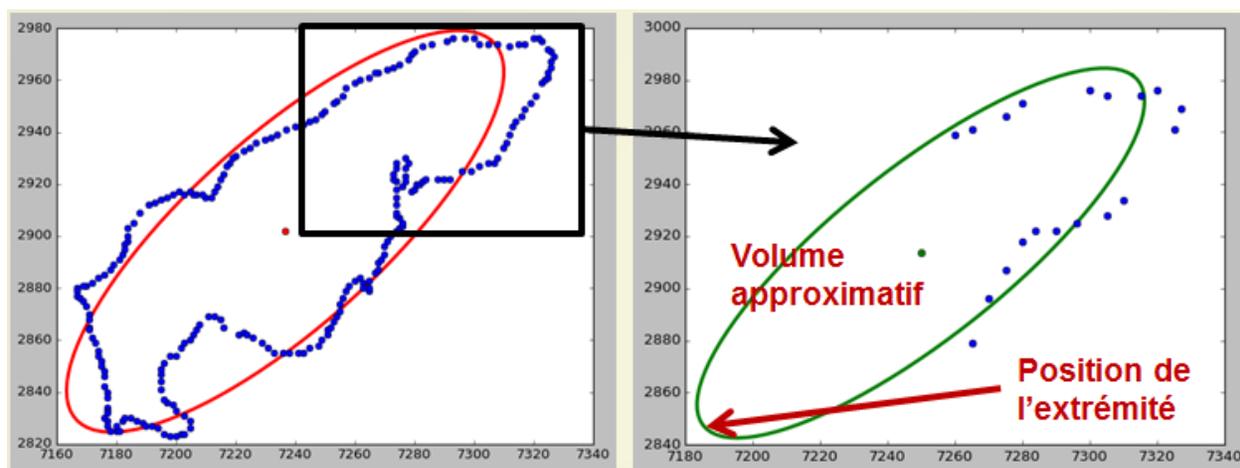


Figure 83 : Générations d'ellipses à l'aide du module « *OpenCV* » (voir texte pour explications). La figure illustre les deux paramètres auxquels ce type de procédure permet d'avoir accès : le volume approximatif du gisement et la position approximative de l'extrémité de la lentille minéralisée.

Pour effectuer ce test, les étapes suivantes ont été utilisées :

- Extraction de points correspondant au contour du modèle conceptuel de P-main (appartenant à Glencore) le long d'une section longitudinale (utilisation de l'outil « *Slice* » de Leapfrog®)

- . Ces points sont représentés en bleu à la Figure 83 : 1) à gauche, l'ensemble du contour est présenté; et 2) à droite, une partie du contour (coin supérieur droit de l'image de droite) est présenté (ces quelques points sont l'analogie d'intersections qui auraient pu être obtenues à partir de forages).
- Utilisation de la fonction « *fitEllipse* » d' « *OpenCV* » : la fonction est capable de prendre une série de points et d'y ajuster une ellipse (voir ellipses en rouge et vert, Figure 83). L'algorithme est extrêmement robuste.

Cette piste n'a pas été explorée plus en détail faute de temps. Notez que le module « *OpenCV* » a été développé pour travailler avec des images; la fonction « *fitEllipse* » ne fonctionne donc qu'en 2D. Une implémentation en 3D demanderait un peu de travail, mais est jugée faisable.

6 CONCLUSIONS

Le calcul des ressources est un exercice complexe et crucial dans le développement d'un gisement. Ce calcul comprend l'estimation d'un tonnage et d'une teneur moyenne. Les méthodes permettant de calculer le tonnage ont été revues dans le cadre de ce projet, et leurs avantages et inconvénients ont été discutés. Des exemples naturels, provenant d'Arianne Phosphate, de Glencore et d'Agnico Eagle, ont également été utilisés pour évaluer diverses mailles de forages et pour présenter les simulations conditionnelles.

Les tonnages sont calculés à partir de deux paramètres. Le premier paramètre est la densité qui, bien que non discutée en détail dans le cadre de ce projet, est une variable qui devrait faire l'objet d'une mesure et d'une interpolation de qualité. Le second correspond au volume, qui peut être obtenu à l'aide de techniques diverses.

Il est important de noter que l'estimation de ce volume découle de l'utilisation d'un modèle, et que comme tous les modèles, ceux utilisés par les calculs de ressources devraient faire l'objet d'une évaluation rigoureuse selon les critères suivants :

- Est-ce que le modèle tient la route, est-ce qu'il représente une réalité géologique? (P.ex. Glacken et Snowden 2001) ;
- Quelle est la qualité de ce modèle?

Répondre à cette dernière question demande une évaluation de l'incertitude. Que l'on cherche à évaluer la qualité d'une interpolation des teneurs ou celle d'un modèle conceptuel, l'outil qui permet de quantifier l'incertitude de la façon la plus rigoureuse correspond aux simulations conditionnelles. Une utilisation plus routinière de ce type de méthode, qui est de plus en plus fréquemment utilisée dans le domaine minier, pourrait mener à une meilleure évaluation et classification des ressources à l'avenir.

RÉFÉRENCES

Abzalov, M. Z., & Humphreys, M. (2002). Resource estimation of structurally complex and discontinuous mineralization using non-linear geostatistics: case study of a mesothermal gold deposit in Northern Canada. *Exploration and Mining Geology*, 11(1-4), 19-29.

Afzal, P., Ahari, H. D., Omran, N. R., & Aliyari, F. (2013). Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 55, 125-133.

Afzal, P., Shahbeik, S., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Zuo, R., & Wetherelt, A. (2014) The Effect of Estimation Methods on Multifractal Modeling for Mineralizes Zone Delineation in the Dardevey Iron Ore Deposit, NE Iran.

Alcaraz, S., Lane, R., Spragg, K., Milicich, S., Sepulveda, F., & Bignall, G. (2011). 3d geological modelling using new Leapfrog Geothermal software. In *Proceedings of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA.

Alcaraz, S. A., Chambefort, I., Pearson, R., & Cantwell, A. (2015). An Integrated Approach to 3-D Modelling to Better Understand Geothermal Reservoirs. In *Proceedings of World Geothermal Congress*.

Bektas, S. (2015). Least squares fitting of ellipsoid using orthogonal distances. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21(2), 329-339.

Birch, C. (2014). New systems for geological modelling-black box or best practice?. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(12), 993-1000.

Boisvert, J.B., Leuangthong, O., Ortiz, J.M., Deutsch, C.V. (2008). A methodology to construct Image d'entraînement s for vein-type deposits. *Computers & Geosciences*, 34(5), 491-502.

Boucher, A. (2009). Considering complex Image d'entraînement s with search tree partitioning. *Computers & Geosciences*, 35(6), 1151-1158.

Boucher, A. (2013). Strategies for modeling with multiple-point simulation algorithms. Closing the gap: advances in applied geomodeling for hydrocarbon reservoirs. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, Calgary, 67-73.

Boucher, A., Gupta, R., Caers, J., & Satija, A. (2010). Tetris: a Image d'entraînement generator for SGeMS. *Stanford Center for Reservoir Forecasting*.

Arpat, G. B., & Caers, J. (2005). A multiple-scale, pattern-based approach to sequential simulation. In *Geostatistics Banff 2004* (pp. 255-264). Springer Netherlands.

Arpat, G. B., & Caers, J. (2007). Conditional simulation with patterns. *Mathematical Geology*, 39(2), 177-203.

Calcagno, P., Chilès, J. P., Courrioux, G., & Guillen, A. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1), 147-157.

Comunian, A., Renard, P., & Straubhaar, J. (2012). 3D multiple-point statistics simulation using 2D Image d'entraînement s. *Computers & Geosciences*, 40, 49-65.

Cowan, E. J., Beatson, R. K., Fright, W. R., McLennan, T. J., & Mitchell, T. J. (2002). Rapid geological modelling. *App. Structural Geo. for Mining Expl. and Miing*.

Cowan, E. J., Lane, R. G., & Ross, H. J. (2004). Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D. *Mining Geo, 2004: innovations in Coal and Metalliferous Mining Geology*.

Cowan, E. J., Spragg, K. J., & Everitt, M. R. (2011). Modèle conceptuel-free geological modelling—An oxymoron or a value proposition. In *Eighth International Mining Geology Conference* (pp. 247-260). QueenstownMelbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

David, M. (1988). *Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation: Developments in geomathematics No. 6*: Elsevier, Amsterdam, 216 p.

De Souza, L. E., Costa, J. F. C., & Koppe, J. C. (2004). Uncertainty estimate in resources assessment: a geostatistical contribution. *Natural Resources Research*, 13(1), 1-15.

Dominy, S. C., Noppé, M. A., & Annels, A. E. (2002). Errors and uncertainty in mineral resource and ore reserve estimation: The importance of getting it right. *Exploration and Mining Geology*, 11(1-4), 77-98.

Dominy, S. C., Johansen, G. F., Cuffley, B. W., Platten, I. M., & Annels, A. E. (2000). Estimation and reporting of mineral resources for coarse gold-bearing veins. *Exploration and Mining Geology*, 9(1), 13-42.

Fallara, F., Legault, M., & Rabeau, O. (2006). 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): techniques and applications. *Exploration and Mining Geology*, 15(1-2), 27-43.

Fitzgibbon, A., Pilu, M., & Fisher, R. B. (1999). Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 21(5), 476-480.

FitzGerald, D., Chilès, J. P., & Guillen, A. (2009). Delineate 3D iron ore geology and resource models using the potential field method. In *11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition*.

GENIVAR (2010). *Technical Report and Feasibility Study for the Bracemac-McLeod Project, Matagami Area, Quebec*. GENIVAR report to Xstrata Zinc Canada. 316 p. and appendices.

Gibbs, B. (1990). Mineral industry software. *Mining Annual Review*, 219-35.

Glacken, I. M., & Snowden, D. V. (2001). Mineral resource estimation. *Mineral resource and ore reserve estimation-the Aus. Inst. Mining and Metallurgy guide to good practice*, 189-198.

Goodfellow, R., Consuegra, F. A., Dimitrakopoulos, R., & Lloyd, T. (2012). Quantifying multi-element and volumetric uncertainty, Coleman McCreedy deposit, Ontario, Canada. *Computers & Geosciences*, 42, 71-78.

Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G., Joly, A., & Ledru, P. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge: Part ii. modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1), 158-169.

Guo, J., Wu, L., Zhou, W., Jiang, J., & Li, C. (2016). Towards automatic and topologically consistent 3D regional geological modeling from boundaries and attitudes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2), 17.

He, X., Koch, J., Sonnenborg, T. O., Jørgensen, F., Schamper, C., & Christian Refsgaard, J. (2014). Transition probability-based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data. *Water Resources Research*, 50(4), 3147-3169.

Hill, E. J., Oliver, N. H., Cleverley, J., & Nugus, M. (2014). Modelling ore bodies of high-nugget gold using conditional probability. In *Mathematics of Planet Earth* (pp. 5-8). Springer Berlin Heidelberg.

Hillier, M., de Kemp, E., & Schetselaar, E. (2013). 3D form line construction by structural field interpolation (SFI) of geologic strike and dip observations. *Journal of Structural Geology*, 51, 167-179.

Hodkiewicz, P. (2013). Leapfrog: new software for faster and better 3D geological modelling. <http://www.srk.com.au> [Accessed June 2013].

Houlding, S. (1992). The application of new 3-D computer modelling techniques to mining. In *Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems* (pp. 303-325). Springer Netherlands.

Houlding, S. (2000). *Practical geostatistics: modeling and spatial analysis. Manual (Vol. 1)*. Springer Science & Business Media.

Hunter, J.D. (2007) Matplotlib: a 2D graphics environment. *Computing In Science & Engineering* 9(3):90-95, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.

Isaaks, E. H. (1991). *The application of Monte Carlo methods to the analysis of spatially correlated data (Doctoral dissertation, Stanford University)*.

Jackson, S., Fredericksen, D., Stewart, M., Vann, J., Burke, A., Dugdale, J., & Bertoli, O. (2003, November). Geological and geostatistical risk at the Golden Gift and Magdala gold deposits, Stawell, Victoria, Australia. In *5th International Mining Geology Conference, Bendigo, Victoria* (pp. 215-223).

Journel, A. G. (2007). Roadblocks to the evaluation of ore reserves—the simulation overpass and putting more geology into numerical models of deposits. *Orebody modeling and strategic mine planning, AusIMM, Melbourne, 2nd Edition, Spectrum Series, 14*, 29-32.

Journel, A., & Zhang, T. (2006). The necessity of a multiple-point prior model. *Mathematical Geology*, 38(5), 591-610.

Knight, R. H., Lane, R. G., Ross, H. J., Abraham, A. P. G., & Cowan, J. (2007, September). Implicit ore delineation. In *Proceedings of Exploration (Vol. 7, pp. 1165-1169)*.

Koltermann, C. E., & Gorelick, S. M. (1996). Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, 32(9), 2617-2658.

Lelièvre, P. G., Farquharson, C. G., & Hurich, C. A. (2012). Joint inversion of seismic traveltimes and gravity data on unstructured grilles with application to mineral exploration. *Geophysics*, 77(1), K1-K15.

Li, Z., & Wang, P. (2014). An Alternative Implementation of Indicator Kriging on Mineral Reserves 3D Modeling. *Open Cybernetics & Systemics Journal*, 8, 573-578.

Liu, J., Musialski, P., Wonka, P., & Ye, J. (2013). Tensor completion for estimating missing values in visual data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(1), 208-220.

Machuca-Mory, D. F., Munroe, M. J., & Deutsch, C. V. *Tonnage Uncertainty Assessment of Vein-Type Deposits Using Distance Functions and Location-Dependent Correlograms*.

Mariethoz, G., Renard, P., & Straubhaar, J. (2010). The Direct Sampling method to perform multiple-point geostatistical simulations. *Water Resources Research*, 46(11).

De Marsily, G., Delay, F., Goncalves, J., Renard, P., Teles, V., & Violette, S. (2005). Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 161-183.

Mathieu, L. (2016). *Optimisation des mailles de forage pour les besoins du calcul de ressources. Projet Consorem 2015-03*.

McInerney, P., Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., & Lees, T. (2005). Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia. *US Geological Survey Open-File Report, 1428*, 119-130.

McKinney, W. (2010). *Data Structures for Statistical Computing in Python*. In : *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Eds: Stéfan van der Walt and Jarrod Millman, pp. 51 - 56

Munroe, M. J., & Deutsch, C. V. (2008a). A methodology for modeling vein-type deposit tonnage uncertainty. Center for Computational Geostatistics Annual Report, 10.

Munroe, M. J., & Deutsch, C. V. (2008b). Full calibration of C and β in the framework of vein-type deposit tonnage uncertainty. Center for Computational Geostatistics Annual Report, 10.

Newson, J., Mannington, W., Sepulveda, F., Lane, R., Pascoe, R., Clearwater, E., & O'Sullivan, M. J. (2012). Application of 3D modelling and visualization software to reservoir simulation: Leapfrog Geothermal and TOUGH2. In Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.

Noranda (2001). Estimé des ressources pour les gisements de Persévérance et Equinox. Conférence « Development Stage Gate Review », 9 octobre 2001.

de Oliveira, S. B., Boisvert, J. B., & Deutsch, C. V. Assessment of thickness uncertainty using geostatistical simulation in the Rondon do Pará Bauxite Deposit, Brazil,.

Oliphant, T.E. (2006). Guide to NumPy. Livre du domaine publique, p. 371 [<http://web.mit.edu/dvp/Public/numpybook.pdf>]

Osterholt, V., Herod, O., & Arvidson, H. (2009). Regional Three-Dimensional Modelling of Iron Ore Exploration Targets. In Proceedings: Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Conference, Perth.

Osterholt, V., & Dimitrakopoulos, R. (2007). Simulation of modèle conceptuels and geometric features with multiple-point techniques: application at Yandi iron ore deposit. Orebody modelling and strategic mine planning, AusIMM, Spectrum Series, 14, 95-124.

Paiement, J.P., (2016) Interprétation et modélisation 3D des gîtes filoniens aurifères. Formation offerte par la SGS, conférence Québec Mines 2016.

Pearson, V. (2003). Paramétrage géométrique des cibles d'exploration. Projet Consorem 2002-08.

Pearson, V. (2004). Coefficient de géométrie favorable des cibles d'exploration ; phase 2. Projet Consorem 2003-04.

Python (2016). Python Software Foundation (depuis 1990). [<https://www.python.org/>]

Rachidi, M., & Duplessis, C. (2015). Mémoire – Mise à jour de l'estimation des ressources, projet du Lac à Paul, Québec, Canada – Février 2015. Rapport technique NI-43-101, p. 29

Remy N., Boucher A., Wu J. (2009) Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide. Cambridge University Press, p. 264.

Ray, A., & Srivastava, D. C. (2008). Non-linear least squares ellipse fitting using the genetic algorithm with applications to strain analysis. Journal of Structural Geology, 30(12), 1593-1602.

Sell (2015). Generating a 3D “Image d'entraînement” with Low-Rank Tensor Completion: A Multi-Stage Application. Master thesis, McGill University, Québec, Canada, p. 99.

Sides, E. J. (1994). Quantifying differences between computer models of orebody shapes. Geological Society, London, Special Publications, 79(1), 109-121.

Sides, E. J. (1997). Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. Geologische Rundschau, 86(2), 342-353.

Silva, D. A., & Deutsch, C. V. (2014). A Multiple “Image d'entraînement” Approach for Spatial Modeling of Geologic Domains. Mathematical Geosciences, 46(7), 815-840.

Srivastava, R. M. (2005). Probabilistic modeling of ore lens geometry: An alternative to deterministic modèle conceptuels. Mathematical Geology, 37(5), 513-544.

Straubhaar, J., Renard, P., Mariethoz, G., Froidevaux, R., & Besson, O. (2011). An improved parallel multiple-point algorithm using a list approach. *Mathematical Geosciences*, 43(3), 305-328.

Strebelle, S. (2002). Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, 34(1), 1-21.

Wu, J., Boucher, A., & Zhang, T. (2008). A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM. *Computers & Geosciences*, 34(12), 1863-1876.

Zhang, T., Bombarde, S., Strebelle, S. B., & Oatney, E. (2006). 3D porosity modeling of a carbonate reservoir using continuous multiple-point statistics simulation. *SPE Journal*, 11(03), 375-379.

ANNEXE I

Copie de la routine Python utilisée pour transformer une image .bmp en liste de 0 et 1 exportés en fichier .dat (similaire à .txt) qui peut être facilement importé par le logiciel SGeMS.

```
import numpy as np
import cv2 #Le module OpenCV fonctionne sous Python 2, pas sous les versions 3

#Parameters to be set by user
#Import image (.bmp)
img = cv2.imread('image.bmp', 0)

#Set location of max and min X and Y
A_min = 372940
A_max = 375940
B_min = 0
B_max = 450

#Set size of blocks of the output grille data
Output_Block_A = 5
Output_Block_B = 5

#Code starts here
A_range = A_max - A_min
B_range = B_max - B_min
A_step = A_range / np.size(img, axis = 1)
B_step = B_range / np.size(img, axis = 0)

#Scaling image
nA = int(A_range / Output_Block_A)
nB = int(B_range / Output_Block_B)
res = cv2.resize(img, (nA, nB), interpolation = cv2.INTER_LINEAR)

Coordinate = []
nY = 0
nX = 0
for j in range(0, np.size(res, axis = 0), 1):
    nY += 1
    for i in range(0, np.size(res, axis = 1), 1):

        if nY == 1 :
            nX += 1

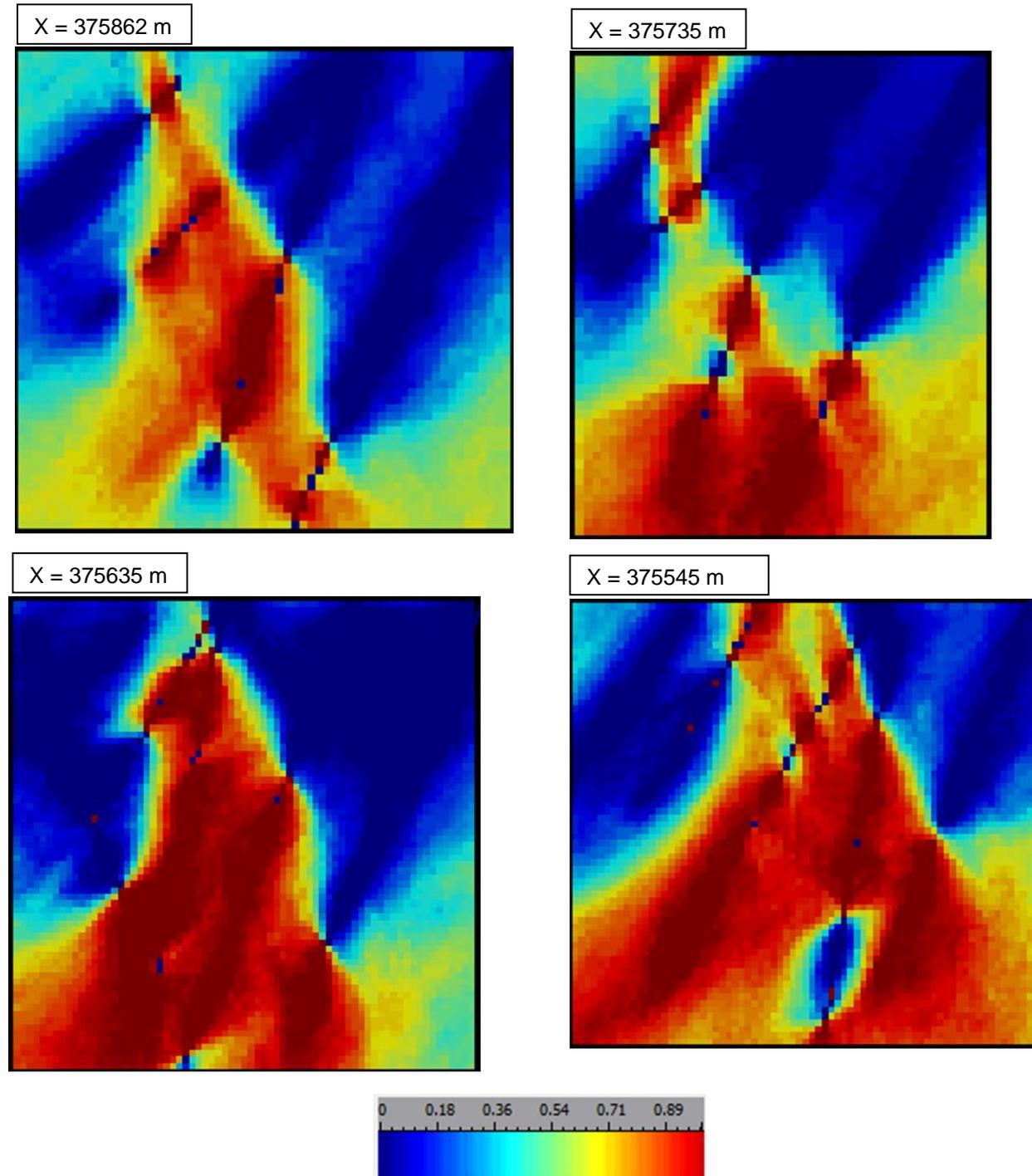
        if res[j,i] < 70:
            Coordinate.append(1)
        else:
            Coordinate.append(0)

Coordinate = np.array(Coordinate)

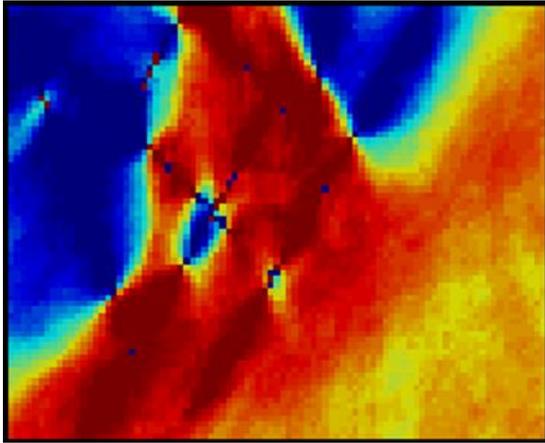
#Write to .dat file
f = open("TI_2D.dat", 'w')
f.write("TI_2D")
f.write("\n")
f.write('1')
f.write("\n")
f.write("TI")
f.write("\n")
for d in Coordinate:
    f.write("%d" % d)
    f.write("\n")
f.close()
```

ANNEXE II

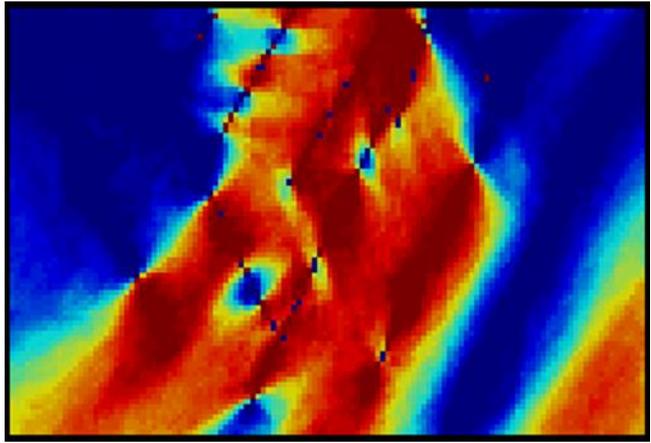
Cette annexe présente les résultats de simulations FILTERSIM réalisées le long de sections YZ à l'aide des forages de la zone à Paul (données d'Ariane). Les chiffres reportés ci-dessous correspondent à la position, en X, de chacune de ces sections. Les cartes (résolution = 5*5 m) présentent les probabilités, de 0 (0%, bleu) à 1 (100%, rouge), d'être situé dans l'unité de nelsonite. Pour les détails, voir section 4.4.3.



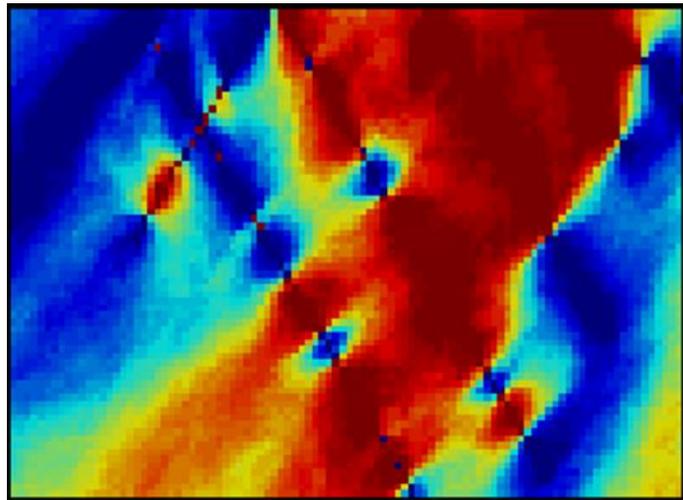
X = 375435 m



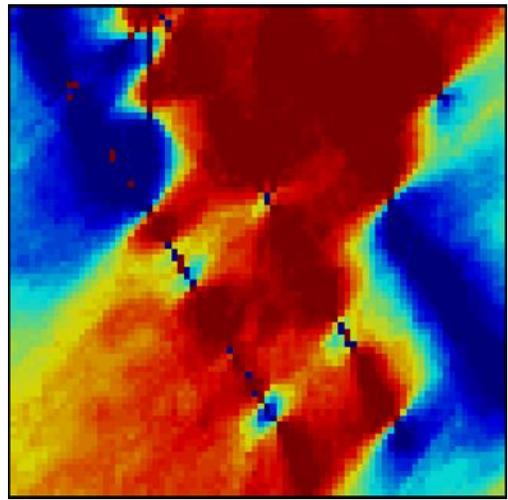
X = 375347 m



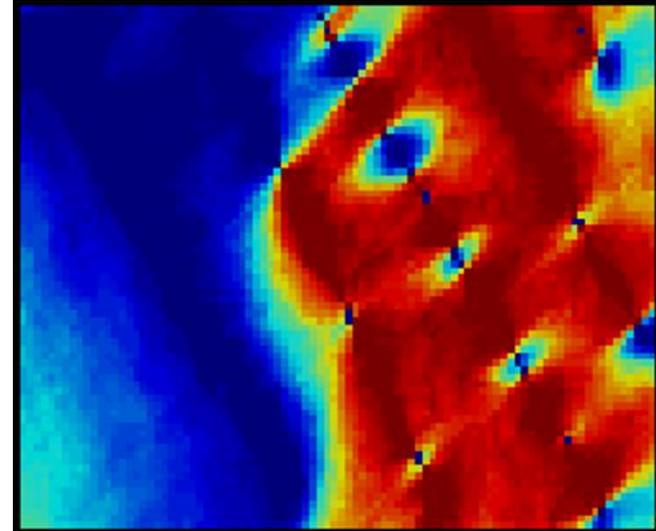
X = 375234 m



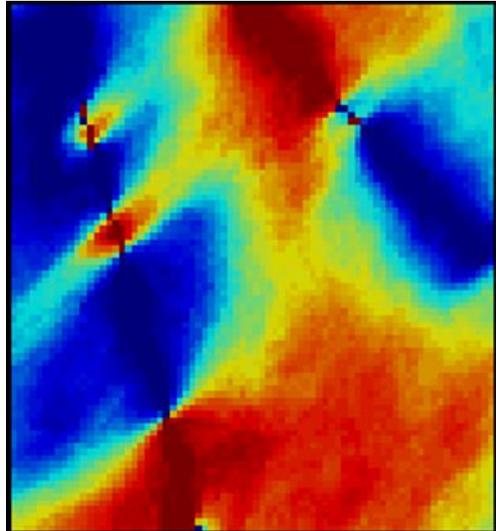
X = 375145 m



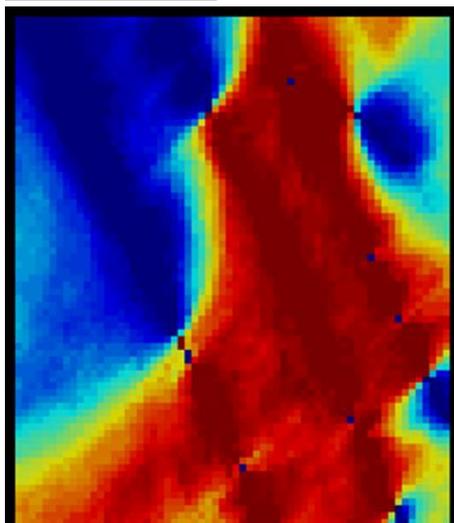
X = 375030 m



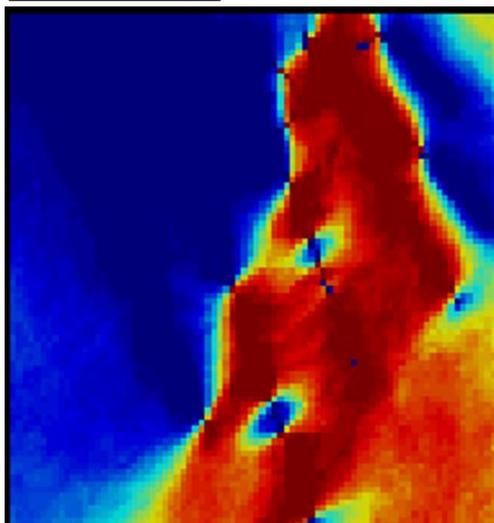
X = 374935 m



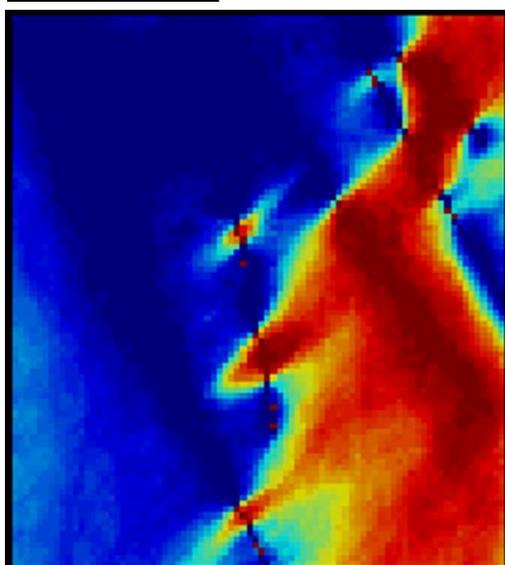
X = 374735 m



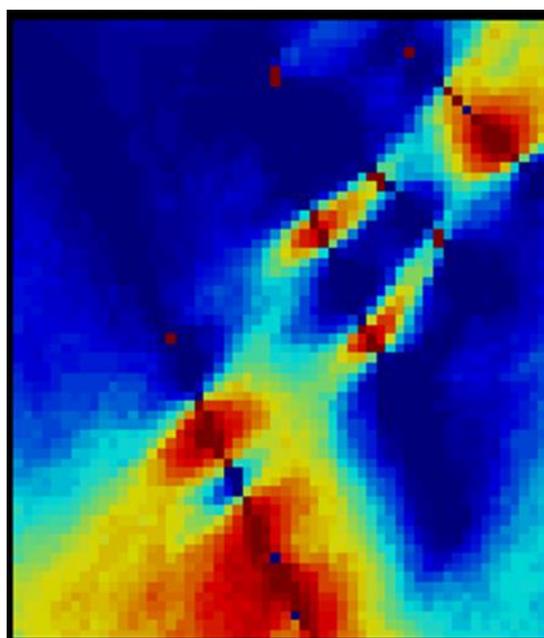
X = 374635 m



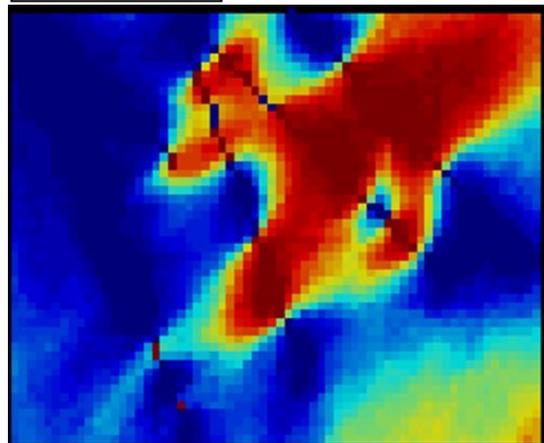
X = 374535 m



X = 373873 m



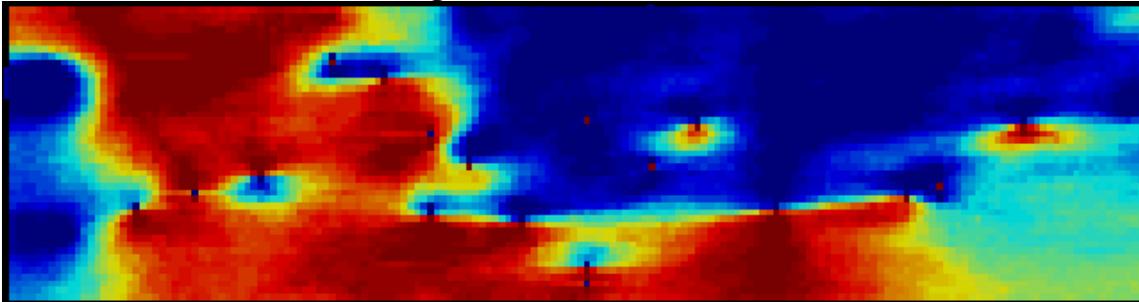
X = 373300 m



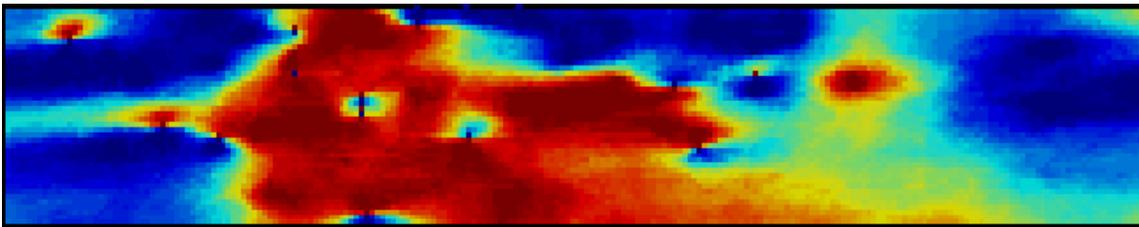
ANNEXE III

Cette annexe présente les résultats de simulations FILTERSIM réalisées le long de sections XZ et XY à l'aide des forages de la zone à Paul (données d'Arianne Phosphate). Les chiffres reportés ci-dessous correspondent à la position, en Y ou en Z, de chacune de ces sections. Les cartes présentent les probabilités, de 0 (0%, bleu) à 1 (100%, rouge) de se situer dans l'unité de nelsonite. Pour les détails, voir section 4.4.3.

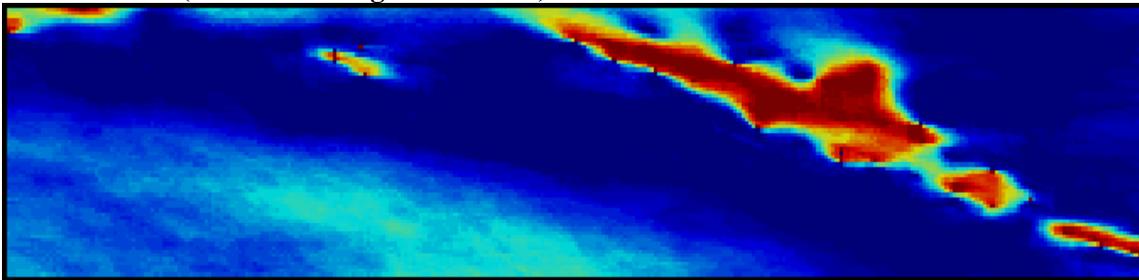
Y = 5529500 ±10m (résolution des grilles = 5 m)



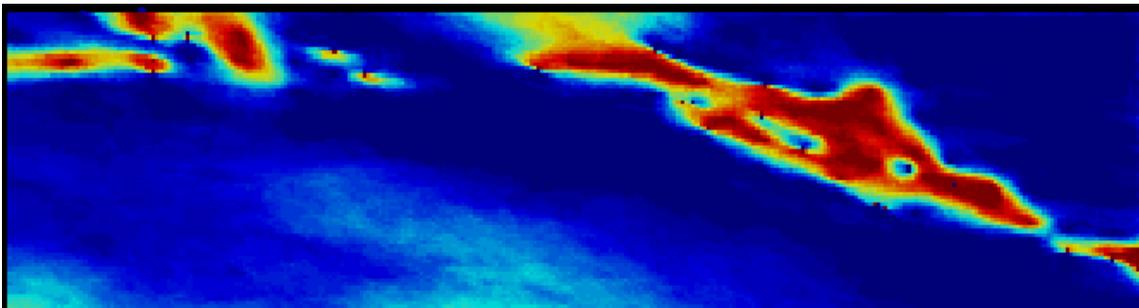
Y = 5529600 ±10m



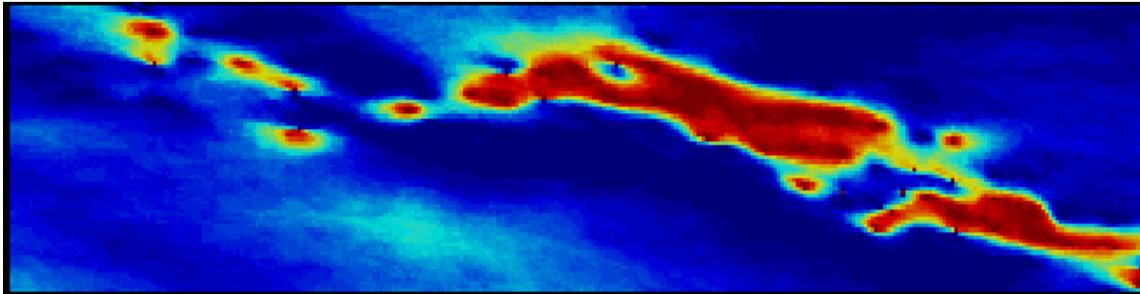
Z = 420 ±10m (résolution des grilles = 10 m)



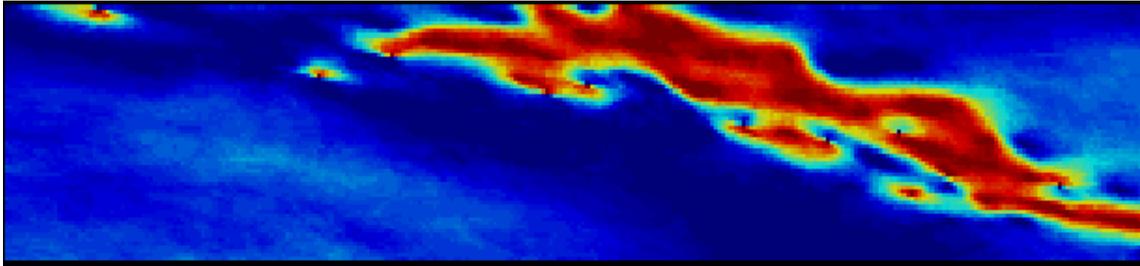
Z = 350 ±10m



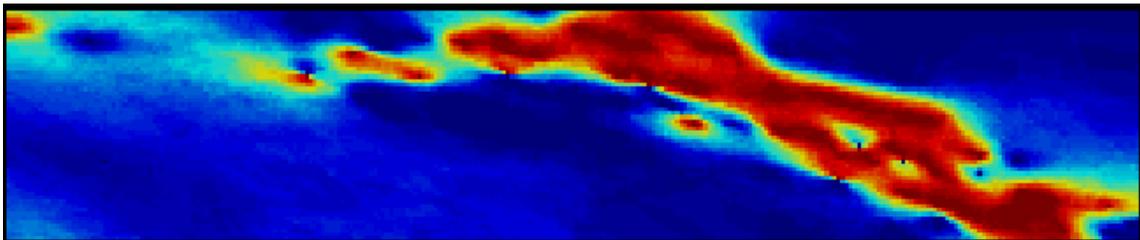
Z = 300 ±10m



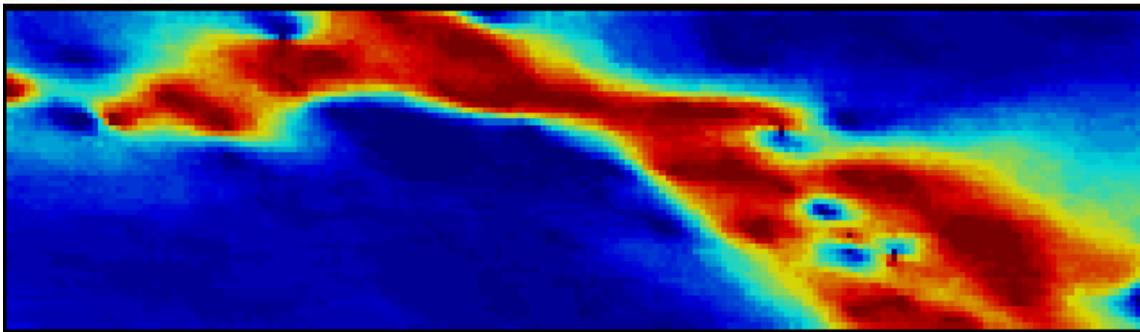
Z = 250 ± 10m



Z = 200 ± 10m



Z = 150 ± 10m



ANNEXE IV

Copie de la routine Python utilisée pour produire une image d'entraînement 3D à partir du modèle conceptuel d'Equinox.

```
import numpy as np

#Import data
Data = open('IN_3D.dat','r').readlines()
Data = [ i.strip().split() for i in Data[1:] ]
Data = np.array( Data, dtype=np.float )

#User defined
dx, dy, dz = 5, 5, 5

def Do_one(Type, X_min, Y_min, dx, dy, nx, ny, Grille, Data, k):
    if Type == 'XY':
        A_min, B_min = X_min, Y_min
        da, db, na, nb, a, b = dx, dy, nx, ny, 0, 1
    elif Type == 'YX' or Type == 'ZX':
        A_min, B_min = Y_min, X_min
        da, db, na, nb, a, b = dy, dx, ny, nx, 1, 0

    for i in range( na ):
        Ai = i*da + A_min
        Tested = []
        for D in Data:
            if D[a] >= Ai and D[a] < (Ai+da):
                Tested.append(D[b])

        if len(Tested) > 0:
            Tested = np.array(Tested)
            T_min = np.min(Tested)
            T_max = np.max(Tested)

            for j in range( nb ):
                Bj = j*db + B_min
                W1, W2, W3 = IndicesMat(i, j, k, Type)

                if Bj >= T_min and Bj <= T_max:
                    Grille[W1, W2, W3] = 1
    return Grille

def IndicesMat(i, j, k, Type):
    if Type == 'XY':
        W3, W2, W1 = i, j, k
    elif Type == 'YX':
        W3, W2, W1 = j, i, k
    elif Type == 'ZX':
        W3, W2, W1 = j, k, i
    return W1, W2, W3

#Get parameter
X_min = int(np.min(Data[:,0]))
Y_min = int(np.min(Data[:,1]))
Z_min = int(np.min(Data[:,2]))
X_max = int(np.max(Data[:,0]) + 1)
Y_max = int(np.max(Data[:,1]) + 1)
Z_max = int(np.max(Data[:,2]) + 1)
nx = int((X_max - X_min)/dx)
ny = int((Y_max - Y_min)/dy)
nz = int((Z_max - Z_min)/dz)

#Calculate
Grille_x = np.zeros((nz, ny, nx))
Grille_y = np.zeros((nz, ny, nx))
```

```

Grille_z = np.zeros((nz, ny, nx))
for k in range(nz):
    Zk = k*dz + Z_min
    Tested_xy = []
    for D in Data:
        if D[2] >= Zk and D[2] < (Zk+dz):
            Tested_xy.append([D[0], D[1]])

    Grille_x = Do_one('XY', X_min, Y_min, dx, dy, nx, ny, Grille_x, Tested_xy, k)
    Grille_y = Do_one('YX', X_min, Y_min, dx, dy, nx, ny, Grille_y, Tested_xy, k)

for j in range(ny):
    Yj = j*dy + Y_min
    Tested_xz = []
    for D in Data:
        if D[1] >= Yj and D[1] < (Yj+dy):
            Tested_xz.append([D[0], D[2]])
    Grille_z = Do_one('ZX', X_min, Z_min, dx, dz, nx, nz, Grille_z, Tested_xz, j)

#Add
Grille = np.zeros((nz, ny, nx))
Grille = Grille_x + Grille_y + Grille_z

#Small scale corrections
def Get_Cube(Grille, i, j, k):
    Sum = 0
    for a in range(3):
        for b in range(3):
            for c in range(3):
                Sum += Grille[k + (c-1), j + (b-1), i + (a-1)]
    return Sum

for i in range(nx):
    for j in range(ny):
        for k in range(nz):
            if Grille[k, j, i] == 2:
                if j > 0 and i > 0 and k > 0 and (j+1) < ny and (i+1) < nx and (k+1) < nz:
                    Sum = Get_Cube(Grille, i, j, k)
                    if Sum >= 78:
                        Grille[k, j, i] = 3

#Get coordinates
Grille_Coord = []
for k in range(nz):
    for j in range(ny):
        for i in range(nx):
            Code = Grille[k, j, i]
            Xx = i*dx + X_min
            Yy = j*dy + Y_min
            Zz = Z_max - k*dz
            Grille_Coord.append([Xx, Yy, Zz, Code])

#Extract
f = open("OUT_3D.dat", 'w')
f.write("Equinox" '\n')
f.write("4" '\n')
f.write("X" '\n')
f.write("Y" '\n')
f.write("Z" '\n')
f.write("Type" '\n')
for G in Grille_Coord:
    f.write("%s" % G[0])
    f.write("%s" % G[1])
    f.write("%s" % G[2])
    if G[3] == 3:
        f.write("1" '\n')
    else:
        f.write("0" '\n')
f.close()

```

ANNEXE V

Coupes réalisées dans les grilles contenant les résultats des simulations conditionnelles (c.-à-d. probabilités de se situer dans la zone minéralisée) sur la lentille Equinox à partir de divers jeux de données (forages espacés de façon diverses – plusieurs mailles testées). Les données sont présentées sous la forme de coupes XZ (pour $Y = 5515413,5 \pm 2,5m$), et les points représentés ci-dessous correspondent au contour des zones ayant une probabilité $>70\%$ de se situer dans la zone minéralisée (contour exporté du logiciel SGeMS, à l'aide d'une routine Python). Chaque contour exporté est comparé au contour noir, réalisé à partir du résultat obtenu lorsque tous les forages sont utilisés.

