

---

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

---

**Projet 2015-03**

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., 2016. Optimisation des mailles de forages pour les besoins du calcul de ressources. Rapport, Projet CONSOREM 2015-03, 80 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](mailto:consorem@uqac.ca)  
Site Web : [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

Les campagnes de forages permettent d'échantillonner les zones minéralisées. Ces échantillons doivent servir à :

- Délimiter le dépôt dans l'espace et documenter la variation spatiale des teneurs des substances d'intérêt, le tout dans le but de permettre l'interpolation spatiale de ces substances et le calcul des ressources.
- Documenter la distribution spatiale et la teneur locale des substances d'intérêt, afin de permettre la planification des opérations de minage (calculs de réserve, etc.).

Ce projet s'intéressera principalement à la quantité minimale d'échantillons (ou forages) nécessaires au calcul des ressources ; c.-à-d. aux échantillons qui permettent d'approximer au mieux les teneurs en Ag, Au, Cu, Zn, Pb, et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> globales (ou moyenne) d'une zone. L'espacement optimal entre les forages nécessaires à l'approximation de cette moyenne sera particulièrement étudié.

Ce rapport contient également une présentation des principaux outils d'interpolation spatiale utilisés (IDW et krigeage) et des méthodes qui permettent de porter un jugement sur la qualité de ces interpolations (simulations conditionnelles et autres outils) ; c.-à-d. aux outils qui permettent de classer les ressources.

La réflexion sera menée à partir de modèles de blocs appartenant à trois des partenaires du CONSOREM. Ces modèles ont permis la simulation de diverses campagnes de forages ; c.-à-d. d'échantillonnages des modèles de blocs. Les échantillons ainsi recueillis ont permis des calculs de moyennes et de variogrammes, entre autres.

Il ressort de cette étude que le gisement de phosphate de la zone Paul pourrait être défini à partir de forages aux 200 m (modèle de blocs d'Arianne-Phosphate), que celui de Bracemac pourrait être défini à partir d'une maille aux 20-30 m, voir 40 m pour les lentilles de grande taille (modèles de blocs de GLENCORE) et que celui de La Ronde s'accommode mieux d'une maille de forages aux 30-40 m, selon la marge d'erreur que l'on juge acceptable (modèle de blocs de Agnico-Eagle).

La réflexion menée ici devra être étendue à d'autres gîtes et aborder les diverses problématiques (calculs de réserves en particulier) qui n'ont pas pu être traitées dans le cadre de ce projet.

---

## 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 ÉTAPES DU CALCUL DES RESSOURCES.....	2
2.1 Échantillonnage .....	2
2.1.1 Distribution des échantillons.....	2
2.1.2 De l'échantillon aux résultats d'analyse .....	2
2.1.3 Préparation des résultats d'analyses .....	3
2.2 Interpolation spatiale des teneurs.....	3
2.2.1 Statistique exploratoire .....	3
2.2.2 Taille des blocs.....	4
2.2.3 Méthodes d'interpolation .....	5
2.2.4 Méthodes de transformation.....	6
2.2.5 Validation des résultats .....	6
2.3 Classification des ressources .....	7
2.3.1 Normes internationales.....	7
2.3.2 Méthodes classiques .....	7
2.3.3 Simulations conditionnelles .....	8
2.4 Résumé .....	9
3 PARAMÈTRES ÉTUDIÉS.....	10
3.1 L'importance du variogramme.....	10
3.2 L'importance de la moyenne .....	11
4 MÉTHODOLOGIE et DONNÉES .....	12
4.1 Méthodologie .....	12
4.2 Présentation des données.....	14
4.3 Présentation des outils .....	14
5 ZONE PAUL.....	16
5.1 Données de forages (zone Paul).....	16
5.2 Tests effectués sur les données de forages (zone Paul) .....	19
5.3 Modèle de blocs (zone Paul) .....	22
5.4 Test des techniques d'interpolation spatiales (IDW et krigeage) .....	24
5.5 Conclusions pour la zone Paul.....	27
6 DONNÉES SMV de Bracemac-McLeod .....	28
6.1 Informations sur les SMV de Bracemac-McLeod.....	28
6.2 Données de Bracemac Upper: MDL_Data_30.....	28

6.3	Données de <i>Bracemac Main</i> : MDL_Data_22.....	32
6.4	Données de <i>Bracemac Key Tuffite</i> : MDL_Data_23 .....	34
6.5	Données de <i>Bracemac Main</i> : MDL_Data_22 — Simulation conditionnelle .....	38
6.6	Données de <i>Glencore</i> : McLeod — MDL_DATA_40.....	41
6.7	Conclusions pour les données de <i>Glencore</i> .....	44
7	DONNÉES DE LA RONDE .....	46
7.1	Informations sur le SVM de La Ronde .....	46
7.2	Préparation des données .....	46
7.3	Calculs de moyennes .....	47
7.4	Moyennes locales.....	48
7.5	Simulations conditionnelles .....	66
8	CONCLUSIONS .....	71
8.1	Discussion et conclusions .....	71
8.2	Exemple de procédure .....	71
8.3	Perspectives .....	75
	RÉFÉRENCES .....	76

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1	: Simulation d'une campagne de forages. Les angles alpha et bêta servent à orienter les forages. Les points rouges représentent le modèle de blocs de la lentille <i>Bracemac Upper</i> (données de <i>Glencore</i> ). Les paramètres E-X et E-Y servent à définir l'espacement entre les forages (dans l'exemple cité dans cette section, E-X = E-Y = 5 m). Le code utilisé est python 3.4, et l'IDL est « <i>Anaconda-Spyder</i> ».....	13
Figure 2	: Vue en plan de 4 campagnes de forages simulés. Pour tester un espacement de 5 m entre les forages, il faut simuler 25 campagnes de forages et utiliser E-X = E-Y = 5 m.....	13
Figure 3	: Structure filaire ( <i>wireframes</i> ) des lentilles de sulfures massifs de <i>Bracemac</i> (données de <i>Glencore</i> ). Le logiciel utilisé est Autodesk DWG TruView 2016. ....	15
Figure 4	: Vue dans l'espace (a) et en plan (b) des échantillons de forages de la zone Paul (données d'Arianne-Phosphate), visualisés sous Python. Les forages ont été approximés à des lignes droites afin de rattacher des données x, y et z à chaque échantillon. Les points rouges (a) et verts (b) soulignent les échantillons les plus proches de la surface.....	16
Figure 5	: Histogramme des distances entre chaque paire d'échantillons proches de la surface, montrant que l'espacement moyen entre les forages est de 100 m (voir lignes pointillées bleues). ....	17
Figure 6	: Histogramme des valeurs de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%pds) des échantillons de forages. ....	18
Figure 7	: a) Variogramme expérimental obtenu à partir des échantillons de forages (après application des segments composites et de variable centrée réduite. Le pas choisi ( <i>bandwidth</i> ) est de 25 m. Le plateau est atteint pour une portée de 300 m environ ; b) Variogrammes directionnels (sur tous les échantillons, après application de la variable centrée réduite pour les directions : 1) de haut en bas par tranches de 10 m (pas = 10) ; 2) est-ouest par tranches de 10 m (pas = 25) ; 3) nord-sud par tranches de 10 m (pas = 25). ....	18
Figure 8	: Variogramme et vue en plan des 73 forages retenus pour le test 1. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 50-100 m dans la direction N-S. ....	20

Figure 9 : Variogramme et vue en plan des 75 forages retenus pour le test 2. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 50-100 m dans la direction N-S. ....	20
Figure 10 : Variogramme et vue en plan des 31 forages retenus pour le test 3. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 100-200 m dans la direction N-S. ....	21
Figure 11 : Variogramme et vue en plan des 32 forages retenus pour le test 4. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 100-200 m dans la direction N-S. ....	21
Figure 12 : Variogramme et vue en plan des 23 forages retenus pour le test 1. Leur espacement moyen est de 300 m en E-O et de 200 m dans la direction N-S.....	22
Figure 13 : Histogrammes des teneurs en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%pds) du modèle de blocs de la zone Paul. ....	23
Figure 14 : Probabilités de s'approcher de la valeur de la moyenne globale de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%pds) à partir d'échantillons pris le long de forages simulés. On observe qu'à partir d'une maille au 250 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne deviennent trop faibles. ....	23
Figure 15 : a) Boîtes à moustaches de l'ensemble des moyennes calculées à partir de forages simulés tous les 100 m (100 tests), 200 m (400 tests), et 300 m (900 tests). Le trait rouge représente la moyenne globale (M <sub>P</sub> ); b) Boîtes à moustaches de l'ensemble des erreurs calculées à partir de forages simulés tous les 100 m, 200 m, et 300 m. ....	24
Figure 16 : Figure montrant les différents variogrammes que l'on peut obtenir en simulant des forages espacés de 100 m, 200 m, 250 m et 300 m (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des variogrammes obtenus. Les variogrammes ont été calculés pour P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%pds). ....	24
Figure 17 : a) Carte des valeurs de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%pds) à l'élévation -2,5 m (extrait du modèle de blocs de la zone Paul). L'un des 25 tests effectués sur les données de la carte (a) est montré par les cartes (b), (c), (d) : b) échantillons extraits de la carte (a), simulant une maille de forages au 50 m ; c) interpolation type IDW à partir des échantillons pris au 50 m ; d) interpolation de type krigeage. ....	26
Figure 18 : a) Boîtes à moustaches de l'ensemble des moyennes calculées à partir d'échantillons pris aux 50 m (voir Figure 17-b) et d'interpolations de type IDW et krigeage (25 tests, 25 données dans chaque boîte à moustache) ; b) Boîtes à moustaches de l'ensemble des erreurs calculées pour les moyennes calculées par les 25 tests (25 données par boîte à moustaches). La ligne rouge positionne la moyenne « réelle » (voir Figure 17-a).....	27
Figure 19 : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu et Zn de la lentille de <i>Bracemac Upper</i> (MDL_Data_30). ....	29
Figure 20 : Probabilité de s'approcher des valeurs de moyenne, médiane, et écart-type à partir d'échantillons pris à divers intervalles, pour les teneurs en Cu. ....	30
Figure 21 : Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne (M <sub>E</sub> ) pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille au 20 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne globale (M <sub>P</sub> ) deviennent faibles.....	30
Figure 22 : Figure montrant les 100 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 10 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 100 variogrammes obtenus. ..	31
Figure 23 : Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus. ..	31
Figure 24 : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de <i>Bracemac Main</i> (MDL_Data_22). ....	32
Figure 25 : Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille aux 20 m à 40 m, selon les substances, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne deviennent trop faibles.....	33
Figure 26 : Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus. ..	33
Figure 27 : Figure montrant les 1600 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 1600 variogrammes obtenus.....	34
Figure 28 : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de <i>Bracemac Upper</i> (MDL_Data_30). ....	35
Figure 29 : Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille au 20 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne « vraie » deviennent trop faibles. ....	36
Figure 30 : Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus. ..	36

Figure 31 : Figure montrant les 900 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 30 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 900 variogrammes obtenus. La médiane des 400 variogrammes qui peuvent être calculés à partir d'échantillons pris aux 20 m est également montrée (ligne rouge). .....	37
Figure 32 : Figure montrant les 1600 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 1600 variogrammes obtenus. La médiane des 400 variogrammes qui peuvent être calculés à partir d'échantillons pris aux 20 m est également montrée (ligne rouge). .....	37
Figure 33 : Cartes du test 1 (taille des blocs = 5 m*5m). a) Carte des teneurs en Cu produite à partir du modèle de blocs de <i>Bracemac Main</i> ; b) Position des forages aux 25 m simulés pour les besoins de ce test ; c) Combinaison (moyenne) des teneurs en Cu produites par les 100 simulations. Notez que cette carte est très similaire à celle qui pourrait être obtenue avec les échantillons du forage aux 25 m et une interpolation de type krigeage ; d-e-f) Exemples de cartes produites par 3 des 100 simulations effectuées. ....	39
Figure 34 : Carte du test 1 (taille des blocs = 5 m*5m). Carte des écarts types. Pour chacun des 910 points de la carte, 100 teneurs de Cu équiprobables ont été simulées. Les écarts-types ont été calculés à partir de ces 100 données, pour chacun des points du modèle.....	40
Figure 35 : Cartes du test 2 (taille des blocs = 10 m*10m) ; a) Combinaison (moyenne) des teneurs en Cu produites par les 100 simulations. Notez que cette carte est très similaire à celle qui pourrait être obtenue avec les échantillons du forage aux 25 m et une interpolation de type krigeage ; b) Carte des écarts-types. Pour chacun des 280 points de la carte, 100 teneurs de Cu équiprobables ont été simulées. Les écarts types ont été calculés à partir de ces 100 données, pour chacun des points du modèle. Les échelles de couleurs sont les mêmes que celles utilisées aux figures 33 et 34. ....	40
Figure 36 : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de <i>McLeod</i> (MDL_Data_40). .	42
Figure 37 : Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille aux 40 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne « vraie » deviennent faibles.....	42
Figure 38 : Sélection de 200 variogrammes parmi les 400 que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 200 variogrammes obtenus. ....	43
Figure 39 : Sélection de 800 variogrammes parmi les 1600 que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 800 variogrammes obtenus. ....	43
Figure 40 : Boîtes à moustaches des erreurs entre les moyennes calculées à partir d'échantillons pris tous les 100 m (a) et 10 m (b) (en x et en y) et la moyenne globale. Chaque boîte contient 400 (a) et 25 (b) données, car les forages ont été décalés de 5 m (a) et 2 m (b) en x et en y d'un test à l'autre.....	47
Figure 41 : Sous-échantillonnage du modèle de blocs, par intervalles de 5 m * 5 m. ....	48
Figure 42 : Zoom sur le bloc modèle de La Ronde, qui montre la simulation d'une campagne de forages aux 5 m * 5 m sur les ArcGIS. Les points correspondent aux blocs du modèle vu en 2D (après rotation du modèle de blocs), et les points bleus correspondent aux « échantillons de forages » prélevés par intervalles de 5 m, dans un rayon de 0,5 m autour de chaque forage simulé. ....	49
Figure 43 : Interpolation spatiale (IDW) des échantillons de forages simulés aux 5 m (pour les blocs, N = 5 m). L'échelle des couleurs est identique à celle utilisée pour la Figure 37, sauf pour le blanc (valeurs aberrantes et valeurs hautes).....	50
Figure 44 : Interpolation spatiale (IDW) des échantillons de forages simulés aux 10 m (pour les blocs, N = 5 m). L'échelle des couleurs est identique à celle utilisée pour la Figure 41, sauf pour le blanc (valeurs aberrantes, valeurs hautes).....	51
Figure 45 : Écarts types entre les valeurs prédites à partir de diverses mailles de forages, pour les teneurs en Au, Ag, Cu, Zn et Pb. ....	52
Figure 46 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 5 m (N). Les cartes d'erreurs obtenues pour les tests Au (figure 53) et Ag (figure 54) sont présentées ci-dessous.....	54
Figure 47 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 10 m (N). ....	54

Figure 48 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 20 m (N). Les cartes d'erreurs obtenues pour les tests Au (figure 55) et Ag (figure 56) sont présentées ci-dessous.....	55
Figure 49 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 30 m (N). .....	55
Figure 50 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 40 m (N). .....	55
Figure 51 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 50 m (N). .....	56
Figure 52 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 100 m (N). .....	56
Figure 53 : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux 5 m (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux 5 m (N, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour Au. ....	57
Figure 54 : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux 5 m (sous-étape 2,4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux 5 m (N, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour Ag. ....	58
Figure 55 : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux 20 m (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux 20 m (N, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour Au. ....	59
Figure 56 : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux 20 m (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux 20 m (N, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour Ag. ....	60
Figure 57 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 5 m (N). .....	62
Figure 58 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 10 m (N). .....	62
Figure 59 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 20 m (N). .....	63
Figure 60 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 30 m (N). .....	63
Figure 61 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 40 m (N). .....	64
Figure 62 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 50 m (N). .....	64
Figure 63 : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux 100 m (N). .....	64
Figure 64 : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (krigeage ordinaire) aux 5 m (sous-étape 2.4) et le modèle de bloc sous-échantillonné aux 5 m (N, étape 3). Cartes des erreurs pour Au. ....	65
Figure 65 : Teneurs en Au interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.....	68

Figure 66 : Teneurs en Ag interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écarts types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.....	68
Figure 67 : Teneurs en Cu interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écarts types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.....	69
Figure 68 : Teneurs en Zn interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écarts types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.....	69
Figure 69 : Teneurs en Pb interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écarts types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.....	70
Figure 70 : a) Blocs extraits du modèle de blocs MDL_Data_23 (code couleur : teneurs en Cu ; moyenne = 1,0253 %pds) ; b) interpolation de type krigeage simple effectuée sous ArcGIS à partir des blocs de la figure (a) (moyenne des teneurs en Cu = 1,0033 %pds). .....	73
Figure 71 : a) Interpolation de type IDW effectuée à partir de forages simulés aux 20 m ; b-c) Interpolation de type krigeage simple effectuée à partir de forages simulés aux 10 m (b) et aux 10 m et 5 m par endroits (c) ; d) Résultats de 100 simulations conditionnelles calculées avec l'outil de ArcGIS, à partir de forages aux 10 m (voir carte b) (carte d : carte des écarts-types ; les zones en rouges sont les moins faciles à interpoler et mériteraient d'être mieux forées – voir carte c). Les croix blanches sur fond noir représentent les trous de forages.....	73
Figure 72 : Variogramme calculé sous ArcGIS, à partir de tous les blocs extraits du modèle de blocs MDL_Data_23 (Figure 70-a). Les paramètres du variogramme sont : <i>Effet pépité</i> = 0, <i>plateau</i> = 0,836 32, et <i>portée</i> = 23 405.....	74
Figure 73 : a) Échantillons (forages aux 10 m) ; b-c) « kriging variances », calculées à partir d'échantillons pris aux 10 m (a) et d'interpolations de types krigeage ordinaire (b) et krigeage simple (c) ; d) Résultats (carte des écarts-types) de 100 simulations conditionnelles calculées avec l'outil d'ArcGIS, à partir de forages aux 10 m (a). L'échelle des couleurs est identique pour les figures (a, b, c). .....	74

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Données des modèles de décimation des forages de la zone Paul. ....	19
Tableau 2 : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de <i>Bracemac Upper</i> . .....	44
Tableau 3 : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de <i>Bracemac Main</i> . .....	44
Tableau 4 : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de <i>Bracemac Key Tuffite</i> . .....	45
Tableau 5 : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de <i>McLeod</i> .....	45
Tableau 6 : Résumé des espacements entre les forages utilisés en 2005 et avant (Gosselin, 2005). ....	46
Tableau 7 : Résultat 3 (pour plus de détails, voir figures 46 à 56). .....	53
Tableau 8 : Effets d'erreurs de 20 % et 30 % sur le calcul des ressources en Au, Ag, Cu, Zn et Pb.....	53
Tableau 9 : Résultat 3 (pour plus de détails, voir figures 57 à 63). .....	61
Tableau 10 : Écarts types moyens obtenus à partir des simulations conditionnelles, traduits en pourcentages d'erreurs pour les diverses substances testées. ....	67

---

## 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

---

Définir une maille de forages adaptée à l'échantillonnage d'un dépôt est une problématique importante du monde minier. Les principaux paramètres à définir sont : 1) l'orientation des forages et leurs profondeurs ; et 2) l'espacement, en surface, entre les forages. Les forages ainsi définis doivent permettre de délimiter le dépôt dans l'espace et de documenter la distribution spatiale des substances d'intérêt, afin de réaliser un calcul des ressources juste et précis. L'échantillonnage en forage sert aussi à la planification des opérations de minage et aux calculs de réserves. Cette dernière thématique n'a pas pu être abordée dans le cadre de ce projet, qui s'intéressera principalement aux mailles de forages optimales pour les calculs des ressources.

De nombreuses études ont comparé l'estimation des ressources au minerai miné et ont montré que l'estimation était rarement proche de la réalité (par exemple, King et al., 1982, Agarwal et al., 1984, Burmeister, 1988, Knoll, 1989, Clow, 1992, McCarthy, 2003). La partie essentielle de tout estimé est la phase d'échantillonnage. Ce projet se propose de réfléchir sur la distribution spatiale optimale de la prise d'échantillons.

Les forages sont généralement orientés perpendiculairement aux couches stratigraphiques ou à l'horizon porteur. Ainsi, lorsqu'un dépôt a une forme lenticulaire et que sa géométrie est contrôlée par ces couches stratigraphiques, les forages sont perpendiculaires au plan qui contient les axes maximaux et intermédiaires de la lentille pouvant être approximée par une forme ellipsoïde. Ce point ne pose pas de difficultés particulières et ne sera pas détaillé dans le cadre de ce projet.

Le choix de l'espacement entre les forages est plus problématique et sera ici étudié en détail. Le principal enjeu peut être simplifié comme suit. Une maille trop serrée par rapport aux besoins de l'estimation entraîne des coûts supplémentaires. À l'opposé, une maille trop large ne permet pas de supporter le modèle d'estimation.

Bien que certaines normes recommandent l'usage des meilleures pratiques pour l'espacement entre les forages (CIM, 2014), il n'existe pas de recommandations chiffrées précises pour un type de substance donné. Le choix est généralement fait de façon empirique, au mieux des connaissances et de l'expérience de la personne qualifiée. Bien sûr, cela tient en grande partie au comportement géologique de la substance recherchée qui dans certains cas peut être relativement continue (le cas d'une lentille de sulfures massifs par exemple) ou au contraire le erratique comme pour l'or. Au-delà des règles du pouce et du principe de précaution, il devient d'intérêt de définir une maille optimale, et ce le plus tôt possible dans le déroulement d'un projet.

En pratique, deux façons de faire peuvent être envisagées : 1) prélever quelques échantillons qui serviront à caractériser la population étudiée puis optimiser la maille de forages en fonction de ces données ; et 2) comparer le gisement étudié à d'autres gisements bien documentés, afin d'optimiser la maille de forages au plus tôt dans le processus d'échantillonnage. Une bonne pratique serait sans doute une combinaison de ces deux méthodes. Les compagnes des forages servent de base au calcul des ressources. Ce calcul s'accompagne d'une classification en tant que ressources inférées, indiquées, et mesurées, ce qui requiert une évaluation de l'incertitude liée au calcul. Il est en particulier nécessaire d'évaluer la performance des outils d'interpolation communément utilisés, par exemple l'inverse de la distance (*IDW Inverse Distance Weighting*) et le krigeage. De plus, les simulations conditionnelles, une technique considérée comme plus efficace, seront présentées dans ce rapport.

Ce rapport se divise en trois parties. La première résume les différentes étapes du calcul des ressources et permet de définir la problématique étudiée plus en détail. La deuxième partie détaille les calculs effectués sur des modèles de blocs appartenant à trois des partenaires du CONSOREM. La dernière partie est une discussion.

---

## 2 ÉTAPES DU CALCUL DES RESSOURCES

---

Le calcul des ressources est un processus long et complexe. Ci-dessous, les principales étapes de ce calcul sont détaillées. L'emphase est mise sur les éléments sur lesquels ce projet se propose de mener une réflexion.

### 2.1 Échantillonnage

Une campagne de forages vise à la récupération d'échantillons qui sont utilisés dans trois buts bien précis : 1) délimiter un gisement dans l'espace (volume) ; 2) estimer la densité du volume délimité (tonnage) ; et 3) estimer les teneurs en métaux économiques dans le volume délimité (teneur).

Dans le cadre de ce projet, l'estimation des teneurs sera discutée en priorité, mais la réflexion menée ci-dessous peut être appliquée à l'estimation de la densité. Pour ce qui est du volume, qui fait appel à la définition d'une teneur de coupure (*cut-off*) à l'interprétation en 3D des structures et des unités géologiques de l'encaissant, etc., la problématique est différente et ne sera pas détaillée dans le cadre de ce projet.

#### 2.1.1 Distribution des échantillons

Les teneurs moyennes sont généralement calculées à l'aide de méthodes d'interpolation spatiale. De telles méthodes fonctionnent de façon optimale si les échantillons utilisés sont régulièrement répartis dans l'espace. Les échantillons pris lors d'une campagne de forages devraient donc être régulièrement répartis dans l'espace, ce qui est rarement possible, car : 1) le dépôt n'est pas toujours entièrement accessible au forage ; 2) l'espacement entre les forages peut varier du simple au double d'un endroit à l'autre du gisement ; et 3) certains échantillons peuvent être très rapprochés dans l'espace (valeurs redondantes : analyses effectuées deux fois, trous jumeaux (*twin holes*), etc.).

Ainsi, il est nécessaire que les méthodes d'interpolation s'adaptent à ces réalités de terrain (voir section 2.2.3). Pendant l'échantillonnage, une décision importante est de définir l'espacement entre les forages et leurs orientations. Cette problématique, et l'influence que cette décision a sur le calcul final des ressources font l'objet de ce projet.

**Trous jumeaux** — Cette technique permet de vérifier la qualité des forages anciens et de contrôler la qualité des nouveaux forages. Mais surtout, elle permet de documenter les variations à petite échelle et facilite l'interprétation des variogrammes.

#### 2.1.2 De l'échantillon aux résultats d'analyse

Un échantillon doit donner des indications précises et justes. Ceci touche des problématiques d'assurance et de contrôle de la qualité (QA-QC), qui ont été abordées par un précédent projet CONSOREM (projet 2013-05 ; Rafini 2014) et ne seront pas discutées dans le cadre de ce projet.

Par contre, une remarque sera faite ici sur le problème de **sélectivité**, qui est la tendance à échantillonner les zones les plus minéralisées et à laisser de côté le matériel moins riche en métaux et situé, par exemple, entre les sulfures et à l'intérieur du volume délimité par la teneur de *coupure*. Ceci produit des échantillons peu représentatifs du volume en question, et peut causer une sous-estimation de la dilution et une surestimation des grades. Une solution possible est de prendre des échantillons à intervalles strictement réguliers le long d'un forage.

Une autre remarque sera faite sur la théorie de l'échantillonnage, et surtout sur la partie de cette théorie qui stipule qu'un échantillon doit contenir suffisamment de grains de la substance à analyser (grains d'or par exemple) pour que la valeur analysée soit prédictible et reproductible (Guy, 1969). Ceci est particulièrement problématique pour l'or, lorsque le gisement présente un effet pépité important, car il est impossible de prendre un échantillon suffisamment grand pour respecter l'impératif de la théorie de l'échantillonnage. Des solutions particulières existent cependant pour l'or, qui sont : 1) prendre un échantillon de très grande taille afin de valider le calcul de ressource ; et 2) travailler avec des domaines de grande taille, qui permettent de rassembler un grand nombre d'échantillons et d'estimer une teneur moyenne pour chaque domaine.

### **2.1.3 Préparation des résultats d'analyses**

Une fois les résultats d'analyses reçus et les vérifications (QA-QC) faites, les échantillons peuvent être préparés à l'aide des outils listés ci-dessous.

**Segmentation** – La première chose à faire est de transformer les échantillons pris le long des forages en segments de taille constante, à chacun desquels une teneur est attachée. À cette étape, il faut décider d'une taille pertinente pour les segments. Si la minéralisation est diluée d'une façon ou d'une autre (dykes mafiques recoupant des unités moins minéralisées que d'autres, etc.), il faut que les segments reflètent cette réalité.

**Seuillage** (*capping*) – Il est parfois nécessaire d'éliminer les valeurs extrêmes. À cette étape, il faut décider si l'on souhaite utiliser des seuils ou non, et quelle valeur limite utiliser. L'utilisation de seuils peut, par exemple, empêcher qu'un variogramme ne présente une forme en cloche.

**Domaine** — Avant d'interpoler les teneurs, il faut également décider d'utiliser, ou non, des domaines dans lesquels l'interpolation devra être effectuée de façon indépendante. L'utilisation de domaines doit être justifiée par des observations géologiques. Elle peut se justifier si les données présentent des tendances dont l'orientation varie d'un endroit du gisement à l'autre (par exemple, minéralisation plissée). La classification en domaine peut aussi être utilisée si l'échantillonnage est insuffisant (par exemple, variogramme qui n'atteint pas son plateau) ou trop espacé (effet pépité proche de 100 %, pour l'or communément) et ne permet pas de décrire la distribution spatiale des échantillons.

## **2.2 Interpolation spatiale des teneurs**

### **2.2.1 Statistique exploratoire**

Avant toute interpolation, les données sont explorées et documentées à l'aide d'outils statistiques simples (histogrammes, boîtes à moustaches, diagramme QQ, etc.). Il est aussi important d'établir si la population présente des tendances (recherche des anisotropies à l'aide de variogrammes), si les données sont spatialement corrélées (variogrammes) et si, dans le cas de systèmes à plusieurs composantes, il existe des corrélations entre les variables (pour que le modèle final reflète correctement ces relations).

**L'effet de trou** - Cet effet peut expliquer la périodicité observée dans certains variogrammes. Il est dû à des populations formées par plusieurs processus (populations multiples), des changements systématiques de la variabilité, des autocorrélations non communes, etc. (Journel et Huijbregts, 1978). Les statistiques exploratoires permettront d'identifier de telles populations et de leur appliquer des traitements adaptés.

**L'effet proportionnel** - Cet effet est souvent présent. Il correspond à la tendance, pour les zones de haute teneur, de présenter une variabilité plus élevée que les zones de basse teneur. L'effet peut mener à un « **biais conditionnel** », c.-à-d. que la teneur et l'étendue des zones de haute teneur seront surestimées et celles de zones de basse teneur seront sous-estimées.

Cet effet s'exprime par une corrélation entre la moyenne et l'écart type. Un diagramme binaire du type « moyenne vs. écart type » permet d'identifier la présence de cet effet et d'agir en conséquence (utilisation de domaines, transformations, etc.).

### 2.2.2 Taille des blocs

Les méthodes d'interpolation spatiale prédisent des valeurs pour chaque petit élément réparti de façon régulière dans l'espace (modèles de blocs). La plupart du temps, ces petits éléments sont de forme carrée ou rectangulaire et sont appelés blocs.

**L'effet de support** (*support effect*) – L'effet de support est la géométrie du volume sur laquelle est mesurée une variable. Lorsque la taille des blocs est augmentée, la variance de krigeage (*kriging variance*) (voir ci-dessous) diminue. L'effet est aussi dépendant de la quantité d'échantillons.

Si l'on n'y prend pas garde, les zones qui contiennent le moins d'échantillons (donc, qui ont des chances de présenter la variabilité la plus faible) seront plus facilement classées comme ressources mesurées, alors que les zones très échantillonnées seront classées comme ressources inférées (voir section 6.4). Il est important d'avoir en tête cet effet lorsque l'on choisit une taille de bloc (David, 1988).

Pour les gisements d'or, des domaines sont souvent utilisés pour remplacer le modèle de blocs : on peut voir ces domaines comme des blocs de grande taille l'effet de support peut alors être important). Pour les autres substances, les blocs sont de tailles plus modestes.

L'idéal est de choisir une taille de blocs qui prenne en compte les réalités des opérations de minage (Krige, 1996). Il faut aussi que la taille des blocs soit appropriée à la distribution des échantillons disponibles et à la façon dont les concentrations varient dans l'espace.

Si l'on utilise une méthode comme le krigeage, certains paramètres, comme KE% (« *Kriging Efficiency parameter* » ; Krige, 1996), peuvent fournir des indications qui permettront de choisir une taille de blocs appropriée. Cependant, l'exercice est difficile, mais essentiel, car le choix d'une taille ou d'une autre a de très importantes répercussions sur les résultats du calcul de ressources.

### **2.2.3 Méthodes d'interpolation**

Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation ou de spatialisation de données ponctuelles. Les plus couramment utilisées sont citées ci-dessous.

**Polygones/voisins naturels** – Cette méthode, qui à la base est par non-interpolation, consiste à attribuer à chaque bloc la valeur de l'échantillon le plus proche. Une autre façon de faire est de délimiter de larges domaines et de leur attribuer une valeur correspondant à la moyenne ou médiane des échantillons situés dans chaque domaine (dépôts d'or). Ces méthodes sont parfois utilisées pour effectuer des calculs de ressources.

**Inverse de la distance (IDW)** — Avec cette méthode, la valeur de chaque bloc dépend de sa distance aux échantillons et des valeurs des échantillons. Cette méthode est simple à utiliser et à comprendre, c'est son principal avantage et cela constitue la raison principale pour laquelle elle est abondamment utilisée. Cependant, l'inverse de la distance ne prend pas en compte l'autocorrélation, les variations à petite échelle, la redondance dans les échantillons (échantillons rapprochés, duplicata (trous jumeaux), ne permet pas de gérer les données de mauvaise qualité, les erreurs, etc., et n'est pas toujours adaptée. Aussi, il est difficile d'estimer la qualité d'une interpolation faite avec IDW. Cette technique est cependant très utile lorsque la quantité d'échantillons est trop faible pour permettre une interpolation de type krigeage.

**Krigeage** – Les différentes techniques de krigeage sont plus complexes que l'inverse de la distance, plus longues à mettre en œuvre et demandent à l'utilisateur de définir divers paramètres. Mais le krigeage a les avantages suivants : 1) il prend en compte la configuration des données (autocorrélation) ; 2) il peut permettre de comprendre le bruit et d'isoler les zones les plus bruitées (où les échantillons sont de moins bonnes qualités) ; 3) des paramètres comme la variance de krigeage (*kriging variance*) permettent de porter un jugement objectif sur la qualité des interpolations (voir section 2.3).

Par contre, comme l'inverse de la distance, le krigeage a tendance à lisser les données. Aussi, le krigeage ne prend pas en compte les valeurs (il voit seulement les distributions spatiales) et ne prend donc pas en compte l'effet proportionnel (*proportional effect*), ce qui peut engendrer des sous-estimations des teneurs dans les zones de haut grade.

Les divers types de krigeages les plus couramment utilisés sont : 1) krigeage simple (moyenne fixe, à utiliser seulement lorsque l'on peut estimer la valeur de cette moyenne) ; 2) krigeage ordinaire (moyenne constante, mais inconnue, technique la plus couramment utilisée) ; et 3) krigeage universel (à utiliser si l'on peut prouver qu'il y'a des tendances).

**Variance de krigeage** — Il s'agit d'une moyenne au carré des erreurs et est un paramètre qui permet de quantifier la qualité de l'interpolation de type krigeage. Ce paramètre est parfois utilisé pour classer les ressources. La **variance de krigeage** indique comment les échantillons sont distribués autour des blocs, mais n'est pas un bon indicateur de la confiance que l'on peut accorder à l'estimé à tel ou tel endroit (pour évaluer ce paramètre, pour évaluer l'incertitude associée à chaque prédiction, la simulation conditionnelle est la seule technique performante).

**Simulation conditionnelle** — Ceci n'est pas généralement utilisé pour interpoler (dans certains cas, cette technique donnera le même résultat que le krigeage, mais après des calculs beaucoup plus longs). Cette technique sert plutôt à évaluer l'incertitude (voir section 2.3). Contrairement au krigeage, les simulations conditionnelles n'ont pas de solutions uniques et préservent la variance des données (le krigeage donne les valeurs moyennes). Les simulations sont utilisées pour diverses raisons (représenter l'hétérogénéité d'une variable, etc.). Dans ce rapport, elles seront utilisées uniquement pour quantifier et évaluer l'incertitude.

#### **2.2.4 Méthodes de transformation**

Les techniques de krigeage et de simulation conditionnelle sont basées sur la statistique Gaussien, et ne peuvent donc travailler qu'avec des données présentant des distributions normales. C'est pour cela que les données sont généralement transformées, interpolées puis retransformées.

La plupart du temps, la transformation vise à transformer une distribution asymétrique (*skewed*) vers les valeurs hautes (cas le plus fréquemment observé, et ce parce que les analyses géochimiques ne peuvent pas prendre de valeurs négatives) en une distribution normale. Il existe de nombreuses transformations comme « *Box-Cox* », ou comme « variable centrée réduite ou *Z-score transform* », qui ont donné de bons résultats pendant ce projet. D'autres types de transformations peuvent permettre de corriger la variance, etc.

#### **2.2.5 Validation des résultats**

Les résultats des interpolations sont ensuite validés de diverses façons. Dans un premier temps, il est important de porter un regard critique sur le résultat et de se demander s'il a du sens d'un point de vue géologique. Pour ce faire, il est recommandé de faire des sections à travers le modèle de blocs, de le projeter sur une surface plane, etc., afin de s'assurer que la distribution des teneurs prédites respecte bien ce que l'on connaît de la géologie locale. Les résultats produits par des interpolations de type IDW et krigeage peuvent aussi être comparés.

## 2.3 Classification des ressources

### 2.3.1 Normes internationales

Plusieurs normes ou guides sont utilisés dans le monde afin de classer les ressources. Les principales normes internationales sont : American USGS Circular 831 (USGS, 1980), SME guide (SME, 1999), South-African SMREC code (SAMREC, 2000), European code (EURO, 2002), et Australian JORC code (JORC, 2004) (comme cités par Emery et al., 2006). Au Canada, on utilise : les « lignes directrices de l'ICM » (CIM, 2014), et la norme NI-43-101 (CSA, 2011).

Le JORC est la norme la plus utilisée par les pays qui n'ont pas leurs propres systèmes. Toutes ces normes sont relativement similaires. Elles donnent une définition générale des catégories de ressources et réserves, font reposer beaucoup de choses sur le jugement de la personne qualifiée, et donnent très peu de recommandations chiffrées sur le nombre d'échantillons minimal et sur l'espacement des forages. Le JORC, par exemple, spécifie des distances d'interpolation maximales pour les différentes catégories de ressources (500 m, 1000 m, et 2000 m, pour les ressources mesurées, indiquées et inférées), mais sans prendre en compte les différences entre les substances (ces chiffres sont peut-être adaptés pour le charbon ou le fer, mais certainement pas pour l'or, par exemple).

### 2.3.2 Méthodes classiques

Les principales méthodes servant à classer les ressources sont :

- 1) L'utilisation de **critères géométriques** est une méthode qui ne prend en compte que la distance entre le point interpolé et les échantillons. Cette méthode est recommandée par Rossi et Deutsch (2014), car facile à comprendre et difficile à falsifier.
- 2) Utilisation de la **variance de krigeage**, qui prend en compte la distance entre les points interpolés et les échantillons, ainsi que l'autocorrélation. La variance de krigeage augmente lorsque la variance des données augmente (voir zones de hautes teneurs, par exemple l'effet proportionnel, et diminue lorsque les données sont proches des points estimés.
- 3) Les **simulations conditionnelles**, qui est la seule méthode capable de vraiment identifier les zones les plus difficiles à interpoler, mais qui est aussi la méthode la plus complexe et la plus longue à mettre en œuvre. Elle prend en compte la distance entre les points interpolés et les échantillons, l'autocorrélation et les valeurs. Elle permet véritablement d'évaluer l'incertitude.

### **2.3.3 Simulations conditionnelles**

Il existe de nombreux types de simulations conditionnelles. Dans le cadre de ce projet, nous parlerons principalement de la *Simulation gaussienne séquentielle (SGS)* (Lantuejoul, 2002), qui est l'une des techniques les plus simples à mettre en œuvre.

#### ***Simulation conditionnelle de type SGS***

La SGS est une sorte de mélange entre le krigeage et des modélisations de type Monte-Carlo. La SGS travaille de la façon suivante : 1) un point à interpoler est choisi au hasard et est interpolé à partir des échantillons disponibles (interpolation de type krigeage) ; 2) puis, un autre point est choisi au hasard et est interpolé à son tour, à partir des échantillons disponibles ET du/des point(s) interpolé(s) précédemment ; 3) etc. Pour chaque simulation, un « chemin » différent est utilisé (variation de l'ordre dans lequel les points sont interprétés). Chaque simulation produit ainsi une interpolation visuellement « réaliste » (pas de lissage), et tous les résultats de ces interpolations sont différents, mais ont la même probabilité d'exister. Souvent, une centaine de simulations sont effectuées, et lorsqu'elles sont combinées, on obtient une interpolation très similaire à celle que l'on aurait obtenue avec le krigeage seul.

Cependant, avec 100 simulations, on obtient 100 possibilités de valeurs pour chaque point à interpoler. Ceci permet de quantifier l'incertitude associée à chaque prédiction : 1) si les 100 valeurs ont un écart type élevé alors l'incertitude est grande (on ne sait pas exactement quelle valeur a le point interpolé) ; et 2) si les 100 valeurs ont un écart-type faible, alors l'interpolation du point en question à partir des échantillons disponibles est plus fiable.

Les résultats des 100 simulations sont donc souvent présentés par une carte de ces écarts types. Puisque ces cartes montrent les zones où les écarts types sont les plus grands (où l'on ne peut pas interpoler de façon fiable les données avec les échantillons qui sont disponibles), elles sont utilisées pour classer les ressources. De telles cartes pourraient également permettre de délimiter les zones où des forages supplémentaires pourraient être nécessaires.

#### ***Autres types de simulations conditionnelles***

Les principaux types de simulations sont les suivantes :

- simulations basées sur des objets ou groupes de pixels qui représentent des objets géologiques (non discutées ici) ;
- simulations basées sur les pixels (pour données continues ou non) :
  - *Méthode « turning bands »*, l'une des méthodes les plus anciennes (Mantoglou et Wilson 1982).
  - *Gaussienne séquentielle (SGS)*, pour variables continues (Deutch et Journel 1998, Deutch 2002).
  - *Séquentielle à indicateurs (SIS)*, pour variables discrètes (mais sinon, similaire à SGS). Version récente : « Bayesian indicator ».
  - *Gaussienne tronquée*, développé par l'industrie du pétrole pour simuler des lithofaciès (Ravenne et Beucher 1988).
  - *Recuit simulé « simulated annealing »*, fonctionne par essais-erreurs, en modifiant « l'image » de départ.

## 2.4 Résumé

En résumé, le processus de calcul des ressources nécessite la prise de diverses décisions. Les décisions les plus importantes qui doivent être prises sont les suivantes :

- **Maille de forages** : il faut décider de la distribution spatiale des forages (espacement, orientation).
- **Délimitation** du gisement dans l'espace (plusieurs décisions : teneur de coupure, interprétation géologique, etc.)
- **Segmentation** : choisir leurs tailles.
- **Seuillage** (*Capping*) : décider de l'utiliser ou non, et choisir la valeur limite.
- **Domaine** : décider d'en utiliser ou non, et délimiter ces domaines.
- **Grille, modèle de blocs** : définir une forme et une taille pour ces éléments.
- **Transformation des données** : sélectionner une méthode.
- **Méthode d'interpolation** : choisir une méthode appropriée, et valider les résultats.
- **Classification** : choisir une méthode de classification.

Ce projet se propose de réfléchir sur le premier point et d'utiliser des modèles afin de tester l'influence de diverses mailles de forages sur l'estimation de la moyenne et d'autres paramètres. Pour ce faire, les autres points seront pris en compte, mais ne seront pas étudiés en détail.

---

### 3 PARAMÈTRES ÉTUDIÉS

---

Dans les prochaines sections, plusieurs modèles de blocs appartenant à plusieurs partenaires du CONSOREM permettront une réflexion sur la maille de forages. La thématique de ce projet étant très vaste, il a été décidé de ne se concentrer que sur quelques paramètres, qui sont présentés ici.

Le choix d'une maille de forages optimale revient à se demander : « combien d'échantillons sont nécessaires ? ». Et cette question implique que l'on puisse répondre aux sous-questions suivantes :

- Qu'est-ce qui est connu du processus que l'on souhaite échantillonner ? Si un phénomène est bien compris, échantillonner au hasard n'est pas nécessaire et n'est pas recommandé. Connaître le phénomène revient à comprendre sa variabilité et ses caractéristiques, qui peuvent être représentées par un variogramme et un histogramme;
- Comment doit-on échantillonner ce phénomène pour obtenir une interpolation précise et juste ?

Lorsque les données ont une distribution normale, de 30 à 40 échantillons sont considérés suffisants pour caractériser la population. Si la distribution n'est pas normale, une plus grande quantité d'échantillons est nécessaire pour obtenir un histogramme similaire à celui de la population échantillonnée. Aussi, pour une étude variographique, il faut disposer d'une quantité suffisante d'échantillons : 10 à 20 forages pourraient représenter un minimum, selon les cas.

Afin de répondre à la question posée plus haut, deux paramètres seront principalement étudiés : la moyenne et le variogramme.

- **Moyenne** : est-ce que l'on dispose de suffisamment d'échantillons pour permettre une bonne estimation de la moyenne globale/réelle/vraie ?;
- **Variogramme** : est-ce que l'on dispose de suffisamment d'échantillons pour permettre le calcul d'un variogramme de bonne qualité ?

#### 3.1 L'importance du variogramme

Un variogramme de qualité est essentiel à l'utilisation d'interpolations de type krigeage. Un variogramme utilisable a les caractéristiques suivantes :

- Il n'a pas un effet pépité trop élevé ; c.-à-d. que l'effet pépité représente au maximum 50 % du plateau;
- Il atteint un plateau. En effet, si le plateau n'est pas atteint, c'est que l'on ne dispose pas d'un échantillonnage suffisant (pas suffisamment étendu dans l'espace souvent) pour décrire l'ensemble de l'autocorrélation, et que le krigeage ne devrait pas être tenté. Il est aussi possible qu'il existe une tendance qui n'a pas été prise en compte, et qu'il faut retirer avant de poursuivre l'interpolation;
- Il n'a pas une forme en cloche, ce qui peut être corrigé à l'aide du seuillage;
- Il ne fait pas « des hauts et des bas ». Parfois, il suffit d'ajuster le pas (*bandwidth*) pour remédier à ce problème. Dans d'autres cas, la quantité d'échantillons est insuffisante.

De façon générale, si la portée est inférieure à la distance minimale entre les échantillons, le variogramme sera inutilisable. Plus les variations se produisent à petite échelle et plus il faudra resserrer la maille d'échantillonnage. En pratique, pour l'or principalement, cela n'est pas toujours possible. Pour les autres substances, des exemples de variogrammes sont présentés ci-après.

### 3.2 L'importance de la moyenne

La moyenne est essentielle à tous types d'interpolations. L'échantillonnage doit donc être suffisant pour permettre une estimation juste et précise de la moyenne « vraie ». Diverses estimations de la moyenne sont proposées ci-après. La moyenne doit notamment pouvoir être estimée correctement pour :

- **Inverse distance** : importance similaire à celle du krigeage (voir ci-dessous);
- **Krigeage simple** : la moyenne est calculée à partir des échantillons fournis au modèle. Les teneurs estimées sont donc très dépendantes de la moyenne calculée à partir des échantillons. Cette technique est peu utilisée, principalement parce qu'il est difficile de se rapprocher de la moyenne vraie en faisant une moyenne des points échantillonnés sans prendre en compte leurs distributions dans l'espace. Par exemple, si deux points sont très rapprochés dans l'espace (duplicata par exemple), ils compteront deux fois dans le calcul, ce qui faussera l'estimation de la moyenne;
- **Krigeage ordinaire** : cette technique est plus couramment utilisée, car elle palie au défaut du krigeage simple décrit ci-dessus. Le krigeage ordinaire propose une estimation de la moyenne en même temps que le krigeage est effectué. La moyenne correspond alors au l'estimation généralisée des moindres carrés (*generalised least square estimate*).

---

## 4 MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

---

### 4.1 Méthodologie

Afin de documenter des gisements connus et bien documentés, plusieurs modèles de blocs appartenant à plusieurs partenaires du CONSOREM ont été utilisés. À partir de chaque modèle de blocs, la moyenne ( $M_P$ ), la médiane, et l'écart type de la population entière sont calculés (voir les histogrammes présentés ci-après). Ces diagrammes ont ensuite été comparés à des diagrammes similaires, obtenus à partir d'échantillons de la population initiale.

Les modèles de blocs ont été échantillonnés de façon systématique. Pour tester un espacement de 5 m entre les forages, par exemple, la procédure suivante a été adoptée :

- 1) Simulation d'une campagne de forages (**Figure 1**). Les forages sont perpendiculaires au plan qui contient les axes maximums et intermédiaires des lentilles minéralisées. Ces forages sont distants de 5 m en dans les directions x et y (mailles carrées);
- 2) Tous les blocs du modèle de blocs intersectés par les forages simulés sont collectés. Ces blocs constituent les échantillons. Ensuite, la moyenne, la médiane, l'écart-type et le variogramme de ces échantillons sont calculés. Notons que le variogramme est calculé après qu'une transformation du type « variable centrée réduite (*Z-score transform*) » ait été appliquée aux données;
- 3) Ensuite, la campagne de forages est décalée d'une unité (1 m souvent) dans la direction x et/ou y, et les étapes (1) et (2) sont répétées. Pour tester un espacement de 5 m entre les forages, la procédure sera répétée 25 fois (**Figure 2**).

Dans notre exemple, les 25 données de variogrammes sont ensuite traitées de la façon suivante :

- 1) Les 25 variogrammes sont représentés sur un même diagramme. Lorsque ces 25 variogrammes sont relativement similaires et de bonne qualité, il est conclu que l'espacement entre les forages est suffisamment faible pour permettre une interpolation de type krigeage. Dans le cas contraire, il est recommandé d'utiliser une maille plus resserrée, ou d'interpoler avec l'inverse de la distance.

Quant aux 25 données de moyennes, écarts types et médianes, elles sont traitées de la façon suivante. Par exemple, pour la moyenne, les moyennes calculées à partir des échantillons ( $M_E$ ) sont comparées à la moyenne de la population entière ( $M_P$ ) de la façon suivante :

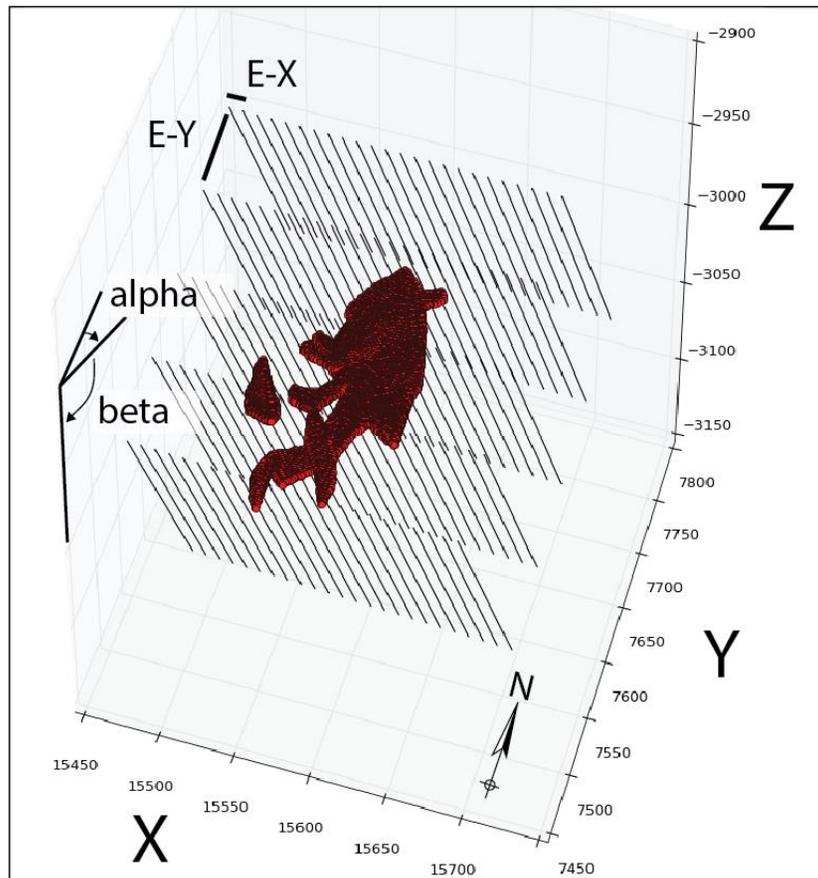
- 1) À partir des 25 valeurs de  $M_E$ , on calcule la probabilité que ces valeurs soient plus ou moins proches de la valeur de  $M_P$ . Cette probabilité se calcule de la façon suivante :

$$\text{Probabilité} = 100 * [\text{nombre de } M_E \text{ égales à } (M_P \pm \text{erreur} * M_P)] / [\text{nombre total de } M_E]$$

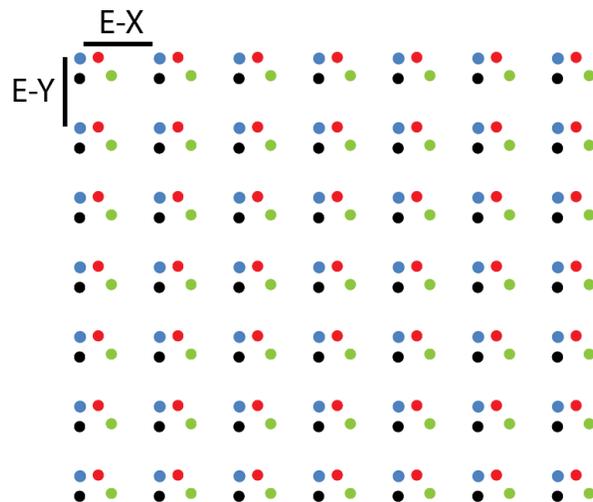
Avec : erreur = 0,01, 0,05, 0,1 ou 0,2 (erreurs de 1 %, 5 %, 10 % ou 20 %)

- 2) Il est également possible d'effectuer des calculs d'erreurs :

$$\text{Erreur\%} = 100 * \text{ABS}[(M_E - M_P) / M_P]$$



**Figure 1** : Simulation d'une campagne de forages. Les angles alpha et bêta servent à orienter les forages. Les points rouges représentent le modèle de blocs de la lentille *Bracemac Upper* (données de Glencore). Les paramètres E-X et E-Y servent à définir l'espacement entre les forages (dans l'exemple cité dans cette section, E-X = E-Y = 5 m). Le code utilisé est python 3.4, et l'IDL est « *Anaconda-Spyder* ».



**Figure 2** : Vue en plan de 4 campagnes de forages simulés. Pour tester un espacement de 5 m entre les forages, il faut simuler 25 campagnes de forages et utiliser E-X = E-Y = 5 m.

## 4.2 Présentation des données

Plusieurs jeux de données ont été utilisés. Ces données sont les suivantes :

1) Données de Glencore (substances étudiées ci-après : Ag, Au, Cu, Zn) :

- *Bracemac Upper* (MDL\_Data\_30) (**Figure 3**)
- *Bracemac Main* (MDL\_Data\_22) (**Figure 3**)
- *Bracemac Key Tuffite* (MDL\_Data\_23) (**Figure 3**)
- *McLeod Upper-Lower* (MDL\_Data\_40)

2) Données de Agnico Eagle (substances étudiées ci-après : Au, Ag, Cu, Zn, Pb) :

- Mine LaRonde (modèle de bloc réconcilié)

3) Données de Ariane Phosphate (substance étudiée ci-après : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) :

- Zone Paul (données de forages et modèle de blocs)

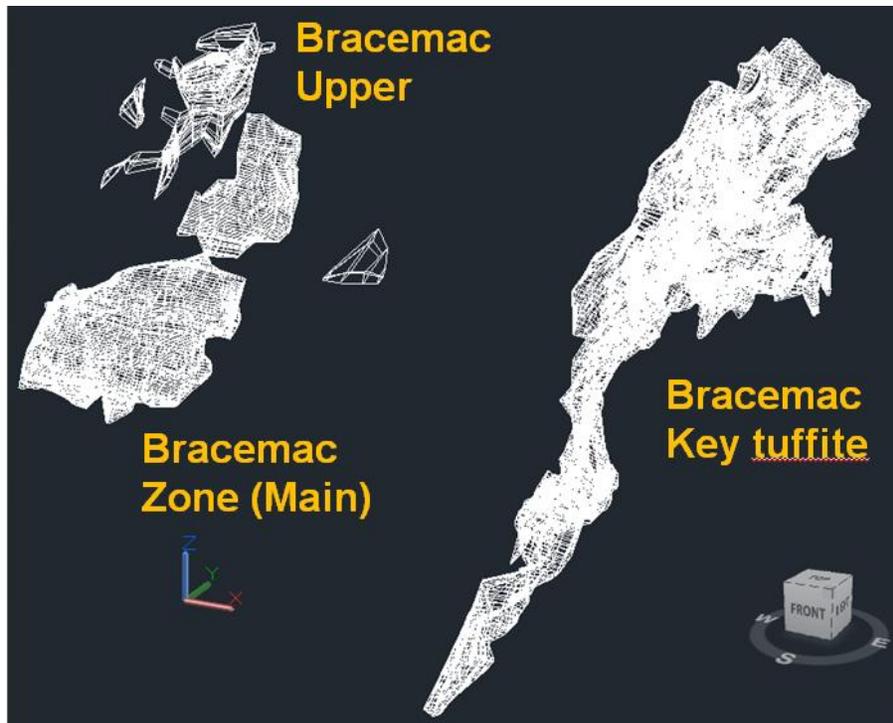
## 4.3 Présentation des outils

Les opérations décrites dans ce rapport ont été automatisées avec le code Python. Pour les données de Glencore et d'Ariane Phosphate, les modèles de blocs ont pu être traités avec les modules de base de Python, grâce à l'IDL « *Anaconda-Spider* ». Notez que, par manque de temps, ces codes n'ont pas pu être grandement optimisés.

Le modèle de blocs d'Agnico Eagle, en revanche, contient trop de données pour permettre ce type de manipulations. Ainsi, pour ces données, le module *ArcPy* de Python a été utilisé ; c.-à-d. que les fonctionnalités d'ArcGIS ont été utilisées par les routines mises précédemment, ce qui a permis de profiter des optimisations du module *ArcPy*.

La réflexion menée dans le cadre de ce projet a grandement bénéficié de l'utilisation de Python. Cependant, en contrepartie, les traitements effectués prenaient beaucoup de temps et la quantité de données traitées étaient limitées.

Pour la plupart des tâches effectuées (simulation de forages, calculs de moyennes, de variogrammes et de probabilités), le recours à un code était nécessaire. Pour d'autres tâches, d'autres logiciels ont été utilisés. Ainsi, les quelques interpolations de types IDW et krigeage ont été effectuées directement en utilisant le logiciel ArcGIS. La simulation conditionnelle de type simulation gaussienne séquentielle (SGS) a été codée (section 6.3), mais il est important de noter que de telles techniques sont maintenant proposées par de nombreux logiciels, qui permettraient d'effectuer des calculs plus efficacement et avec une plus grande quantité de données. Les simulations conditionnelles effectuées sur les données d'Agnico Eagle ont été effectuées avec l'outil *Gaussian Geostatistical Simulations* d'ArcGIS.



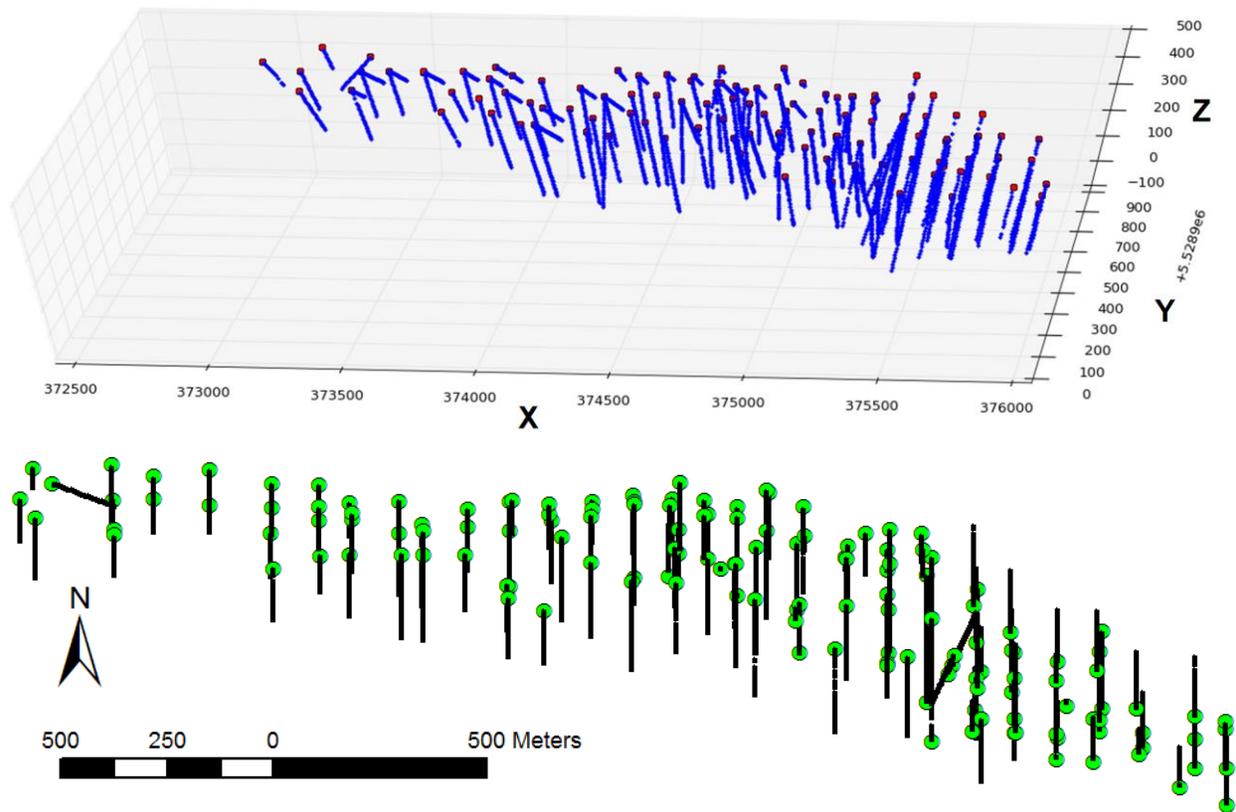
**Figure 3 :** Structure filaire (*wireframes*) des lentilles de sulfures massifs de Bracemac (données de Glencore). Le logiciel utilisé est Autodesk DWG TruView 2016.

## 5 ZONE PAUL

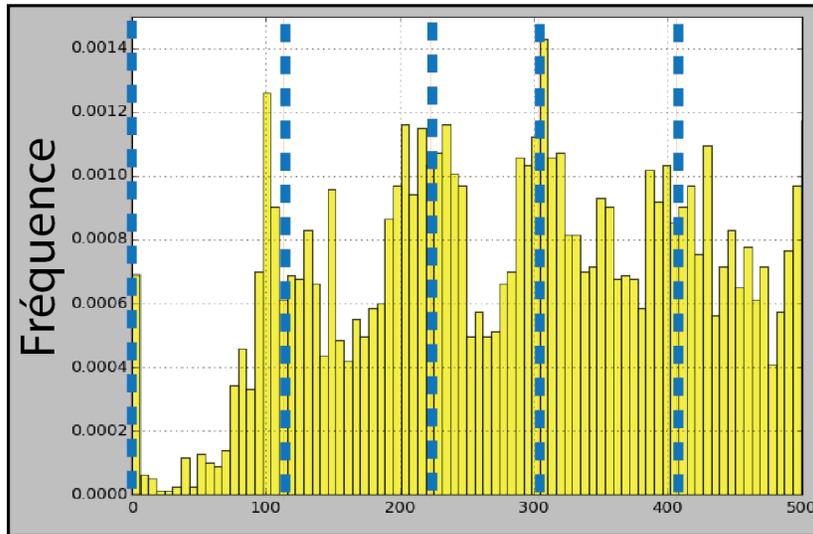
### 5.1 Données de forages (zone Paul)

Les 154 forages de la zone Paul d'Arianne Phosphate sont principalement orientés N-S et plongent environ à 45°, 60°, 70°, et 90° vers le nord, pour la plupart (**Figure 4**).

L'espacement entre les forages peut-être évalué visuellement. Alternativement, les distances entre chaque paire d'échantillons situés à proximité de la surface (voir points rouges de la **Figure 4**) ont été calculées. Ces distances ont ensuite été représentées sous la forme d'un histogramme (**Figure 5**). L'espacement le plus fréquent entre les forages est 100 m. Dans le détail, les lignes de forages sont espacées aux 100 m dans la direction E-O, et généralement de <100 m dans la direction N-S.



**Figure 4 :** Vue dans l'espace (a) et en plan (b) des échantillons de forages de la zone Paul (données d'Arianne-Phosphate), visualisés sous Python. Les forages ont été approximés à des lignes droites afin de rattacher des données x, y et z à chaque échantillon. Les points rouges (a) et verts (b) soulignent les échantillons les plus proches de la surface.



**Figure 5** : Histogramme des distances entre chaque paire d'échantillons proches de la surface, montrant que l'espacement moyen entre les forages est de 100 m (voir lignes pointillées bleues).

Les données de forages fournies comprennent 13 587 analyses des éléments majeurs. Dans cette section, seules les données de  $P_2O_5$  (%pds), recalculées à 100 %, seront analysées. L'historgramme des données de  $P_2O_5$  (%pds) montre deux populations : 1) les valeurs de  $P_2O_5 < 2\%$  correspondent probablement aux zones situées en dehors du dépôt et de la zone délimitée par la teneur de coupure ; et 2) les valeurs hautes correspondent au gisement (**Figure 6**). Les valeurs les plus basses ne sont donc pas intégrées au modèle de blocs (voir section 5.3).

Ces échantillons ont également permis le calcul d'un variogramme. Les forages disponibles sont échantillonnés sur toutes leurs longueurs, par intervalles de 1 à 3 m, ce qui produit une quantité d'échantillons trop importante pour le calcul d'un variogramme. Pour cette raison, une segmentation composite a été réalisée ; c.-à-d. que les valeurs de  $P_2O_5$  (%pds) ont été moyennées pour chaque intervalle de 10 m. Les 3 957 données ainsi obtenues ont permis le calcul d'un variogramme (**Figure 7-a**). Le variogramme obtenu est de très bonne qualité, et sa portée est de 300 m. Il est donc possible que des forages espacés aux 200 m ou 300 m aient été suffisants pour caractériser les teneurs en  $P_2O_5$  (%pds) de la zone à Paul.

Les variogrammes directionnels ont également été calculés et ils montrent une possible tendance dans la direction est-ouest (voir points verts de la **Figure 7-b**).

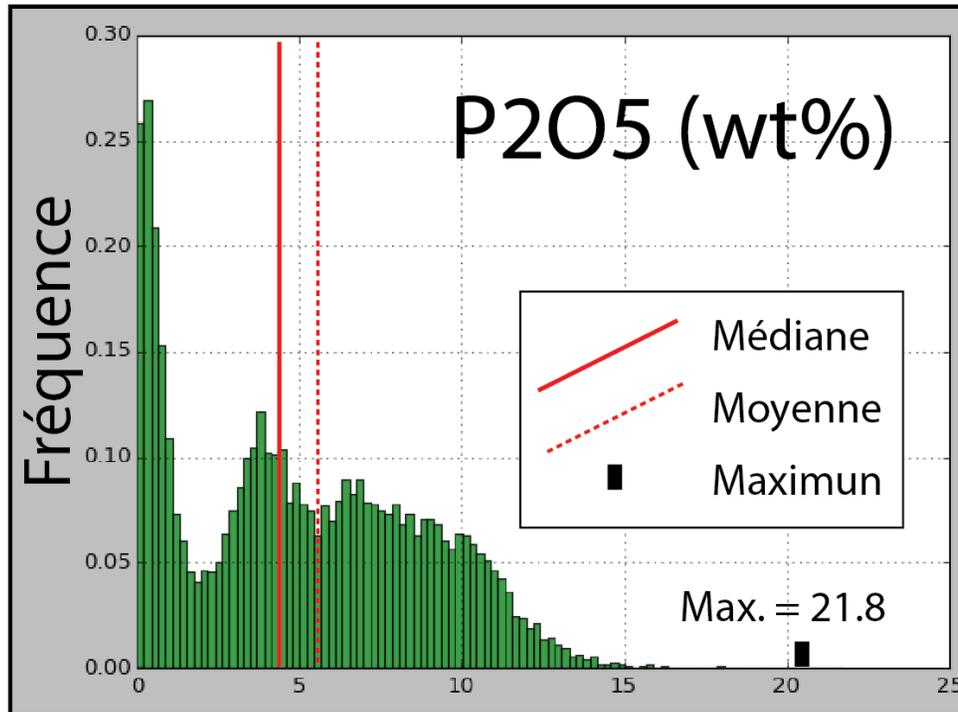


Figure 6 : Histogramme des valeurs de  $P_2O_5$  (%pds) des échantillons de forages.

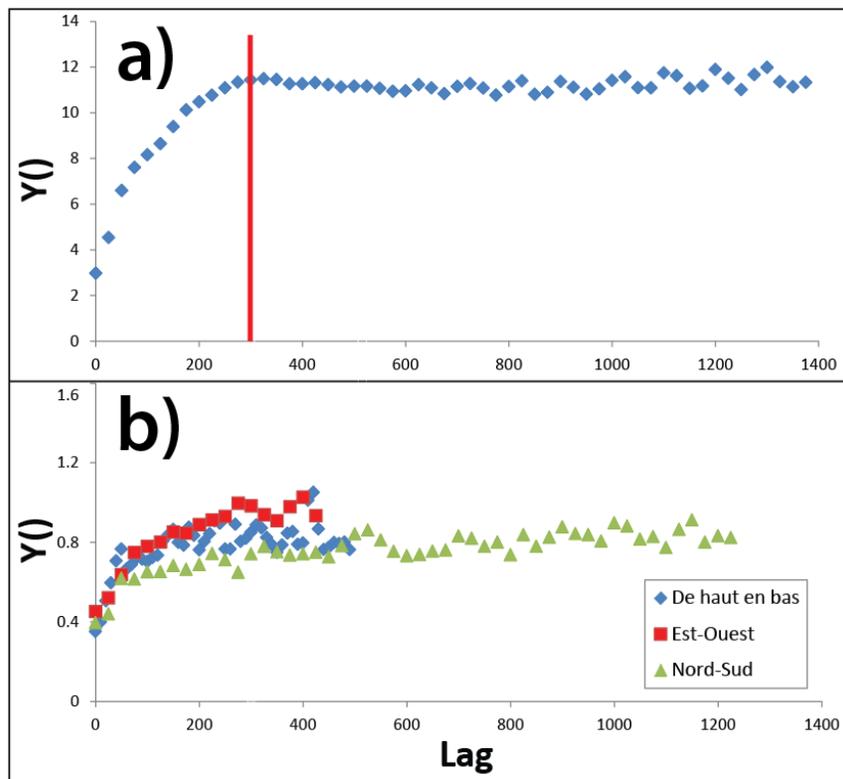


Figure 7 : a) Variogramme expérimental obtenu à partir des échantillons de forages (après application des segments composites et de variable centrée réduite. Le pas choisi (*bandwidth*) est de 25 m. Le plateau est atteint pour une portée de 300 m environ ; b) Variogrammes directionnels (sur tous les échantillons, après

application de la variable centrée réduite pour les directions : **1**) de haut en bas par tranches de 10 m (pas = 10) ; **2**) est-ouest par tranches de 10 m (pas = 25) ; **3**) nord-sud par tranches de 10 m (pas = 25).

## 5.2 Tests effectués sur les données de forages (zone Paul)

Dans cette section, les forages disponibles ont été décimés afin de tester des mailles de forages plus lâches, ayant des espacements > 100 m. Les espacements moyens retenus sont de 200 m à 300 m, et ont été testés à l'aide d'histogrammes similaires à celui de la **Figure 5**.

Pour chaque test, une partie des forages disponibles a été conservée et, à partir de ces forages, la moyenne et le variogramme ont été calculés (**Tableau 1**). Les valeurs de moyennes ont été comparées à la moyenne calculée à partir de l'ensemble des forages et des 13 587 analyses (**Tableau 1**). Pour le variogramme, la même procédure que celle utilisée dans la section précédente (segment composite au 10 m, etc.) a été mise en œuvre (**Figures 8, 9, 10, 11, et 12**).

Les calculs de moyennes produisent les résultats suivant :

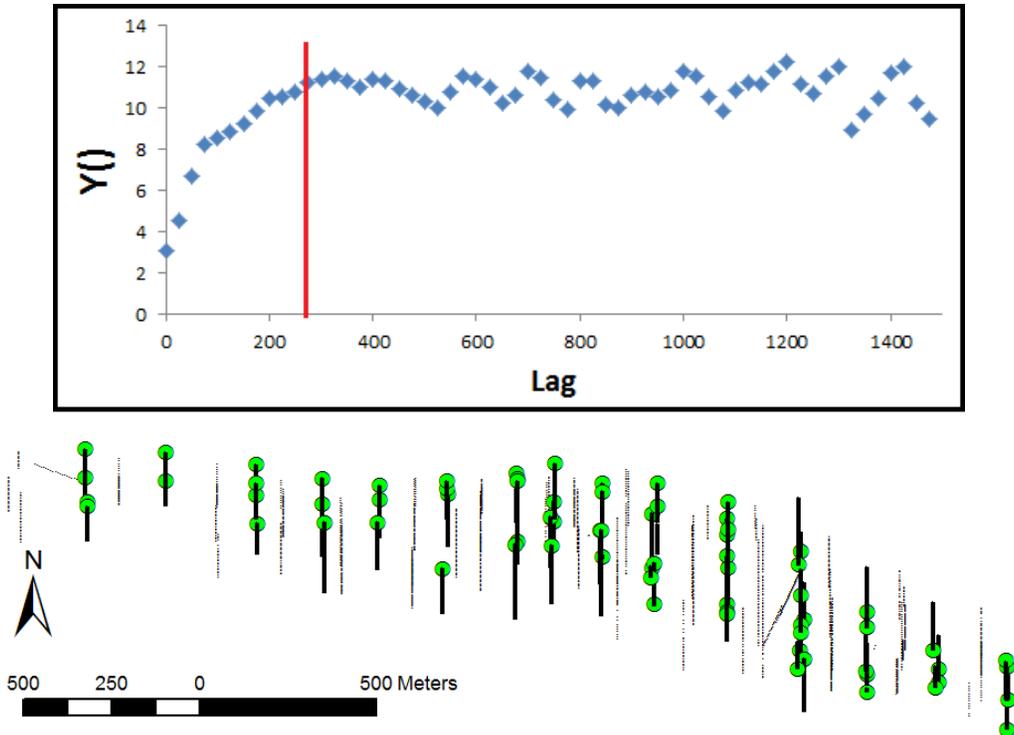
- 1) L'utilisation de composites induit une différence de 4 % environ dans l'estimation de la moyenne.
- 2) La différence est encore de 4 % environ pour les tests 1 et 2 (forages espacés aux 200 m en E-O et relativement proches dans la direction N-S).
- 3) La différence est plus importante (erreurs de 17 %, 21 %, ou parfois 2 %) lorsque l'espacement est 200 m en E-O et 100-200 m en N-S (tests 3 et 4) ou lorsque l'espacement moyen est de 300 m (test 5).

En ce qui concerne les variogrammes, ils sont tous de relativement bonne qualité et ont une portée de 250-300 m (**Figures 8, 9, 10, et 11**), similaire à celle du variogramme calculé à partir de tous les forages (**Figure 7**). Pour le test 5 cependant (espacement de 300 m entre les forages), la portée semble plus faible (**Figure 12**), mais le variogramme est aussi de bonne qualité.

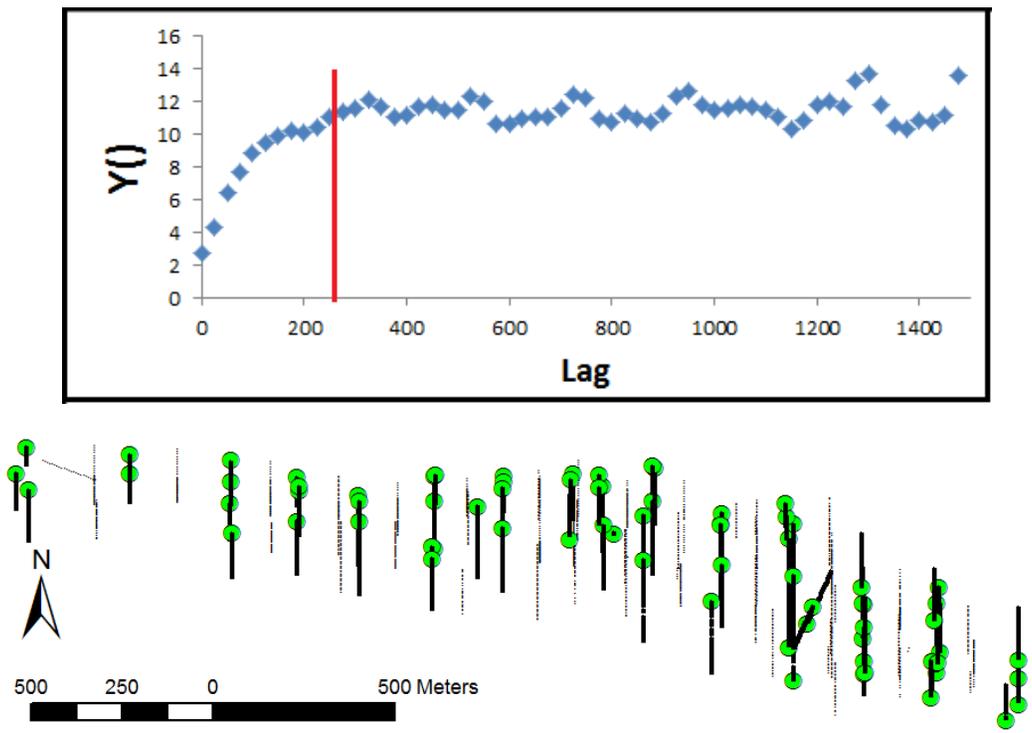
D'après ces calculs de moyennes et de variogramme, et en première approximation, il ne faudrait pas espacer les forages de la zone Paul de plus de 200 m en E-O et choisir un espacement plus faible en N-S. Possiblement, 75 forages, au lieu de 154, auraient pu être suffisants. Cette première impression sera raffinée dans la section suivante.

**Tableau 1** : Données des modèles de décimation des forages de la zone Paul.

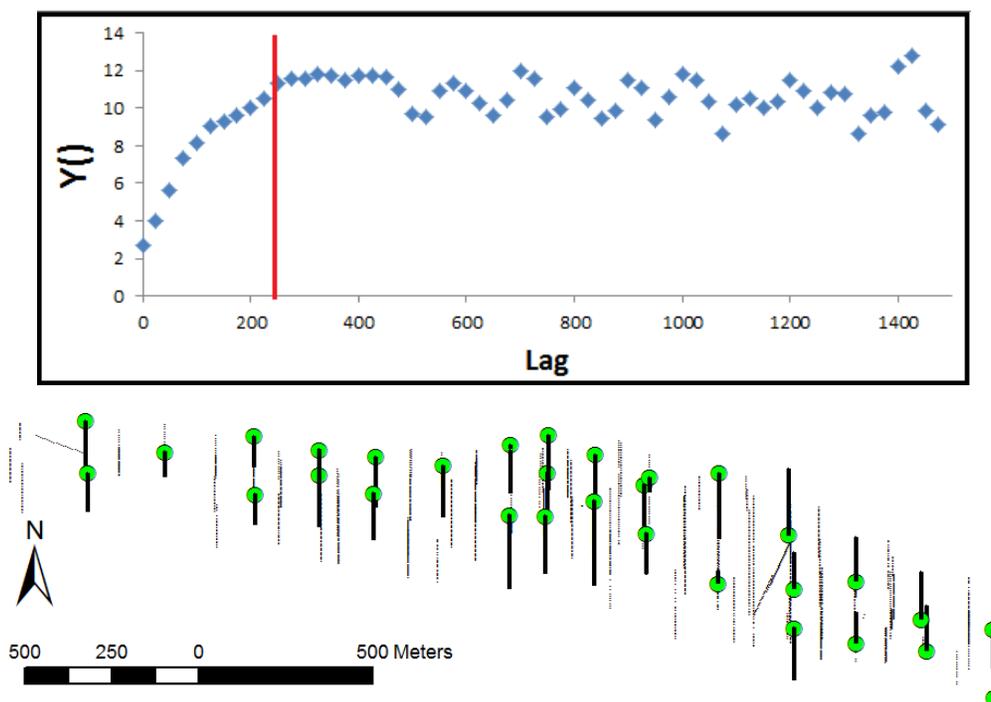
Données : P2O5 (%pds)	Moyenne		Figures		Forage	
	Moyenne	% erreur	Variogrammes	Échantillons	Espacement	n forages
Tous les échantillons	5,09	0		Figure 4	100 m	154
Tous (avec composites)	4,87	4,24	Figure 7		100 m	154
Test 1 (avec composites)	4,88	4,01	Figure 8	Figure 8	200 m	73
Test 2 (avec composites)	4,84	4,93	Figure 9	Figure 9	200 m	75
Test 3 (avec composites)	4,23	16,94	Figure 10	Figure 10	200 m	31
Test 4 (avec composites)	4,10	1,90	Figure 11	Figure 11	200 m	32
Test 5 (avec composites)	3,99	21,65	Figure 12	Figure 12	300 m	23



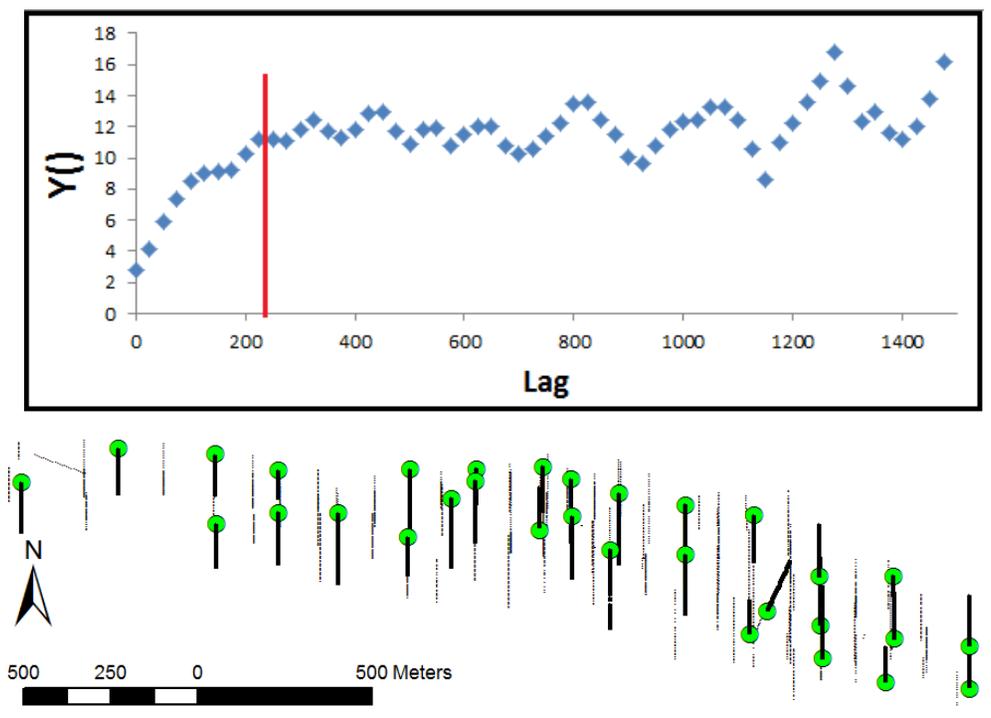
**Figure 8 :** Variogramme et vue en plan des 73 forages retenus pour le test 1. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 50-100 m dans la direction N-S.



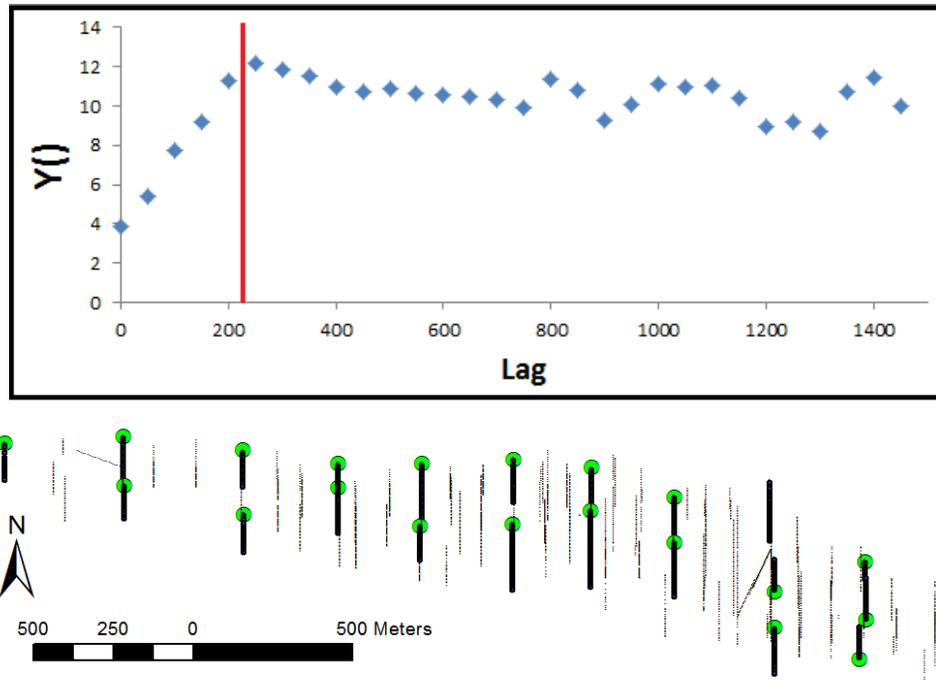
**Figure 9 :** Variogramme et vue en plan des 75 forages retenus pour le test 2. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 50-100 m dans la direction N-S.



**Figure 10** : Variogramme et vue en plan des 31 forages retenus pour le test 3. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 100-200 m dans la direction N-S.



**Figure 11** : Variogramme et vue en plan des 32 forages retenus pour le test 4. Leur espacement moyen est de 200 m en E-O et de 100-200 m dans la direction N-S.



**Figure 12** : Variogramme et vue en plan des 23 forages retenus pour le test 1. Leur espacement moyen est de 300 m en E-O et de 200 m dans la direction N-S.

### 5.3 Modèle de blocs (zone Paul)

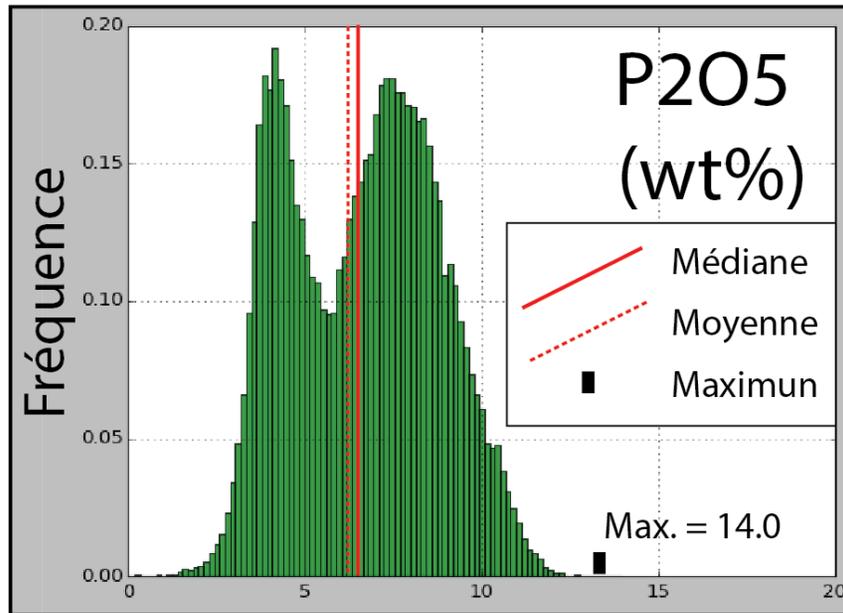
Le modèle de blocs de la zone Paul contient 43 283 blocs, qui mesurent chacun 10x10x15 m (dans les directions x, y, et z) (Rachidi et Duplessis, 2015). La moyenne des valeurs de  $P_2O_5$ , pour l'ensemble des blocs, est de 6 615 %pds ( $M_P$ ). L'historgramme des valeurs de  $P_2O_5$  (%pds) (**Figure 13**) est similaire à celui obtenu pour les valeurs  $> 2$  %pds des échantillons de forage (**Figure 6**).

Diverses campagnes de forages ont été simulées à partir des données du modèle de blocs. Les forages simulés sont orientés N-S et plongent de  $70^\circ$  vers le nord. L'espacement entre les forages est similaire en x et en y et varie de 10 m à 500 m.

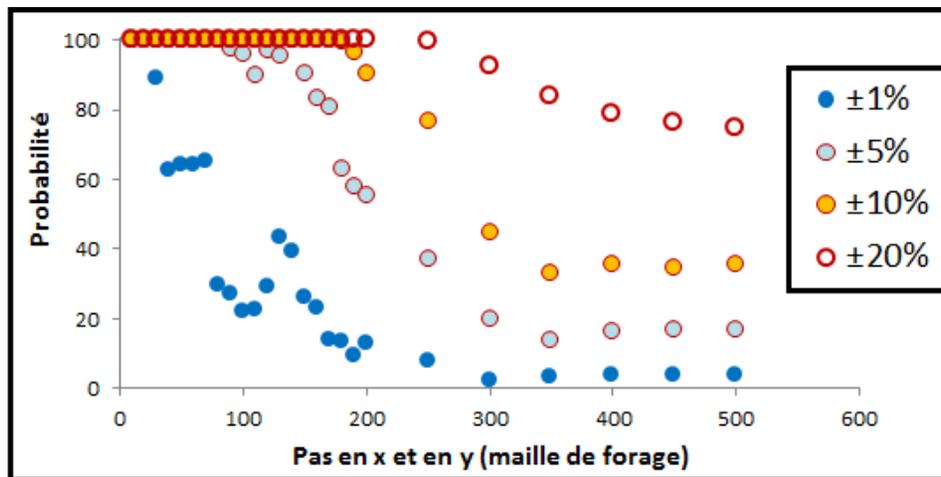
Pour chaque test, la moyenne a été calculée à partir des échantillons pris le long des forages simulés. La probabilité que cette moyenne ( $M_E$ ) soit proche de la moyenne globale ( $M_P$ ) a été calculée pour chaque test (**Figure 14**). L'ensemble des moyennes et erreurs calculées, pour trois des tests effectués, est aussi présenté (**Figure 15**).

Ceci montre qu'avec une maille au 100 m, l'erreur sur la moyenne est comprise entre 1 % et 5 % (**Figures 14, 15**). Avec une maille au 200 m, l'erreur sera plus souvent proche de 5 % (**Figure 15**), mais sera systématiquement  $\leq$  à 10 % (**Figure 14**), ce qui est acceptable. Avec des forages espacés au 300 m, les erreurs sur l'estimation de la moyenne sont beaucoup plus grandes (erreur de 10 % en moyenne ; **Figure 15**).

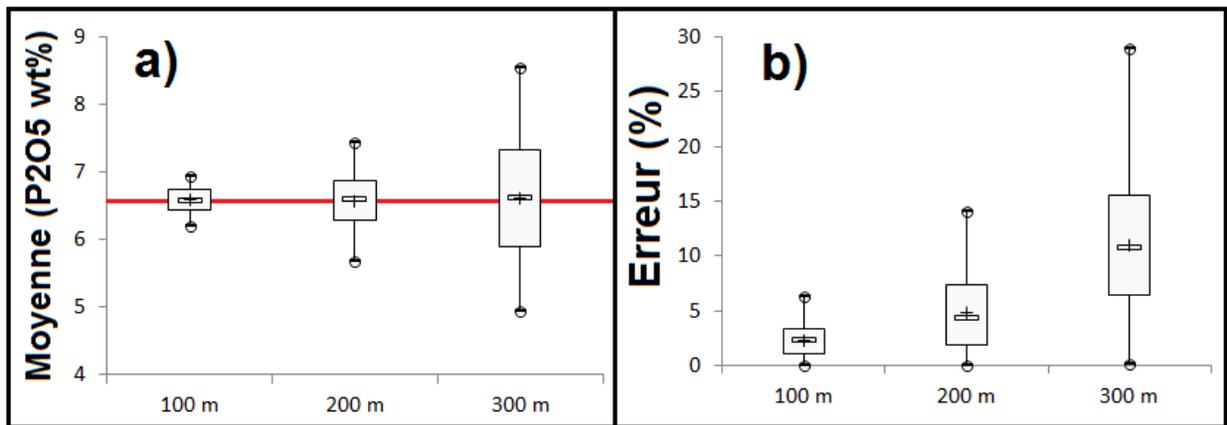
Pour chaque test, les variogrammes ont été calculés (**Figure 16**). Il est observé qu'à partir d'un espacement au 250-300 m, les variogrammes sont de mauvaise qualité et inutiles à une interpolation de type krigeage. Les forages obtenus à partir de forages espacés au 100 m sont de très bonne qualité, et ceux obtenus à partir d'une maille au 200 m sont encore de relativement bonne qualité dans la plupart des cas.



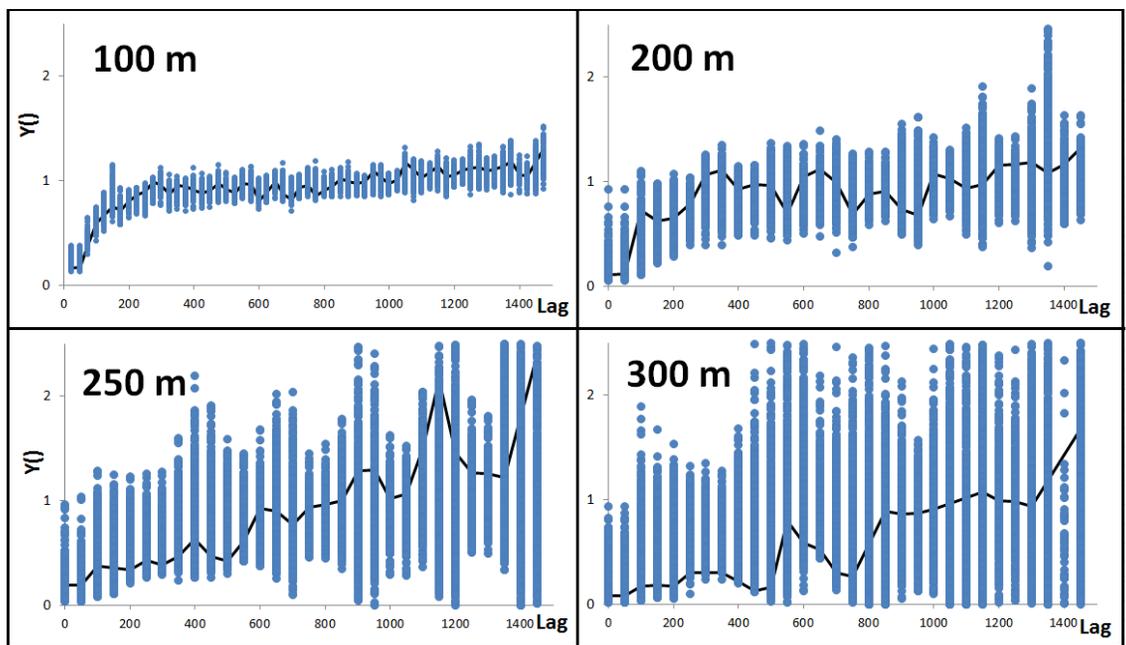
**Figure 13 :** Histogrammes des teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%pds) du modèle de blocs de la zone Paul.



**Figure 14 :** Probabilités de s'approcher de la valeur de la moyenne globale de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%pds) à partir d'échantillons pris le long de forages simulés. On observe qu'à partir d'une maille au 250 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne deviennent trop faibles.



**Figure 15 :** a) Boîtes à moustaches de l'ensemble des moyennes calculées à partir de forages simulés tous les 100 m (100 tests), 200 m (400 tests), et 300 m (900 tests). Le trait rouge représente la moyenne globale ( $M_p$ ); b) Boîtes à moustaches de l'ensemble des erreurs calculées à partir de forages simulés tous les 100 m, 200 m, et 300 m.



**Figure 16 :** Figure montrant les différents variogrammes que l'on peut obtenir en simulant des forages espacés de 100 m, 200 m, 250 m et 300 m (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des variogrammes obtenus. Les variogrammes ont été calculés pour  $P_2O_5$  (%pds).

#### 5.4 Test des techniques d'interpolation spatiales (IDW et krigeage)

Un extrait du modèle de blocs de la zone à Paul a été utilisé pour tester l'influence des méthodes d'interpolation IDW et krigeage sur la moyenne. L'extrait utilisé correspond aux blocs situés à l'élévation -2,5 m (**Figure 17-a**) ; les tests ont donc été effectués en deux dimensions.

Dans le cadre de ce test, des échantillons ont été pris au 50 m (**Figure 17-b**) et ont été utilisés pour interpoler les données avec les méthodes IDW (**Figure 17-c**) et krigeage (**Figure 17-d**).

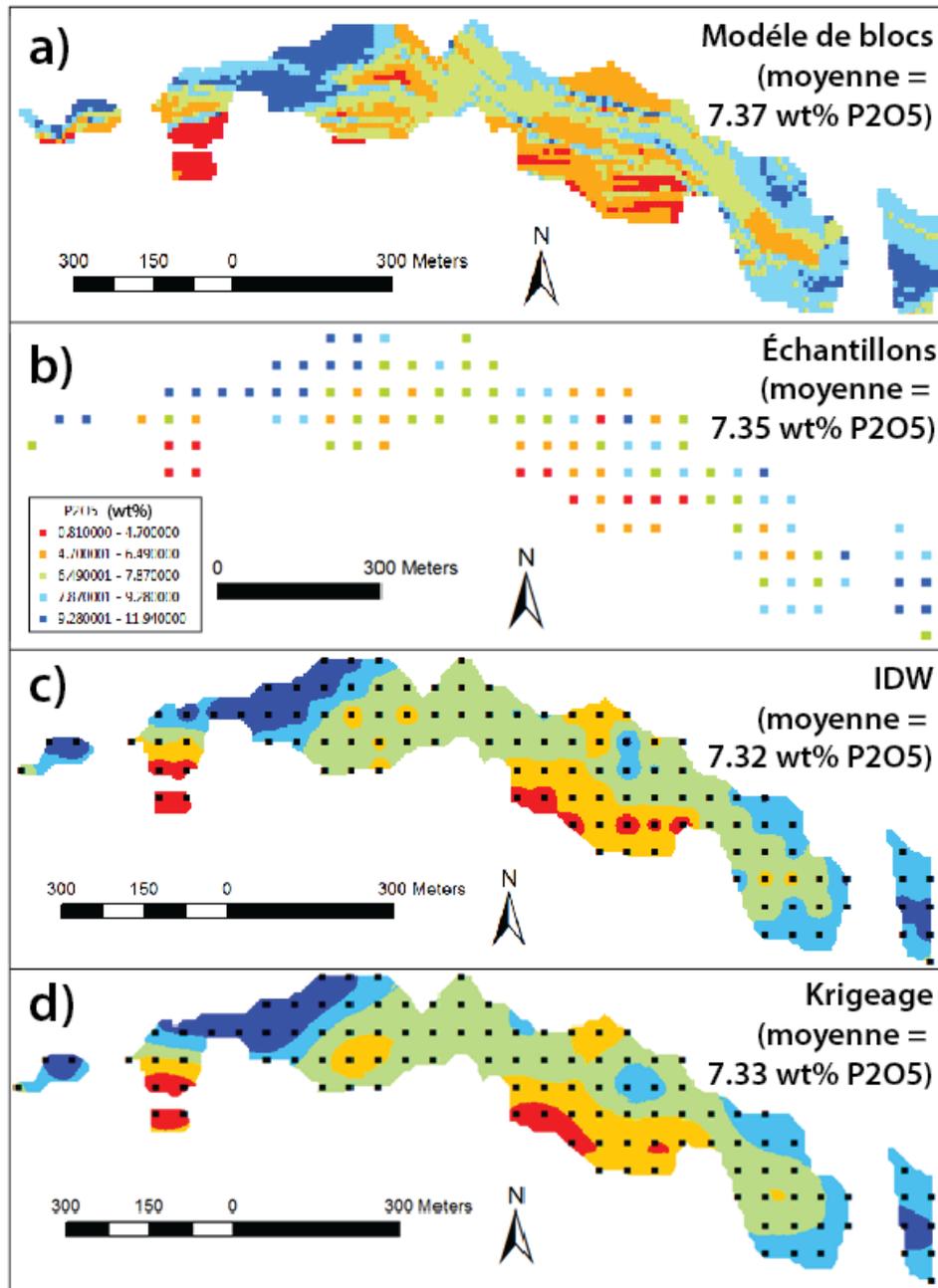
Avec un forage au 50 m et des blocs aux 10 m, il existe 25 possibilités de prendre des échantillons : le test a donc été répété 25 fois (utilisation du module ArcPy pour l'atomisation du processus). Les interpolations utilisées sont : 1) IDW à la puissance 2 ; et 2) krigeage ordinaire, avec la transformation « normal score ». Notons que l'interpolation de type krigeage produit une carte plus réaliste que celle produite avec IDW (**Figure 17-c, d**).

Pour chaque test, la moyenne des valeurs de  $P_2O_5$  (%pds) a été calculée à partir des échantillons prélevés et à partir des interpolations (« clippées » à la zone du dépôt). Les résultats sont montrés par la **Figure 18**.

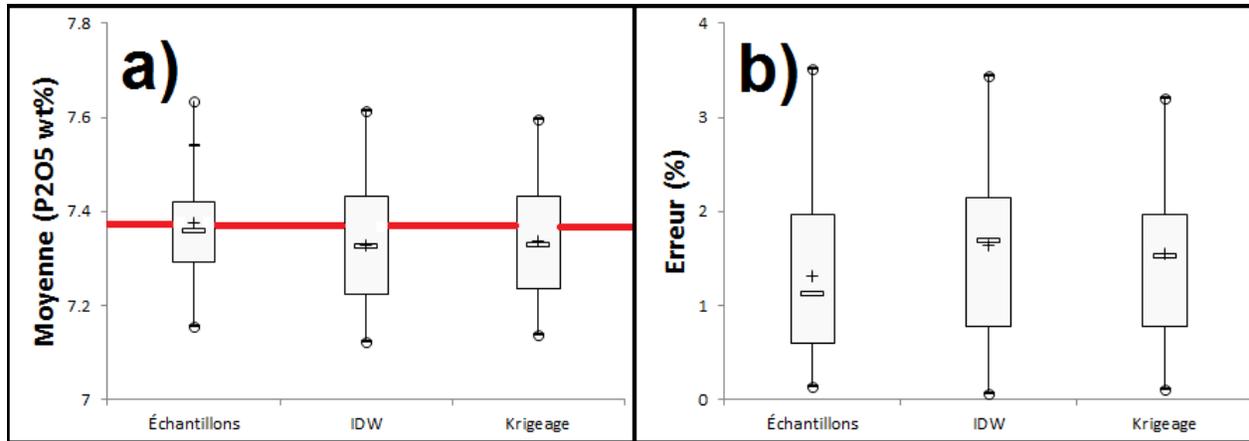
L'erreur obtenue est systématiquement faible, puisque la zone a été suréchantillonnée pour les besoins de ce test. Il est observé que la majeure partie de l'erreur est induite par l'échantillonnage, et que les interpolations n'en ajoutent que très peu (**Figure 18-b**). Le calcul de ressources est une moyenne des valeurs des blocs du modèle. La justesse et la précision de ce calcul vont donc dépendre en majeure partie de la qualité des échantillons.

Notons que les interpolations sont effectuées afin de représenter la distribution tridimensionnelle des teneurs, afin de permettre une planification de l'extraction, etc. Pour le calcul des ressources, la qualité de cette interpolation compte moins, et les techniques d'interpolation seront donc peu discutées dans le cadre de ce projet.

Le principal intérêt d'une interpolation, du point de vue du calcul des ressources, et cependant de palier aux distributions spatiales non constantes des échantillons. Notons cependant que lors des tests effectués ici, les échantillons sont pris de façon régulière dans l'espace (mailles carrées), et approximativement donc la moyenne des teneurs aussi bien que les interpolations. Avec des données de forages, l'interpolation spatiale permet de pallier au fait que les échantillons ne sont pas répartis de façon régulière dans l'espace, et elle est donc nécessaire en amont de tous calculs de ressources.



**Figure 17 :** a) Carte des valeurs de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%pds) à l'élévation -2,5 m (extrait du modèle de blocs de la zone Paul). L'un des 25 tests effectués sur les données de la carte (a) est montré par les cartes (b), (c), (d) : b) échantillons extraits de la carte (a), simulant une maille de forages au 50 m ; c) interpolation type IDW à partir des échantillons pris au 50 m ; d) interpolation de type krigeage.



**Figure 18 :** a) Boîtes à moustaches de l'ensemble des moyennes calculées à partir d'échantillons pris aux 50 m (voir **Figure 17-b**) et d'interpolations de type IDW et krigeage (25 tests, 25 données dans chaque boîte à moustache); b) Boîtes à moustaches de l'ensemble des erreurs calculées pour les moyennes calculées par les 25 tests (25 données par boîte à moustaches). La ligne rouge positionne la moyenne « réelle » (voir **Figure 17-a**).

### 5.5 Conclusions pour la zone Paul

D'après les tests effectués dans cette section, un espacement de 200 m en N-S et E-O (environ 30 forages), ou un espacement de 200 m en N-S et de 100-200 m en E-O (environ 60 forages) semble suffisant pour estimer la moyenne des valeurs de  $P_2O_5$  (%pds) et produire des variogrammes de bonne qualité dans la zone Paul.

---

## 6 DONNÉES SMV DE BRACEMAC-MCLEOD

---

### 6.1 Informations sur les SMV de Bracemac-McLeod

Les lentilles de sulfures massifs sont subparallèles aux couches stratigraphiques et ont des orientations moyennes reportées ci-dessous (d'après Adair 2009). Les forages simulés dans cette section sont normaux à ces plans.

- Bracemac : N130-145, 40-60° SW
- McLeod : N110, 65-70° SW

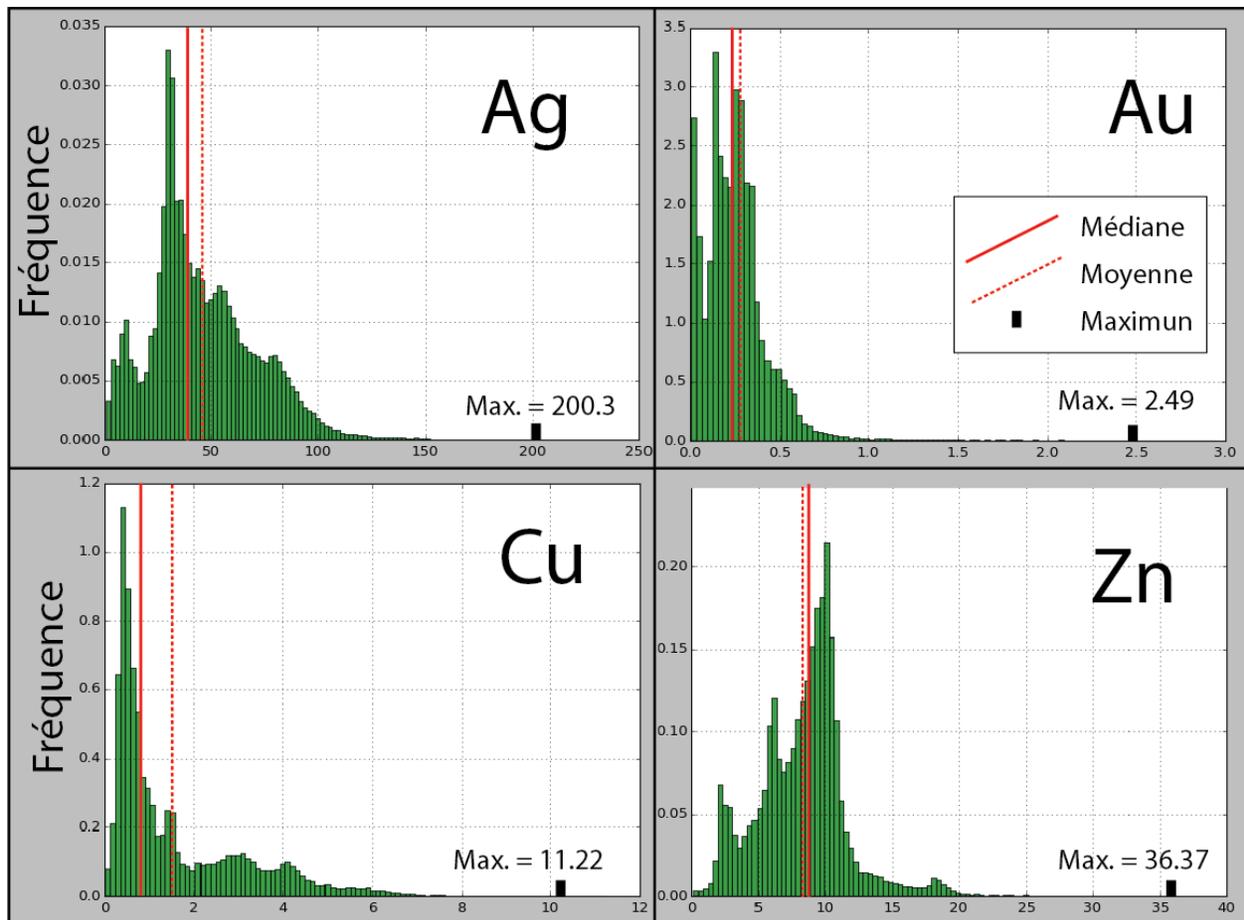
Un total de 54 forages (McLeod) et 62 (Bracemac) forages ont été effectués (Adair 2009). Les ressources estimées en 2009 (Adair 2009) étaient indiquées pour la plupart, et en partie inférées (~15 %, West McLeod et Copper Stringer Zone), et ont été définies à partir de la quantité suivante de forages :

- *Bracemac Upper* : 4 forages (espacement de ~ 30-40 m entre les forages);
- *Bracemac Zone* : 7 forages (espacement de ~ 40-60 m entre les forages);
- *Bracemac Key tuffite* : 26 forages (espacement de ~ 40-60 m entre les forages);
- *McLeod Zone* : 38 forages (espacement de ~40-50 m entre les forages);
- *West McLeod* : 7 forages (espacement de ~30-60 m entre les forages);
- *Copper Stringer Zone* : 15 forages (espacement de ~50 m entre les forages).

### 6.2 Données de Bracemac Upper: MDL\_Data\_30

Le bloc modèle « MDL\_Data\_30 » représente la lentille de sulfures massifs de Bracemac Upper, de Glencore. Le modèle contient 43 283 blocs, qui mesurent chacun 1x1x0.5 m (dans les directions x, y, et z). Ci-dessous, des statistiques ont été calculées sur les données d'Ag, Au, Cu, et Zn.

Pour ces données, les histogrammes sont systématiquement étirés vers les valeurs hautes, surtout pour les teneurs de Cu. Seules les teneurs en Zn s'approchent d'une distribution normale (**Figure 19**).



**Figure 19 :** Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu et Zn de la lentille de *Bracemac Upper* (MDL\_Data\_30).

Diverses compagnes de forages ont été simulées à partir des données du modèle de bloc. Les forages simulés sont orientés N010 et plongent de 30° vers le nord. L'espacement entre les forages est similaire en x et en y et varie de 1 m à 50 m.

Pour chaque test, les valeurs des moyennes, médianes, et écarts types ont été calculés à partir des échantillons des forages simulés. La probabilité que ces données s'approchent des valeurs calculées à partir du bloc modèle entier est présentée par la **Figure 20**. Les résultats étant similaires pour les divers types de données statistiques (**Figure 20**), nous nous concentrerons sur les moyennes (**Figure 21**).

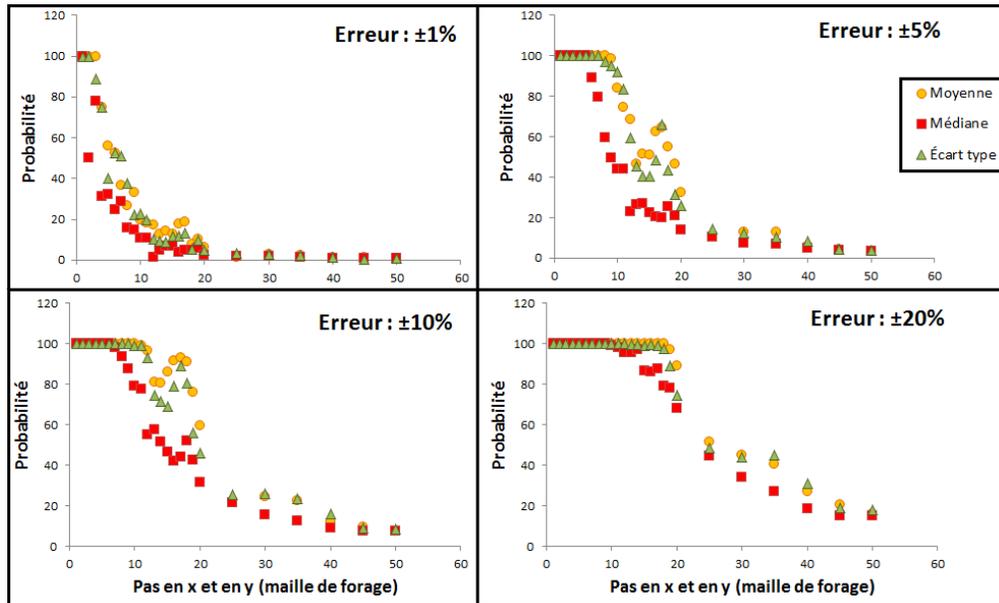
Il est observé qu'avec des mailles de forages < 10-15 m, la moyenne globale est très bien estimée. L'estimation de la moyenne est encore acceptable avec des forages aux 20 m (erreurs moyennes de 5 %, et généralement < 10 % dans la plupart des cas). À partir d'une maille aux 25 m, l'erreur sur l'estimation de la moyenne devient trop importante (**Figure 21**).

Un forage aux 20 m semble donc un bon compromis pour ce dépôt.

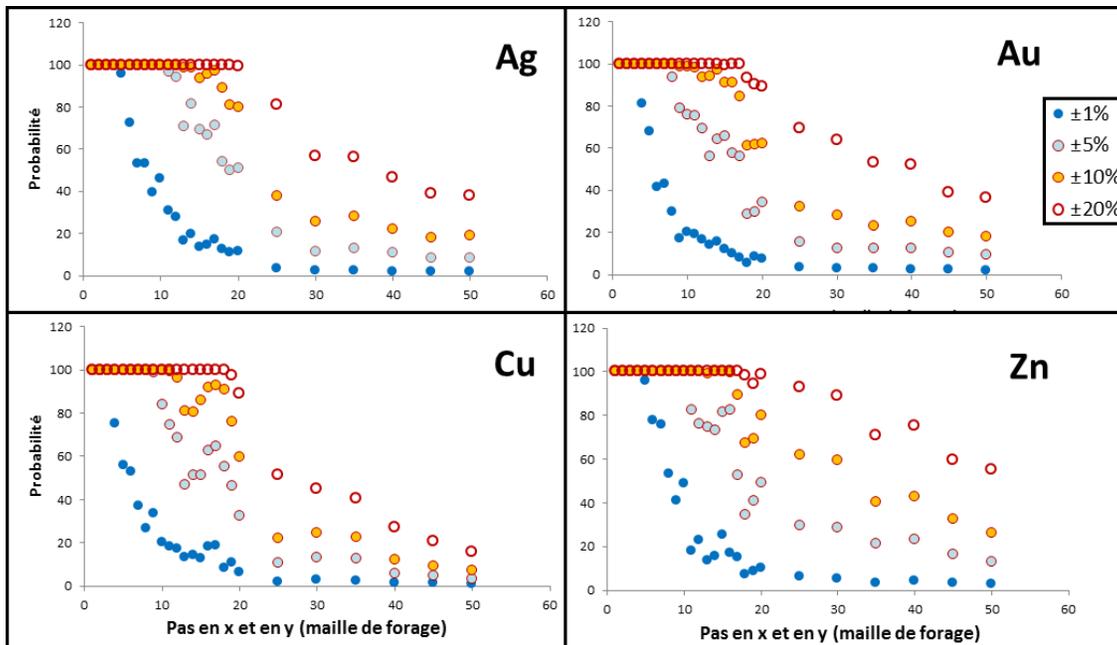
En ce qui concerne les variogrammes, un forage aux 10 m permet d'obtenir des variogrammes cohérents (**Figure 22**), alors qu'un forage aux 20 m ne permet pas d'obtenir des variogrammes expérimentaux cohérents (**Figure 23**). Dans le détail, aucun des variogrammes n'est de bonne qualité. L'utilisation de seuils (tests non montrés ici) n'a pas permis d'améliorer de beaucoup le variogramme du Cu.

Le problème principal est que le nombre de forages, et donc d'échantillons, est insuffisant au calcul de variogrammes cohérents, et ce parce que le dépôt a une taille trop modeste.

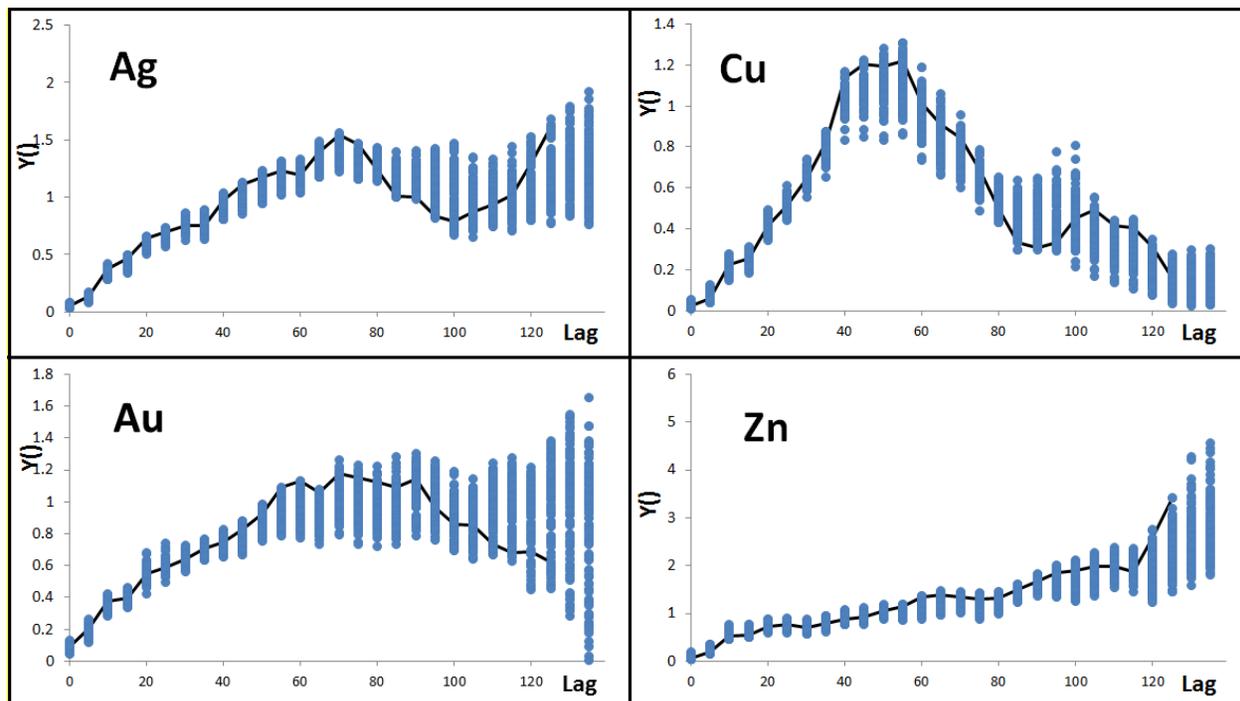
En conclusion, avec un forage au 20 m, la moyenne est approximée de façon raisonnable, mais les variogrammes ne sont pas cohérents. Avec un forage aux 20 m, une interpolation de type IDW devrait être préférée.



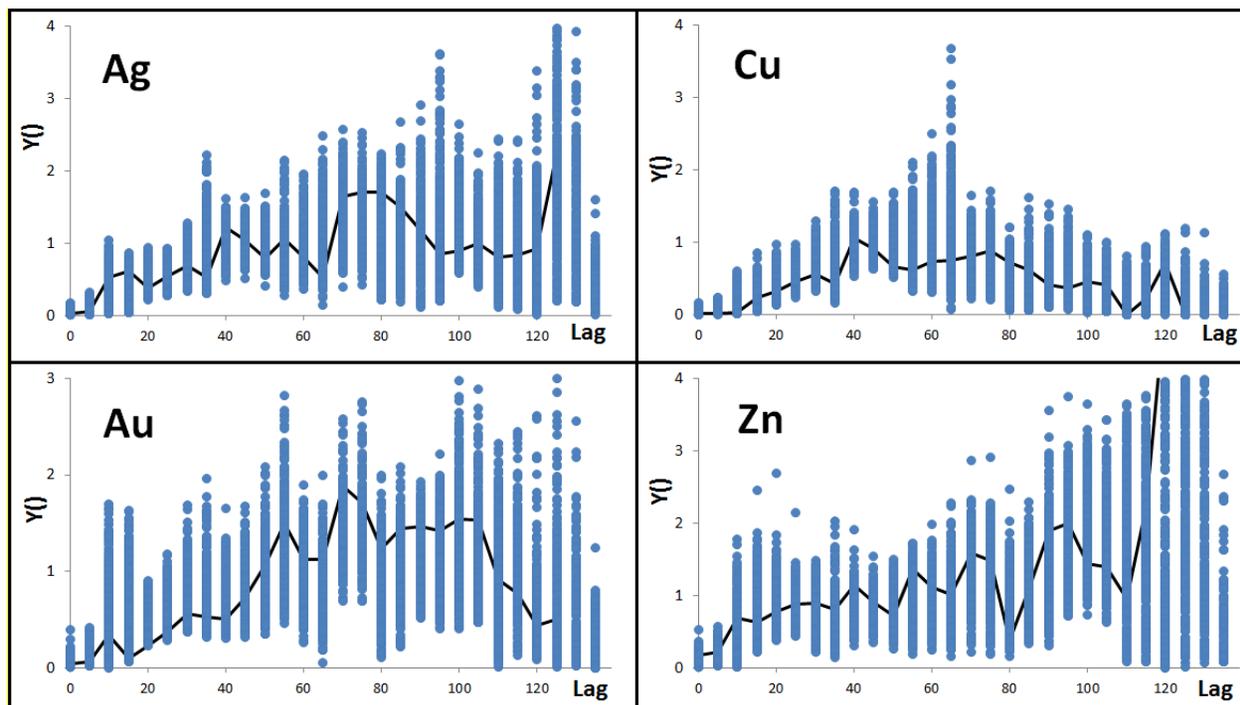
**Figure 20 :** Probabilité de s'approcher des valeurs de moyenne, médiane, et écart-type à partir d'échantillons pris à divers intervalles, pour les teneurs en Cu.



**Figure 21 :** Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne ( $M_E$ ) pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille au 20 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne globale ( $M_P$ ) deviennent faibles.



**Figure 22 :** Figure montrant les 100 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 10 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 100 variogrammes obtenus.



**Figure 23 :** Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus.

### 6.3 Données de *Bracemac Main*: MDL\_Data\_22

Le bloc modèle « MDL\_Data\_22 » représente la lentille de sulfures massifs de *Bracemac Main*, de Glencore. Le modèle contient 349 023 blocs, qui mesurent chacun 1x1x0.5 m (dans les directions x, y, et z). Ci-dessous, des statistiques ont été calculées sur les données d'Ag, Au, Cu, et Zn.

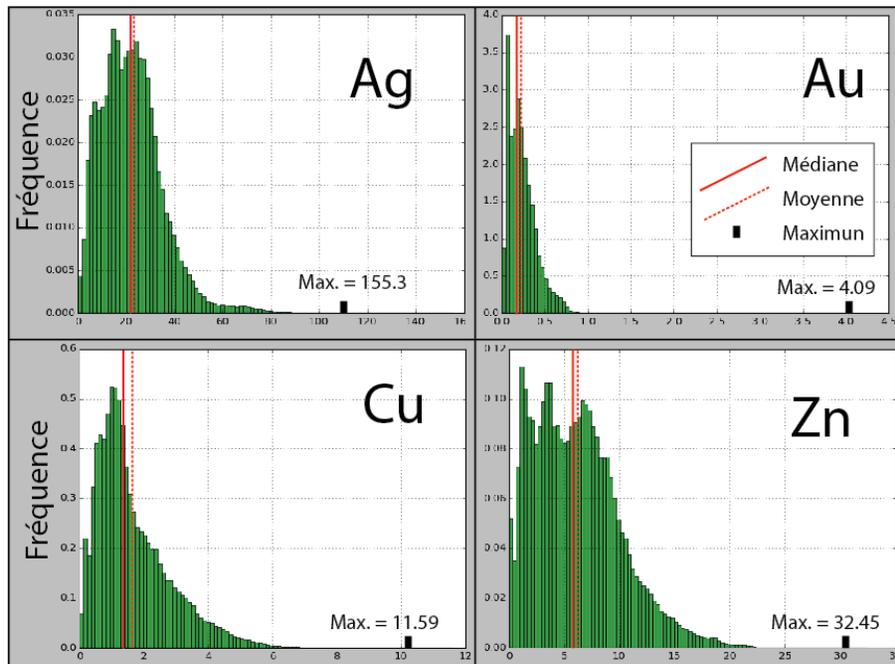
Les histogrammes sont systématiquement étirés vers les valeurs hautes (**Figure 24**). Ce comportement est particulièrement marqué pour Cu et Zn. Pour Au et Ag, les données présentent une distribution quasi normale, quelques valeurs extrêmes mises à part. Les teneurs en Zn sont particulièrement problématiques : l'histogramme est étiré vers les valeurs hautes et est tronqué au niveau des valeurs basses (**Figure 24**).

Les forages simulés sont orientés N010 et plongent de 30° vers le nord. L'espacement entre les forages est similaire en x et en y et varie de 1 m à 95 m.

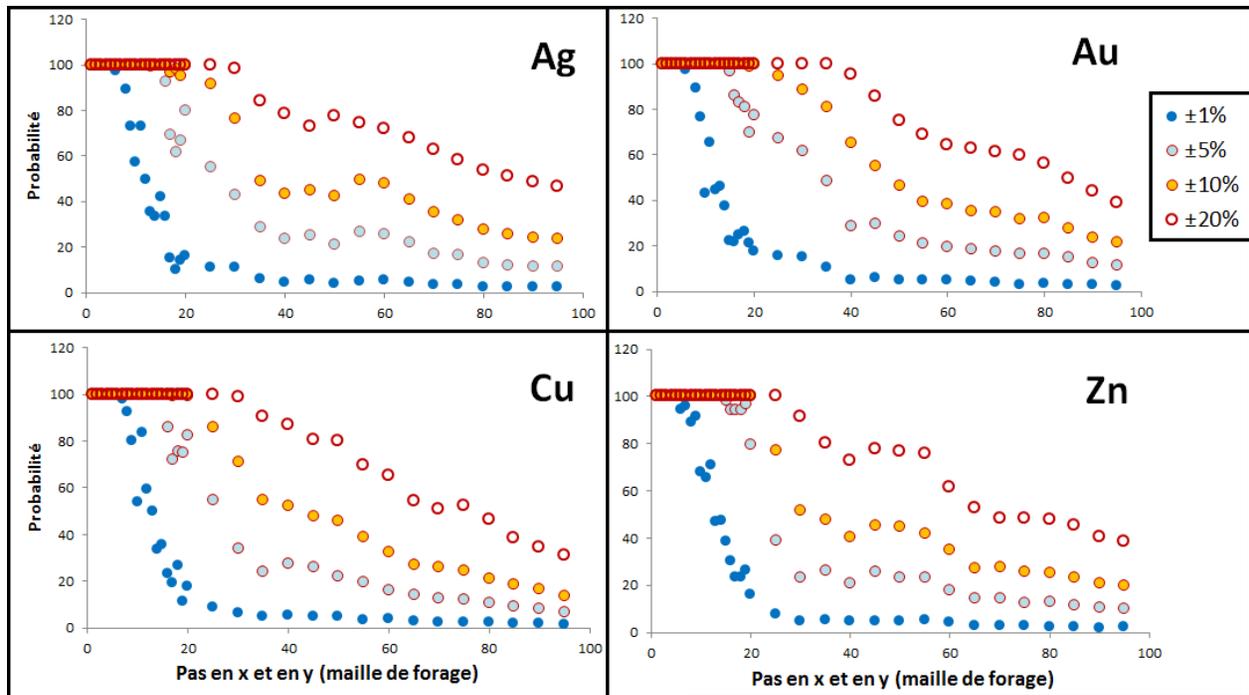
La **Figure 25** montre la probabilité que l'on a de s'approcher des valeurs vraies des moyennes des teneurs en Ag, Au, Cu, Zn, pour diverses mailles de forages. Pour Ag, Cu, et Au, les chances de s'approcher de la valeur globale de la moyenne sont bonne si les trous de forages ont un espacement de 20 m, voir 25 m. Les erreurs sur l'estimation de la moyenne sont trop importantes à partir de mailles au 30 m (Cu, Zn) et 35m (Ag, Au). Une maille de forages aux 20-25 m semble donc appropriée pour ce dépôt.

Les variogrammes sont de bonnes qualités lorsque les forages sont effectués aux 20 m, et permettent une interpolation de type krigeage (**Figure 26**). Leurs portées sont systématiquement de 15 m. Avec une maille de forages aux 40 m, les variogrammes deviennent inexploitable, et une interpolation de type IDW est donc recommandée si les forages ont été effectués avec un tel espacement (**Figure 27**).

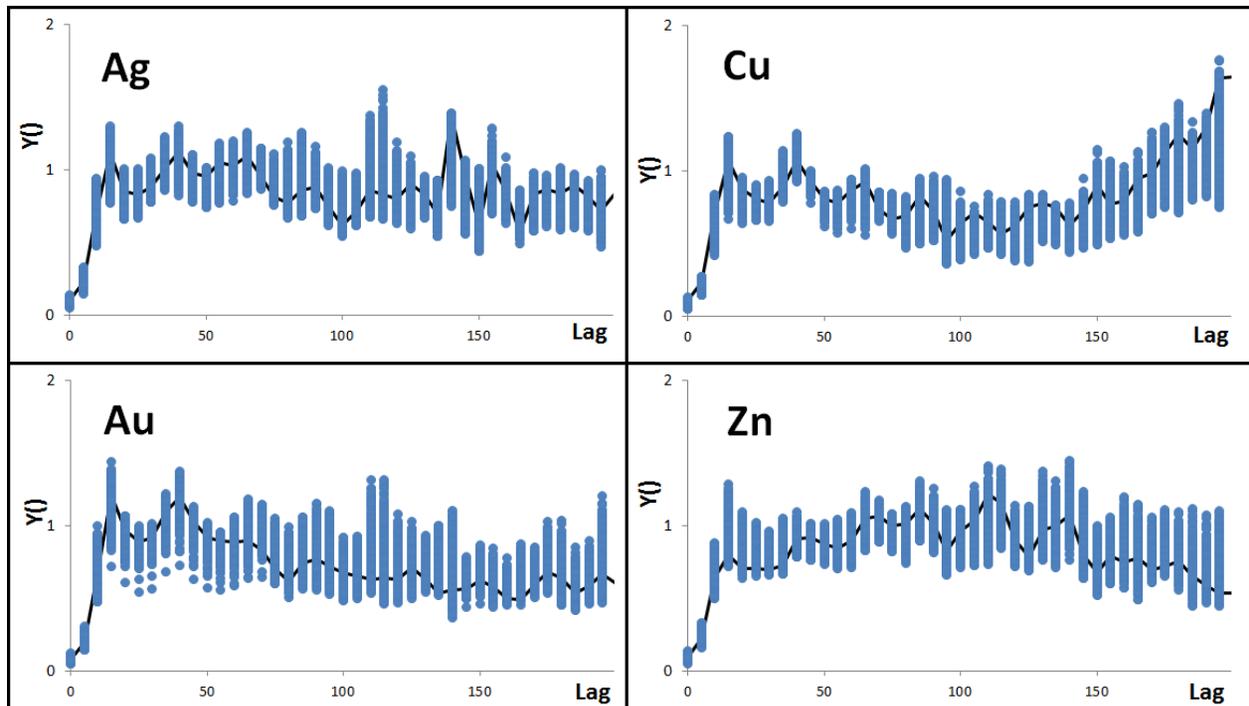
Malgré une portée de 15 m, il apparait qu'une maille de forages aux 20-25 m est suffisante pour approximer la moyenne et décrire les relations spatiales des teneurs de la lentille *Bracemac Main*.



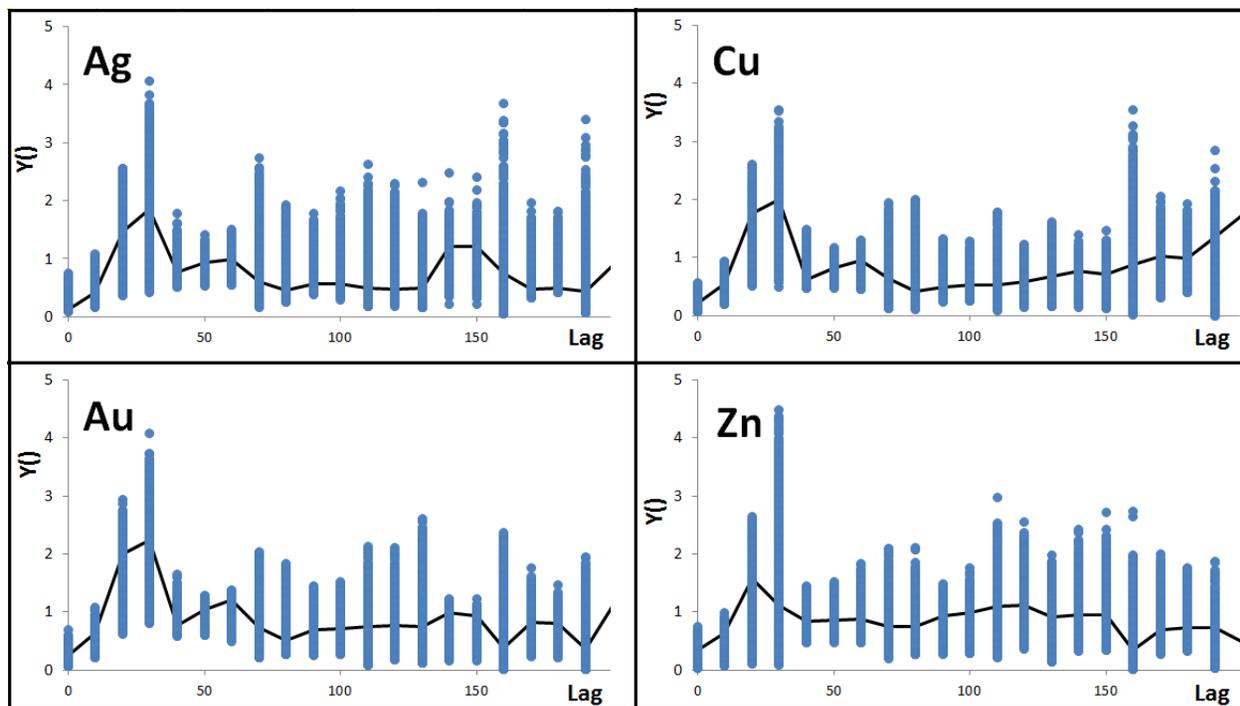
**Figure 24** : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de *Bracemac Main* (MDL\_Data\_22).



**Figure 25 :** Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille aux 20 m à 40 m, selon les substances, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne deviennent trop faibles.



**Figure 26 :** Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus.



**Figure 27** : Figure montrant les 1600 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 1600 variogrammes obtenus.

#### 6.4 Données de *Bracemac Key Tuffite*: MDL\_Data\_23

Le bloc modèle « MDL\_Data\_23 » représente la lentille de sulfures massifs de *Bracemac Key Tuffite*, de Glencore. Le modèle contient 1 067 918 blocs, qui mesurent chacun 1x1x0.5 m (dans les directions x, y, et z). Ci-dessous, des statistiques ont été calculées sur les données d'Ag, Au, Cu, et Zn.

Les histogrammes sont systématiquement étirés vers les valeurs hautes (**Figure 28**). Les teneurs en Zn principalement, et dans une moindre mesure celles du Cu, sont particulièrement problématiques : les histogrammes sont étirés vers les valeurs hautes et sont tronqués au niveau des valeurs basses (**Figure 28**).

Les forages simulés sont orientés N010 et plongent de 30° vers le nord. L'espacement entre les forages est similaire en x et en y et varie de 1 m à 100 m.

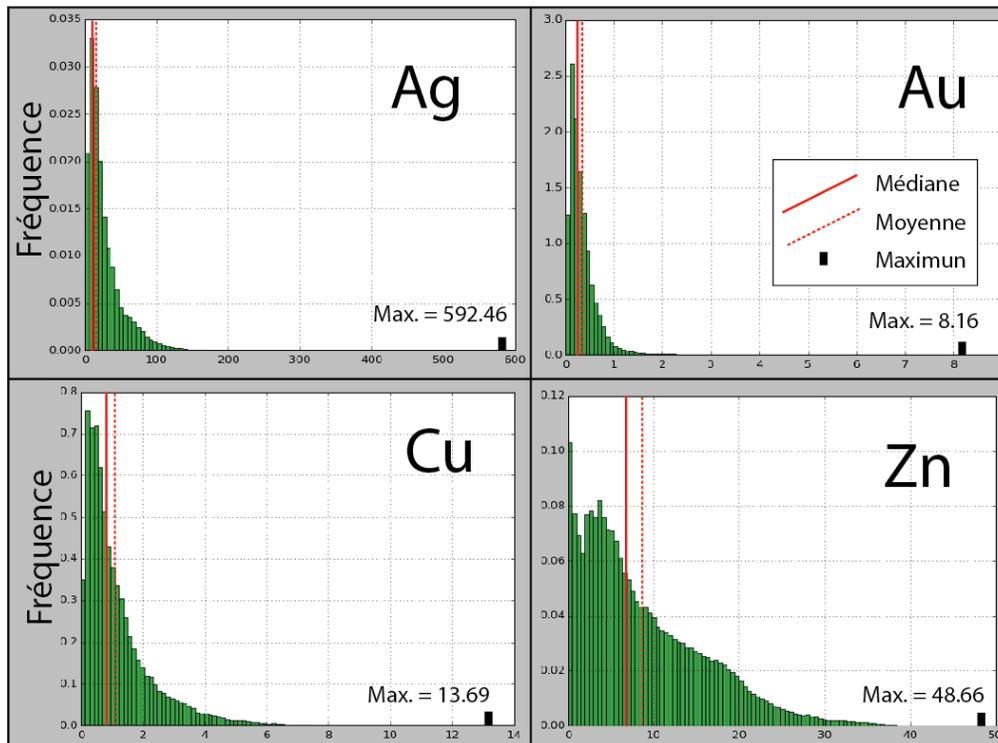
La **Figure 29** montre la probabilité que l'on a d'obtenir les valeurs vraies des moyennes des teneurs en Ag, Au, Cu, Zn, pour diverses mailles de forages. Avec une maille de forages aux 20 m, les chances de s'approcher de la valeur de la moyenne avec une erreur d'environ 5 % sont très bonnes. Avec un forage aux 30 m, la moyenne est approximée avec une erreur de 10 % environ. La moyenne peut encore être relativement bien approximée avec une maille de forages aux 40 m, mais au-delà de 45-50 m, les chances de s'approcher de la moyenne « vraie » deviennent faibles. Une maille de forages aux 20-30 m semble donc appropriée pour ce dépôt.

Les variogrammes sont de bonnes qualités lorsque les forages sont effectués aux 20 m, et permettent une interpolation de type krigeage pour Zn et Cu (**Figure 30**). Pour Ag et Au, les variogrammes peuvent parfois être difficiles à interpréter.

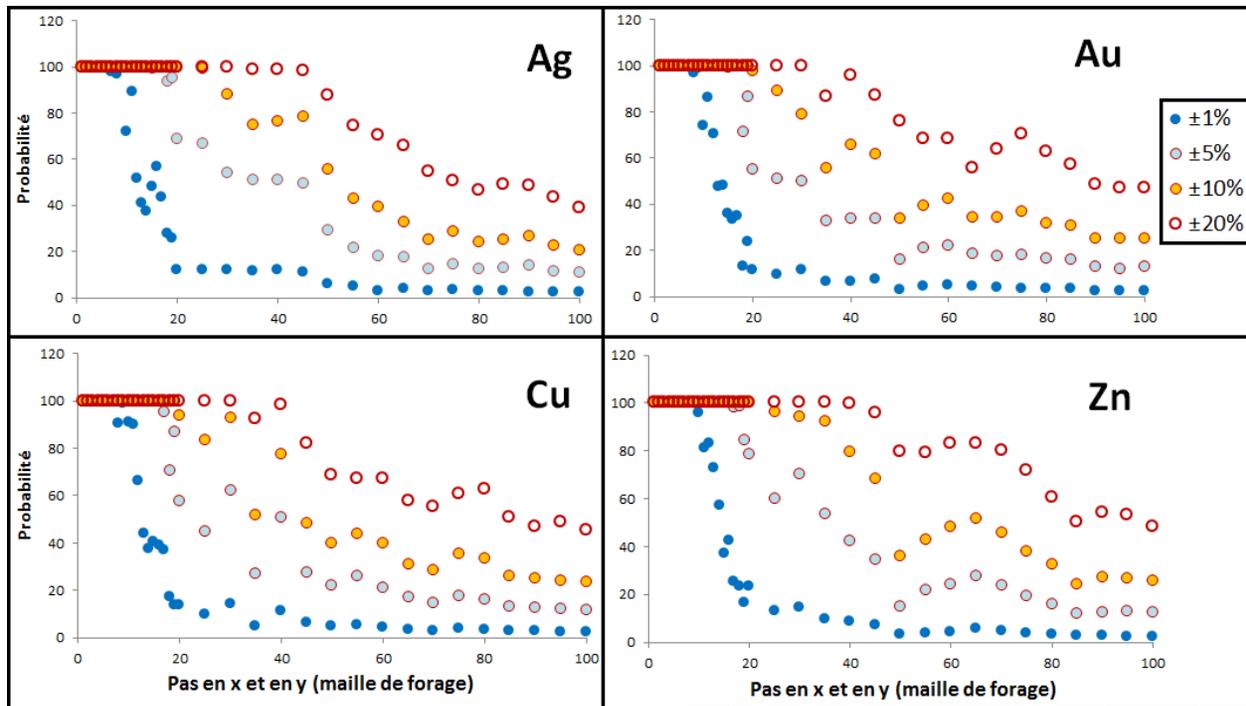
Leurs portées sont systématiquement de 15 m. Avec une maille aux 30 m, les variogrammes deviennent difficiles à interpréter, celui du Zn mis à part (**Figure 31**).

Avec une maille de forages aux 40 m, les variogrammes deviennent inexploitable, et une interpolation de type IDW est donc recommandée si les forages ont été effectués avec un tel espacement (**Figure 32**).

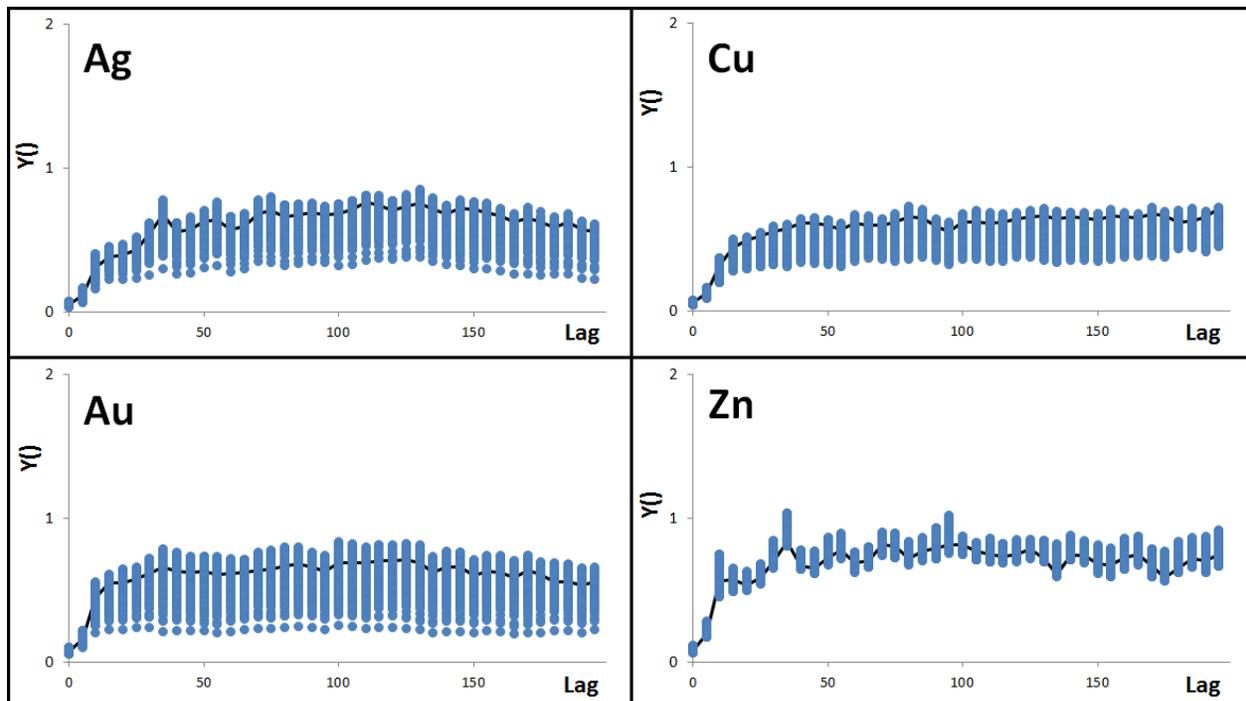
Malgré une portée de 15 m, il apparait qu'une maille de forages aux 20-30 m soit suffisante pour approximer la moyenne et décrire les relations spatiales des teneurs de la lentille *Bracemac Key Tuffite*.



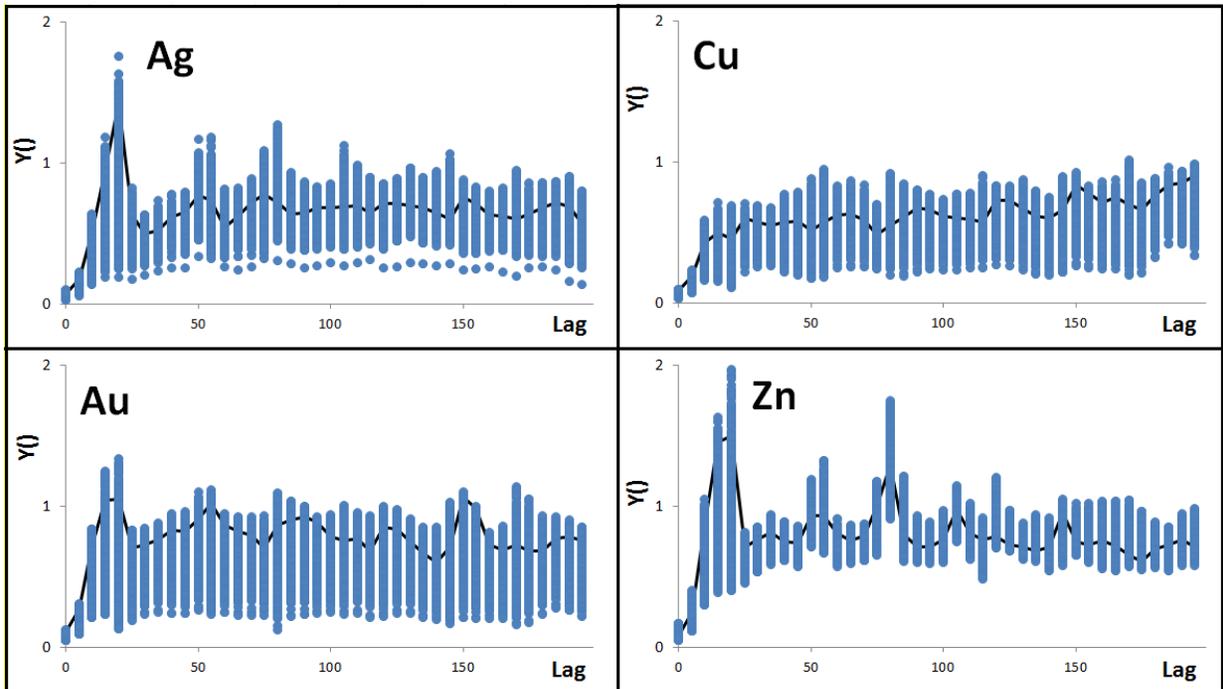
**Figure 28** : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de *Bracemac Upper* (MDL\_Data\_30).



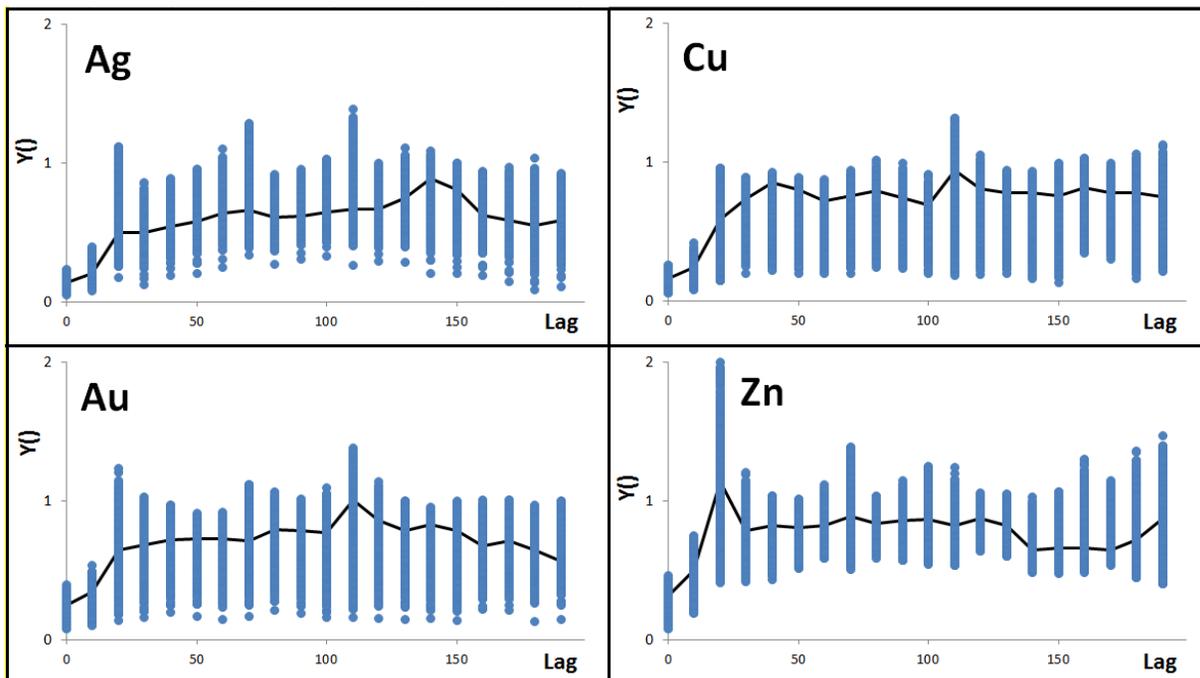
**Figure 29 :** Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille au 20 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne « vraie » deviennent trop faibles.



**Figure 30 :** Figure montrant les 400 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 400 variogrammes obtenus.



**Figure 31 :** Figure montrant les 900 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 30 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 900 variogrammes obtenus. La médiane des 400 variogrammes qui peuvent être calculés à partir d'échantillons pris aux 20 m est également montrée (ligne rouge).



**Figure 32 :** Figure montrant les 1600 variogrammes que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 1600 variogrammes obtenus. La médiane des 400 variogrammes qui peuvent être calculés à partir d'échantillons pris aux 20 m est également montrée (ligne rouge).

## 6.5 Données de Bracemac Main: MDL\_Data\_22 — Simulation conditionnelle

La simulation conditionnelle de type SGS a été testée sur une partie du modèle de blocs de *Bracemac Main* de Glencore. Cette simulation a été effectuée sur des données 2D, et le modèle de blocs a été préparé de la façon suivante en amont du traitement :

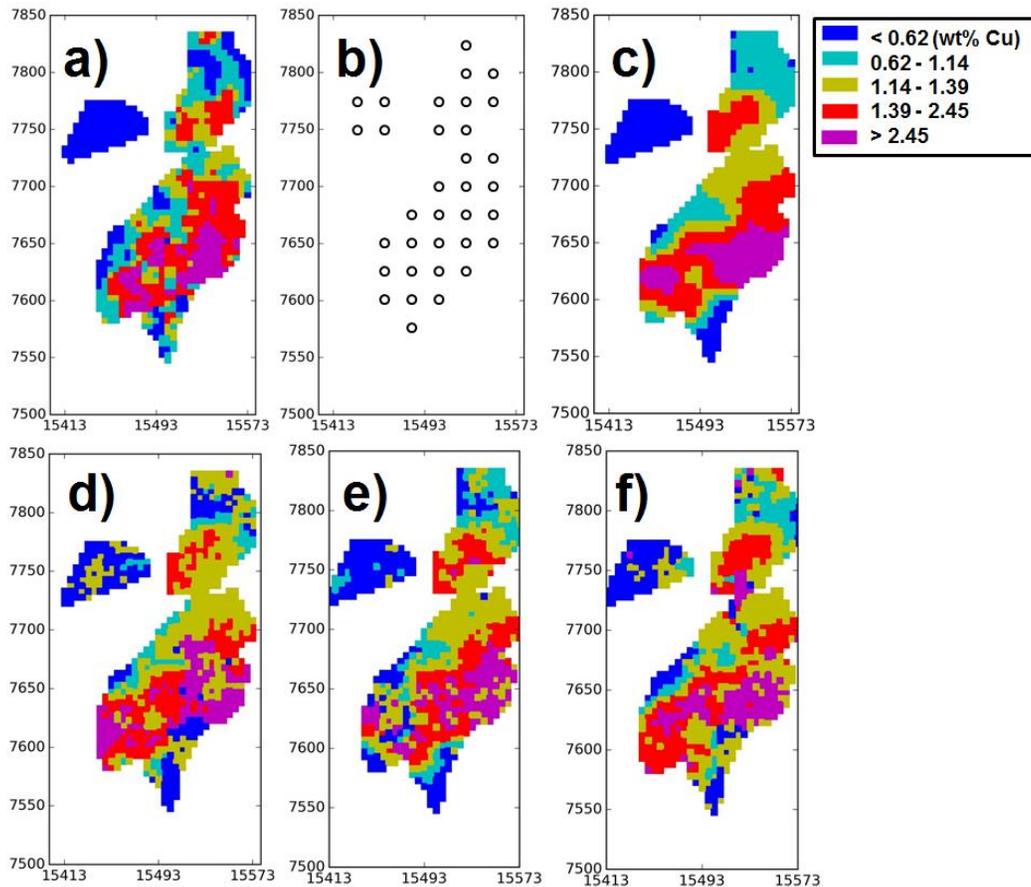
- 1) Projection des blocs (points) sur un plan passant par le centre de la lentille et parallèle à ses axes longs et intermédiaires.
- 2) Rotation des données projetées à l'horizontale. Les étapes (1) et (2) permettent de s'affranchir des données d'élévation et d'obtenir des données 2D.
- 3) Sous-échantillonnage, afin de réduire la quantité de données à traiter. Pour ce faire, les teneurs en Cu ont été moyennées par intervalles de 5 m par 5 m.
- 4) Résultat : carte 2D des teneurs en Cu (contenant 910 points ; test 1), avec une teneur en Cu tous les 5 m pour le test 1 (en x et en y) (**Figure 33-a**).

Ensuite, un échantillon de la carte 2D des teneurs en Cu obtenue a été pris tous les 25 m, ce qui a permis de simuler une campagne de forages aux 25 m (**Figure 33-b**). Ces échantillons extraits de la carte initiale ont été utilisés pour effectuer des interpolations de type krigeage simple, dans le cadre de la simulation de type SGS. La simulation a été effectuée 100 fois (**Figure 33-d, e, f**) et la combinaison des résultats a permis de produire une carte des écarts types des résultats de ces 100 tests, pour chacun des 910 points du modèle.

Cette carte montre qu'avec un forage régulier aux 25 m, certaines zones sont bien interpolées (zones vertes ; **Figure 34**) alors qu'à d'autres endroits, il faut accorder moins de confiance à l'interpolation (zones rouges ; **Figure 34**).

Les zones rouges de la **Figure 34** indiquent les endroits où l'interpolation de type krigeage simple a le plus de chances d'être inexacte ; ce sont les zones « à risque ».

En conclusion, la simulation conditionnelle devrait faire l'objet d'une évaluation plus poussée, dans le cadre d'un autre projet. Cette technique a un très grand potentiel, car elle permet de porter un jugement sur la qualité des interpolations et d'identifier les zones qu'il est nécessaire d'aller échantillonner plus en détail.

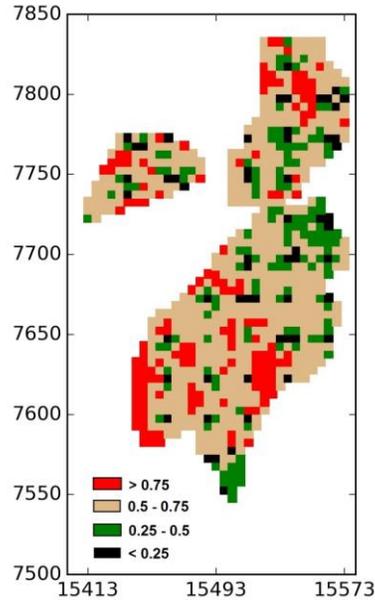


**Figure 33** : Cartes du test 1 (taille des blocs = 5 m\*5m). a) Carte des teneurs en Cu produite à partir du modèle de blocs de *Bracemac Main* ; b) Position des forages aux 25 m simulés pour les besoins de ce test ; c) Combinaison (moyenne) des teneurs en Cu produites par les 100 simulations. Notez que cette carte est très similaire à celle qui pourrait être obtenue avec les échantillons du forage aux 25 m et une interpolation de type krigeage ; d-e-f) Exemples de cartes produites par 3 des 100 simulations effectuées.

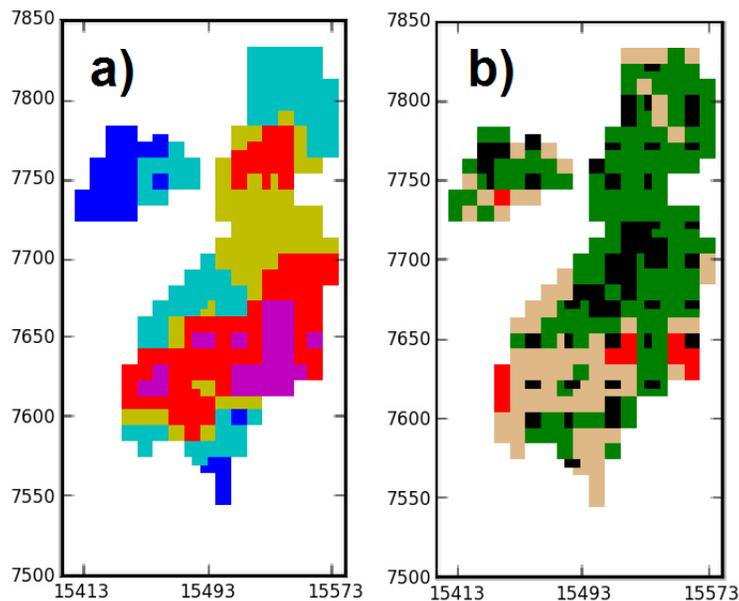
Un second test (test 2) a été effectué par la suite. Le test 2 est similaire en tous points au test 1, sauf que l'interpolation a été effectuée selon un grille contenant des points espacés aux 10 m (test 2), et non pas aux 5 m (test 1). Ceci revient à créer un modèle de blocs contenant des blocs de plus grande taille (**Figure 35**).

Les résultats montrent qu'avec des blocs plus grossiers, l'interpolation est plus robuste, mais moins détaillée (**Figure 35-b**). Ce test montre que le choix de la taille des blocs a une grande influence sur la classification des ressources.

Ce phénomène porte le nom *d'effet de support* (section 2). L'évaluation de la taille optimale des blocs pourrait faire l'objet d'un projet CONSOREM à part entière, et sera abordée ci-dessous (voir section 7).



**Figure 34** : Carte du test 1 (taille des blocs = 5 m\*5m). Carte des écarts types. Pour chacun des 910 points de la carte, 100 teneurs de Cu équiprobables ont été simulées. Les écarts-types ont été calculés à partir de ces 100 données, pour chacun des points du modèle.



**Figure 35** : Cartes du test 2 (taille des blocs = 10 m\*10m) ; a) Combinaison (moyenne) des teneurs en Cu produites par les 100 simulations. Notez que cette carte est très similaire à celle qui pourrait être obtenue avec les échantillons du forage aux 25 m et une interpolation de type krigeage ; b) Carte des écarts-types. Pour chacun des 280 points de la carte, 100 teneurs de Cu équiprobables ont été simulées. Les écarts types ont été calculés à partir de ces 100 données, pour chacun des points du modèle. Les échelles de couleurs sont les mêmes que celles utilisées aux figures 33 et 34.

## 6.6 Données de Glencore : McLeod — MDL\_DATA\_40

Le bloc modèle « MDL\_Data\_30 » représente la lentille de sulfures massifs de McLeod, Abitibi. Le modèle contient 2 391 113 blocs ayant des valeurs de Cu ou Zn > 0, qui mesurent chacun 1x1x0.5 m (dans les directions x, y, et z). Ci-dessous, des statistiques ont été calculées sur les données d'Ag, Au, Cu, et Zn.

Les corps de sulfures massifs sont orientés environ N110 et pendent ~68° SW, subparallèles à la stratigraphie (Adair 2009). Les forages modélisés dans cette section sont perpendiculaires à ce plan (orientés N020, plongeants 22° NE).

Le modèle contient quelques valeurs aberrantes (Au = 0,1212, Ag = 83 646, Cu = 0,9752, Zn = 11 772) qui sont si fréquentes que cela crée une anomalie sur les histogrammes. Ces valeurs aberrantes ont été retirées et le modèle de blocs sur lequel les tests ont été effectués contient 1 874 310 blocs.

Les histogrammes sont systématiquement étirés vers les valeurs hautes (**Figure 36**). Celui de l'or est très ramassé (présence de valeurs aberrantes (*outliers*) ce qui est très anomal par rapport au reste de la population). Celui du Zn est particulièrement tronqué au niveau des valeurs basses. Les teneurs en Ag et Cu seront sans doute les plus faciles à interpoler (**Figure 36**).

La **Figure 37** montre la probabilité que l'on a d'obtenir les valeurs vraies des moyennes des teneurs en Ag, Au, Cu, Zn, pour diverses mailles de forages. Avec une maille de forages au 30 m, les chances de s'approcher de la valeur de la moyenne avec une erreur d'environ 5 % sont très bonnes. Avec un forage aux 40 m, la moyenne est approximée avec une erreur de 10 % environ, sauf pour Au (un forage aux 35 m est meilleur pour Au). Une maille de forages aux 50-60 m est encore acceptable pour Ag et Cu, (et Zn), mais pas pour Au. Une maille de forages aux 40 m semble donc appropriée pour ce dépôt.

Les variogrammes sont de bonnes qualités lorsque les forages sont effectués aux 20 m, et permettent une interpolation de type krigeage pour toutes les substances (**Figure 38**). Pour Au, la valeur du plateau varie selon les groupes d'échantillons. Il est donc difficile d'obtenir le bon modèle de variogramme pour cette substance. Les portées sont comprises entre 20 et 40 m.

Avec une maille aux 40 m, les portées sont d'environ 20 m à 40 m. Avec une telle maille, les variogrammes sont de bonnes qualités pour Cu, d'assez bonnes qualités pour Zn et Ag (interpolation de type krigeage possible), mais ne sont pas systématiquement de bonne qualité pour Au (IDW recommandé) (**Figure 39**).

Il apparaît qu'une maille de forages aux 40 m soit suffisante pour approximer la moyenne et décrire les relations spatiales des teneurs de la lentille de *McLeod*.

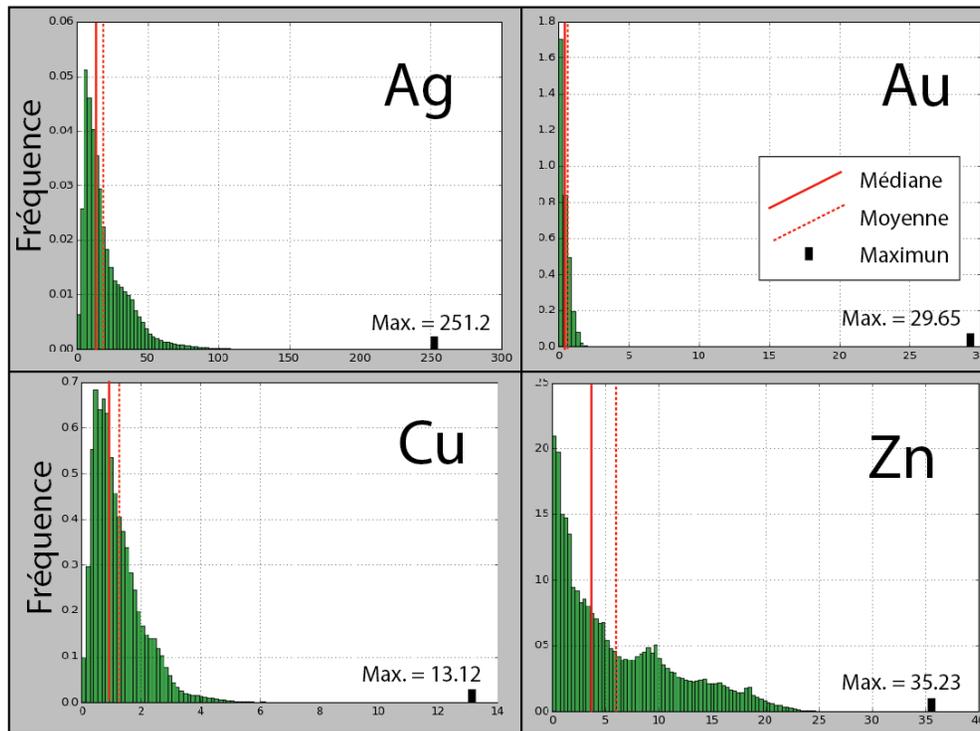


Figure 36 : Histogrammes des teneurs en Ag, Au, Cu, et Zn de la lentille de *McLeod* (MDL\_Data\_40).

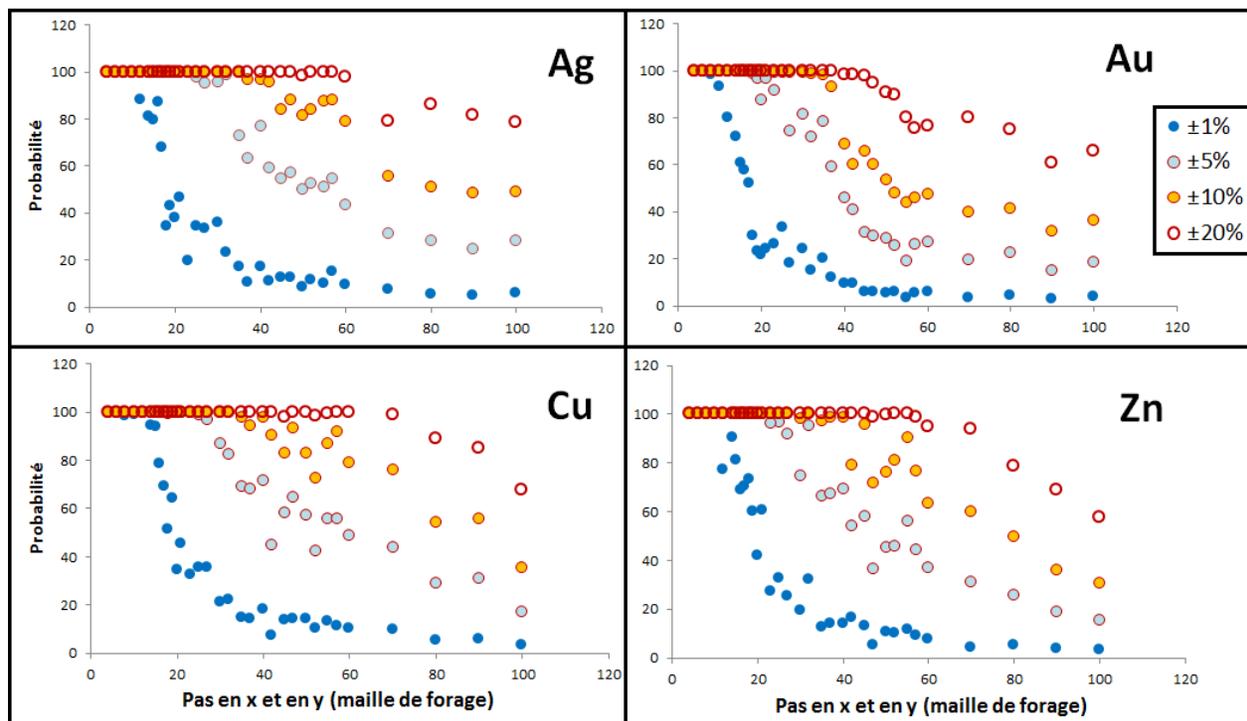
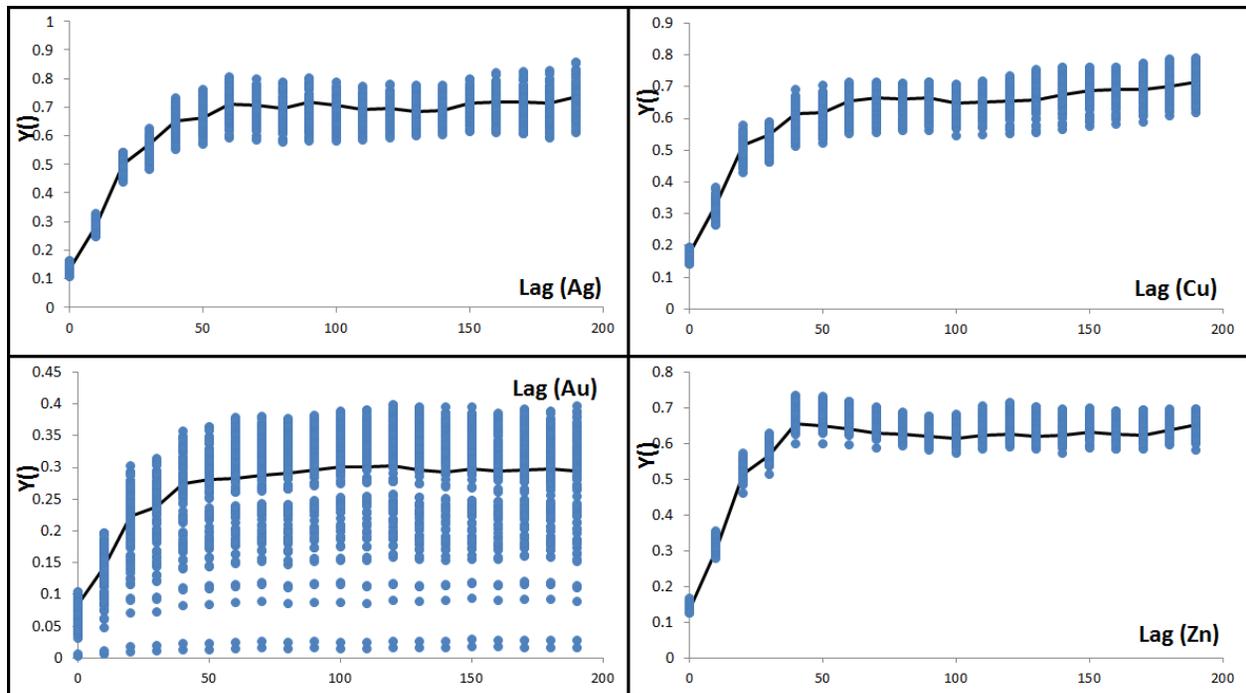
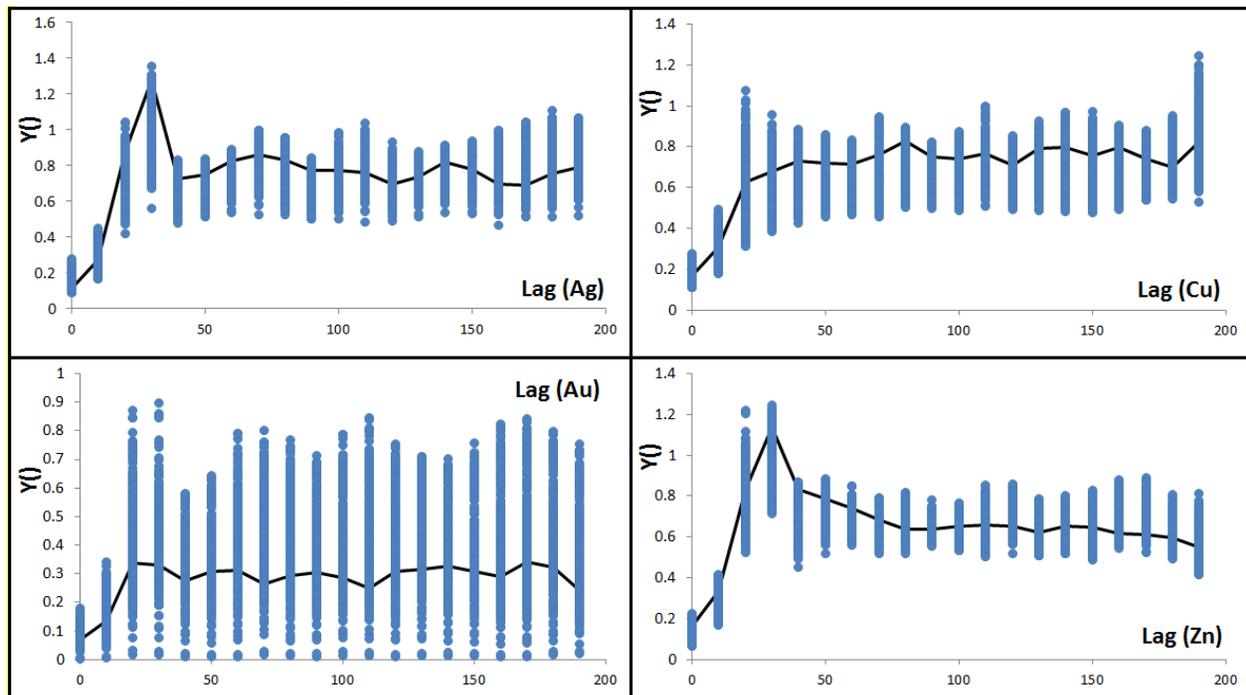


Figure 37 : Probabilité de s'approcher de la valeur de la moyenne pour Ag, Au, Cu, et Zn. On observe qu'à partir d'une maille aux 40 m, les probabilités de retrouver la valeur de la moyenne « vraie » deviennent faibles.



**Figure 38 :** Sélection de 200 variogrammes parmi les 400 que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 20 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 200 variogrammes obtenus.



**Figure 39 :** Sélection de 800 variogrammes parmi les 1600 que l'on peut obtenir en prenant des échantillons tous les 40 m en x et en y (points bleus). La ligne noire correspond à l'un des 800 variogrammes obtenus.

## 6.7 Conclusions pour les données de Glencore

Pour les lentilles *Bracemac Main* et *Key Tuffite*, un forage aux 20 m, voir 30 m (ou 40 m pour la plus grosse des lentilles - *McLeod*), semble suffisant pour obtenir de bonnes approximations de la moyenne et pour générer des variogrammes permettant une interpolation de type krigeage (**Tableaux 3, 4 et 5**). Ces mailles de forages semblent suffisantes, bien que la portée identifiée sur les variogrammes ne semble n'être que de 15-20 m. Notez que cette interprétation est basée sur des statistiques effectuées à partir de modèles de blocs non réconciliés, et ne prend pas en compte d'éventuels facteurs de dilutions ou autres données qui ne seraient pas intégrés à ces modèles.

La lentille *Bracemac Upper* (**Tableau 2**) est trop petite pour permettre une bonne estimation de la moyenne et la génération de variogrammes de qualité à partir d'un forage aux 20 m. En fait, la petite taille de cette lentille ne permet pas la prise d'un nombre suffisant d'échantillons. Pour cette lentille, le mieux est soit de forer aux 10 m, soit de créer des domaines au sein desquels une seule valeur de teneur sera proposée (voir les 4 domaines utilisés par Adair 2009).

**Tableau 2** : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de *Bracemac Upper*.

MDL_30 (Bracemac Upper)	Erreur sur l'estimation de la moyenne	
	Forages aux 10 m	Forages aux 20 m
Ag	1-5 %	> 20 %
Au	< 10 %	> 20 %
Cu	< 10 %	>> 20 %
Zn	1-5 %	> 20 %
n forages (environ)	55	14
Interpolation	Krigeage possible	IDW

**Tableau 3** : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de *Bracemac Main*.

MDL_22 (Bracemac Main)	Erreur sur l'estimation de la moyenne	
	Forages aux 20 m	Forages aux 40 m
Ag	< 5 %	> 20 %
Au	< 5 %	20 %
Cu	< 5 %	> 20 %
Zn	< 5 %	> 20 %
n forages (environ)	49	12
Interpolation	Krigeage possible	IDW

**Tableau 4** : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de *Bracemac Key Tuffite*.

MDL_23 (Bracemac Key T.)	Erreur sur l'estimation de la moyenne	
	Forages aux 20 m	Forages aux 40 m
<b>Ag</b>	< 10 %	20 %
<b>Au</b>	< 10 %	20 %
<b>Cu</b>	10 %	20 %
<b>Zn</b>	< 10 %	20 %
<b>n forages (environ)</b>	146	35
<b>Interpolation</b>	Krigeage possible	IDW

**Tableau 5** : Erreurs sur l'estimation de la moyenne qui seront générées avec des forages aux 20 m et 40 m de la lentille de *McLeod*.

MDL_40 (McLeod)	Erreur sur l'estimation de la moyenne	
	Forages aux 20 m	Forages aux 40 m
<b>Ag</b>	<5 %	10 %
<b>Au</b>	5 %	20 %
<b>Cu</b>	<5 %	10 %
<b>Zn</b>	<5 %	10 %
<b>n forages (environ)</b>	250	64
<b>Interpolation</b>	Krigeage possible	Krigeage (sauf Au)

---

## 7 DONNÉES DE LA RONDE

---

### 7.1 Informations sur le SVM de La Ronde

Le modèle de blocs utilisé dans cette section modélise les corps minéralisés de La Ronde I, shaft Penna provenant d'Agnico Eagle. Le modèle de blocs à la forme d'une tablette subverticale orientée E-W et plongeant vers le sud, et d'une épaisseur de 1 à 30 m selon les zones (Gosselin, 2005).

Les réserves probables et prouvées ont été définies avec des forages espacés aux 60 m\*80 m et aux 15 m\*15-30 m environ (**Tableau 6**) (Gosselin, 2005).

**Tableau 6** : Résumé des espacements entre les forages utilisés en 2005 et avant (Gosselin, 2005).

Zone	Espacement vertical	Espacement horizontal	Caractéristiques des zones
<b>Réserves probables</b>			
20 North Gold	100 m	120 m	Au-Cu disséminés
20 North Zinc	80 m	50 m	Zone à Zn
20 South	80 m	60 m	
7, 6 and 22	60 m	50 m	Petites lentilles
<b>Forage de définition</b>			
Toutes	40 m	40 m	Sulfures massifs
<b>Réserves prouvées</b>			
Toutes	15 m	15 à 30 m	Sulfures massifs

### 7.2 Préparation des données

Le modèle de blocs d'Agnico Eagle est un modèle réconcilié de la mine La Ronde. Il contient 4 142 114 blocs qui documentent, entre autres, les teneurs en Au, Ag, Zn, Cu, Pb, et SG (densité). Le modèle de blocs a la forme d'une tablette orientée E-O et qui pend de 70°-75° vers le sud.

La taille des blocs est variable. Les blocs parentaux font 10 m \* 3 m \* 10 m et sont divisés en divers sous-blocs. En x et en z, les blocs peuvent mesurer 10 m, 5 m, et 2,5 m. En y, les blocs peuvent mesurer entre 0,3 et 3 m, par intervalles de 0,3 m.

Le modèle contient quelques valeurs aberrantes, comme des valeurs de Au systématiquement égales à 0,027055 (idem pour les autres substances) et qui sont si fréquentes que cela crée une anomalie sur les histogrammes. Ces valeurs aberrantes ont été retirées et le modèle de blocs sur lequel les tests ont été effectués contient 3 627 498 blocs.

Ensuite, puisque le modèle contient beaucoup de points, il n'a pas été possible de le traiter avec les modules de base de Python. Entre autres, il n'a pas été possible de simuler des forages et de prélever des échantillons le long de lignes, car cela exigeait un temps de calcul trop long pour >3,6 millions de points.

Pour cette raison, il a été décidé de faire tourner le modèle autour de l'axe des x d'un angle de 290° (« roll » ; 290° parce que les élévations sont positives, devrait être 70° en réalité) en changeant la valeur des coordonnées y et z (équations 1 et 2), afin que le corps minéralisé prenne la forme d'une tablette subhorizontale. Par ce biais, les forages ont pu être simulés en 2D (génération automatique d'un « shapfile » avec le module « Arcpy »), et l'option « select\_by\_location » de « Arcpy » a été utilisée pour prélever les échantillons situés à proximité de ces forages, évitant ainsi les itérations à travers la liste de points.

Cette stratégie a permis de prélever des échantillons à intervalles réguliers et d'estimer les erreurs sur l'estimation de la moyenne. Les variogrammes n'ont cependant pas pu être calculés de façon systématique, comme il a été fait dans les sections précédentes, parce que la quantité d'échantillons prélevés était trop importante.

$$Y_{\text{modifié}} = (y - \text{MEDy}) * \cos(290^\circ) + (z - \text{MEDz}) * (-\sin(290^\circ)) + \text{MEDy} \quad (\text{équation 1})$$

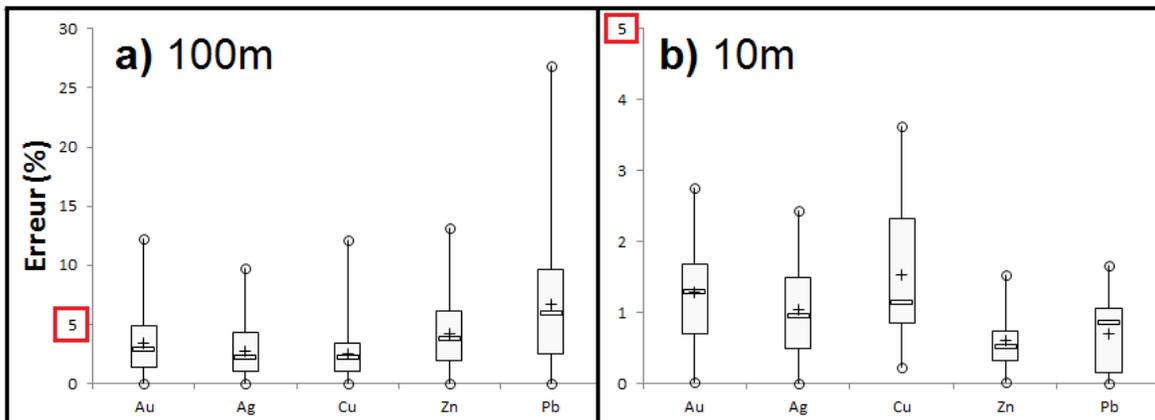
$$Z_{\text{modifié}} = (y - \text{MEDy}) * \sin(290^\circ) + (z - \text{MEDz}) * \cos(290^\circ) + \text{MEDz} \quad (\text{équation 2})$$

Avec : MEDy = 2573,75 m et MEDz = 1960,05 m

### 7.3 Calculs de moyennes

Avec une maille de forages aux 100 m, les erreurs sur l'estimation de la moyenne sont étonnamment faibles, soit <5 % pour la plupart des substances, Pb excepté (Figure 40-a). Avec une maille de forages aux 10 m, les erreurs sur l'estimation de la moyenne sont très faibles, soit 1-2 % (Figure 40-b).

En fait, le modèle de blocs est si grand (étendue de >1,3 km en x et en y) que même avec un forage aux 100 m, il est possible de prélever une quantité d'échantillons suffisante pour correctement approximer la moyenne. Par contre, à petite échelle (pour planifier des opérations de minage par exemple), il est probable qu'un forage aux 100 m ne renseigne pas suffisamment sur les variations locales (c.-à-d. <100 m) des teneurs (voir section suivante). Par contre, pour une estimation globale de la moyenne, ce type de forage semble suffisant.



**Figure 40** : Boîtes à moustaches des erreurs entre les moyennes calculées à partir d'échantillons pris tous les 100 m (a) et 10 m (b) (en x et en y) et la moyenne globale. Chaque boîte contient 400 (a) et 25 (b) données, car les forages ont été décalés de 5 m (a) et 2 m (b) en x et en y d'un test à l'autre.

## 7.4 Moyennes locales

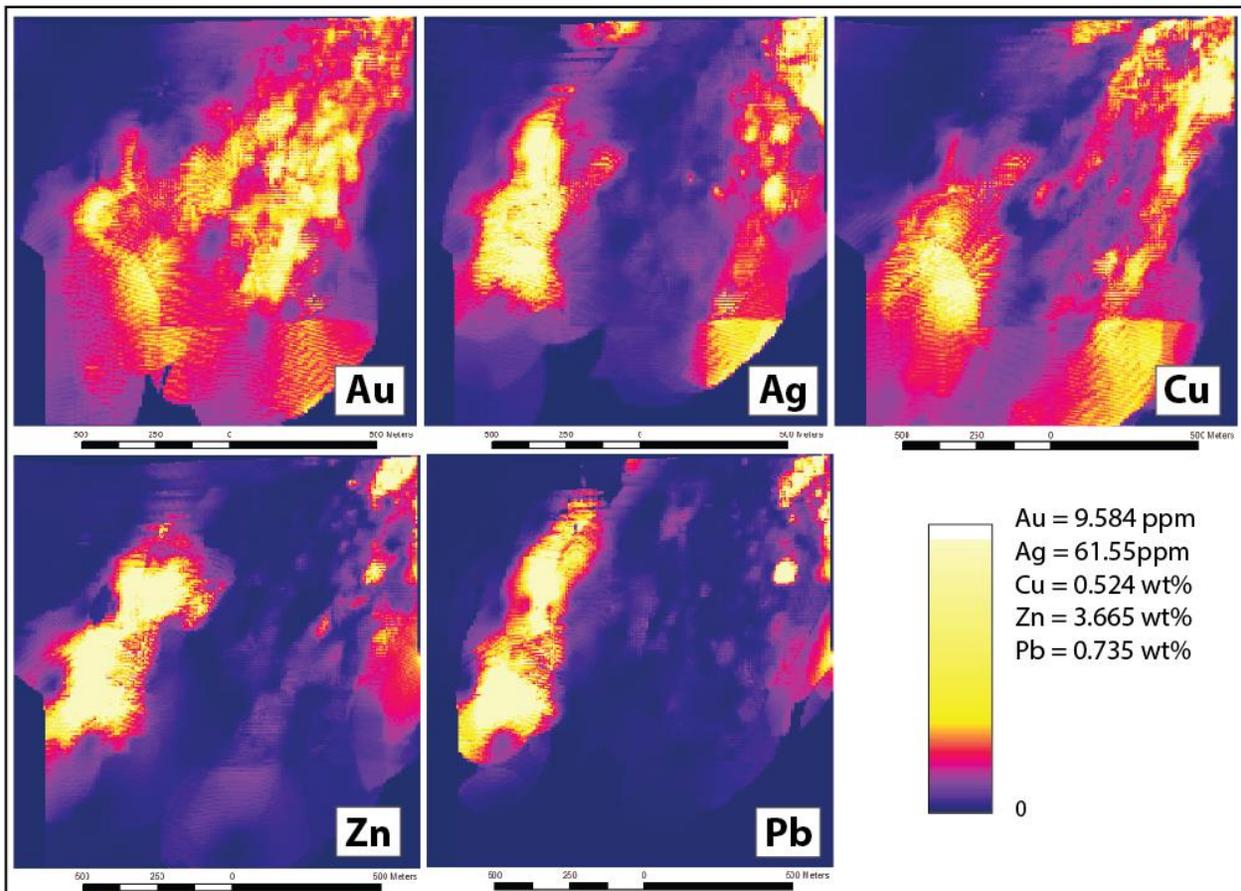
Dans cette section, le modèle de blocs de La Ronde a été traité en plusieurs étapes.

**Étape 1 — Sous-échantillonnage aux 5 m :** Dans un premier temps, le modèle de blocs a été sous-échantillonné aux 5 m, ce qui a permis d'obtenir un modèle de blocs 2D contenant des blocs de 5 m \* 5 m, qui a permis d'observer la distribution générale des teneurs en Au, Ag, Cu, Zn et Pb. La procédure utilisée est la suivante :

1.1) Par intervalles de 5 m, tous les blocs situés à l'intérieur d'un carré de 5 m \* 5 m de côté (en x et y) ont été sélectionnés;

1.2) Ensuite, les moyennes des teneurs en Au, Ag, Cu, Zn, et Pb ont été calculés pour les blocs sélectionnés. Ceci a permis d'obtenir une teneur de Au (etc.) par intervalles de 5 m, et ces valeurs sont présentées à la **Figure 41**.

Remarquez que les teneurs en Ag, Zn, et Pb sont spatialement corrélées, que Au a une distribution différente et que Cu est  $\pm$  corrélé à Au et est  $\pm$  corrélé à Ag, Zn et Pb (**Figure 41**). La distribution de toutes les substances est étirée vers les valeurs hautes (histogramme asymétrique). Les teneurs en Cu, Zn et Pb sont faibles, et devraient peu varier à petite échelle. Les substances d'intérêt, Au et Ag, pourraient fortement varier à petite échelle, selon que l'effet pépite soit plus ou moins développé.



**Figure 41 :** Sous-échantillonnage du modèle de blocs, par intervalles de 5 m \* 5 m.

**Étape 2 — Simulations de mailles de forage :** Ensuite, diverses campagnes de forages avec des mailles aux 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m et 100 m ont été simulées. Prenons l'exemple d'une campagne de forages aux 10 m (10 m \* 10 m) pour expliquer la procédure qui a été utilisée :

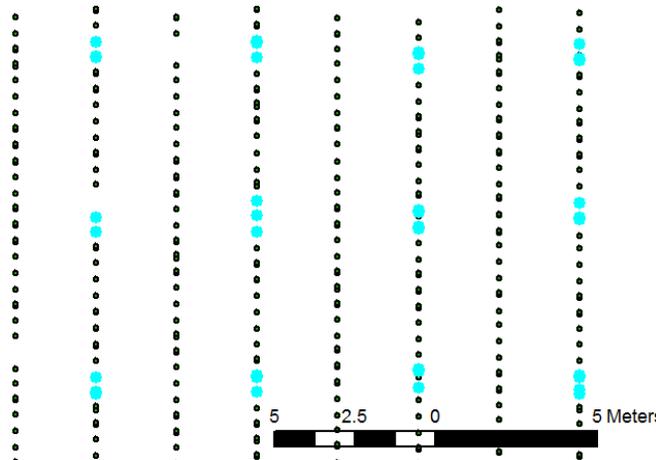
2.1) Tout d'abord, le modèle de blocs a été sous-échantillonné aux **N** m, à l'aide des sous-étapes (1.1) et (1.2) qui sont décrites ci-dessus. Ces valeurs de Au, Ag, Cu, Zn et Pb calculés aux **N** m serviront de valeurs « vraies », de référence, auxquelles les valeurs calculées ci-dessous à partir de diverses mailles de forages seront comparées;

2.2) Pour chaque campagne de forage, les blocs situés à < 0,5 m (en x et y) d'un forage ont été sélectionnés (simulation de la prise d'échantillons) (**Figure 42**). Ceci a permis d'obtenir un à plusieurs échantillons (et teneurs en Au, Ag, Cu, Zn et Pb) par intervalles de 10 m;

2.3) Grâce à ces « échantillons de forage », une interpolation de type IDW a été effectuée sous ArcGIS, en utilisant les paramètres par défaut de ce logiciel. L'interpolation a été sauvegardée sous la forme d'une grille aux **N** m\* **N** m, quelle que soit la maille de forages choisie initialement (afin que les résultats soient comparables). Ceci a permis d'obtenir une valeur interpolée de Au, Ag, Cu, Zn et Pb tous les 20 m. Ces valeurs sont présentées ci-dessous pour une valeur de **N** égale à 5 m et les tests de mailles de forages aux 5 m (**Figure 43**) et aux 10 m (**Figure 44**);

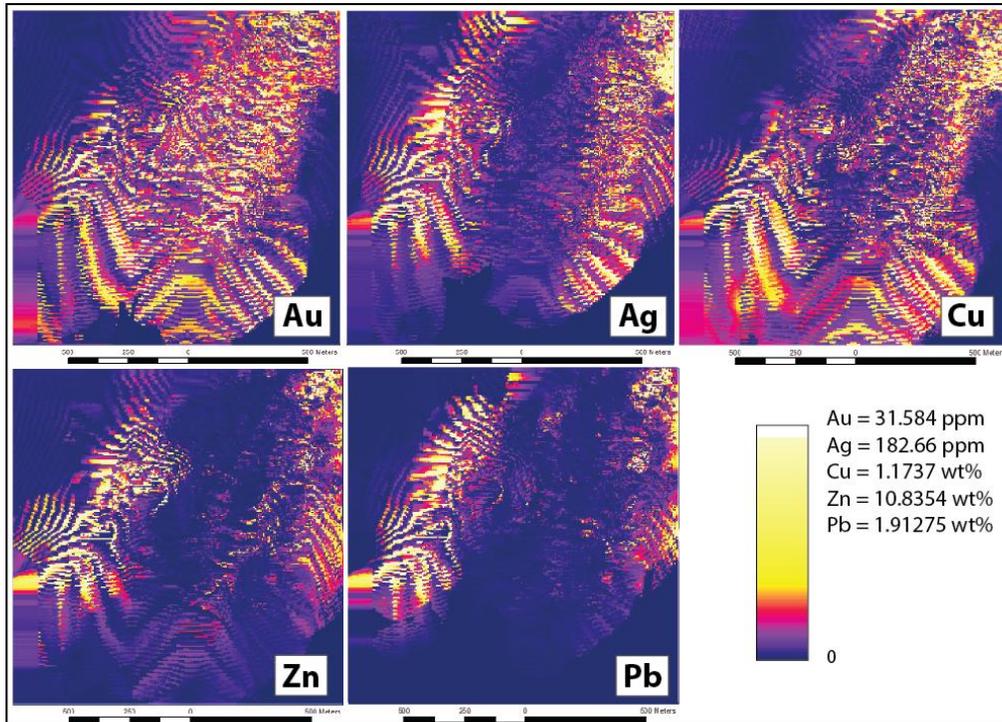
2.4) Ensuite, la grille aux **N** m\* **N** m produite à l'étape (5) a été comparée aux valeurs calculées à l'étape (3), c.-à-d. aux valeurs « vraies » dérivées directement du modèle de blocs par sous-échantillonnage;

2.5) Les sous-étapes (2.3), (2.3) et (2.4) ont été répétées avec des échantillons pris aux 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m et 100 m (mailles carrées à chaque fois), et ont été systématiquement comparées à la carte de la sous-étape (2.1) grâce à un calcul d'erreur effectué pour chaque point de la grille. Ensuite, les sous-étapes (2.2) à (2.5) ont été répétées avec des valeurs de **N** (taille des blocs) de 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m et 100 m.

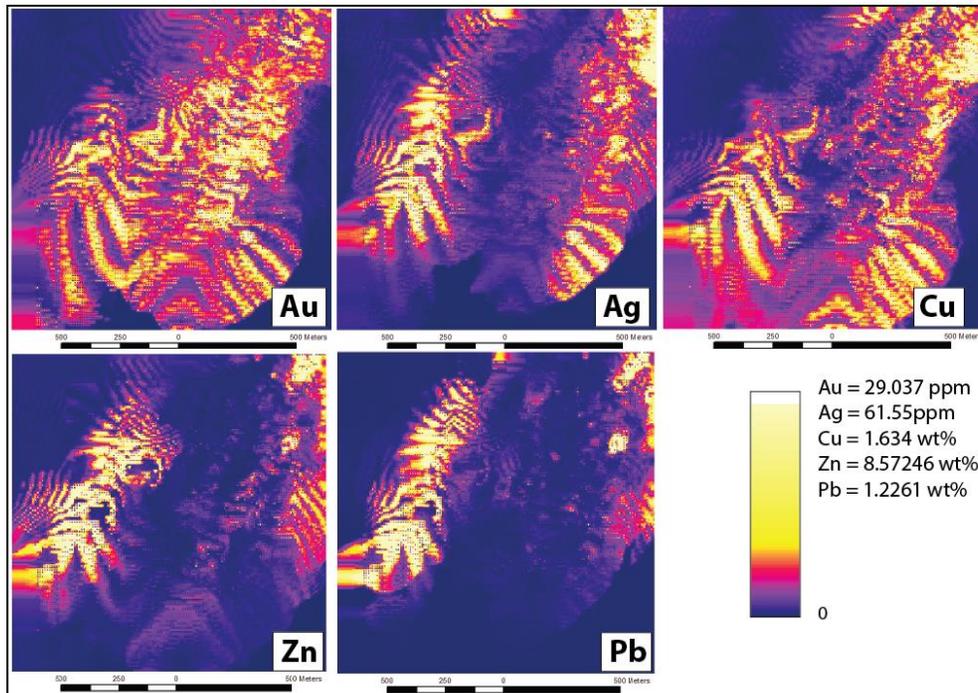


**Figure 42 :** Zoom sur le bloc modèle de La Ronde, qui montre la simulation d'une campagne de forages aux 5 m \* 5 m sous ArcGIS. Les points correspondent aux blocs du modèle vu en 2D (après rotation du modèle de blocs), et les points bleus correspondent aux « échantillons de forages » prélevés par intervalles de 5 m, dans un rayon de 0,5 m autour de chaque forage simulé.

**Résultat 1 :** Les interpolations de types IDW, réalisées à partir d'échantillons pris aux 5 m et 10 m (sous-étape 2.3) sont montrées aux **Figures 43** et **44**. On remarque que les teneurs en Au, Ag, Cu, Zn, et Pb varient sur de très courtes distances, ce qui est bien illustré par les échantillons pris aux 5 m (**Figure 43**). Pourtant, si on considère la **Figure 41**, on remarque que le fait de calculer une moyenne par carrés de 5 m \* 5 m est suffisant pour lisser ces variations : les teneurs varient donc fortement à une échelle < 5 m. En prenant un échantillon, tous les 10 m (**Figure 44**), les variations à petite échelle sont encore visibles, mais avec moins de détails que celles montrées par une prise d'échantillons aux 5 m (**Figure 43**).



**Figure 43 :** Interpolation spatiale (IDW) des échantillons de forages simulés aux 5 m (pour les blocs, **N** = 5 m). L'échelle des couleurs est identique à celle utilisée pour la **Figure 37**, sauf pour le blanc (valeurs aberrantes et valeurs hautes).

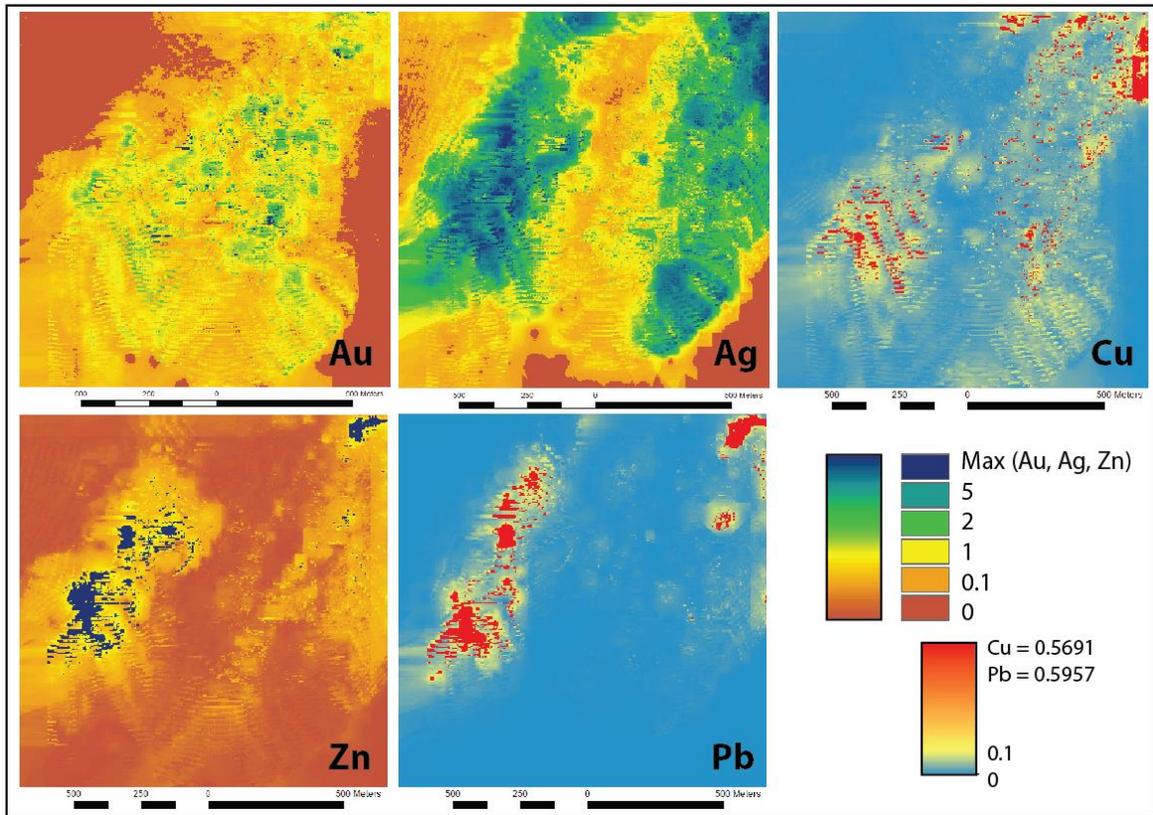


**Figure 44** : Interpolation spatiale (IDW) des échantillons de forages simulés aux 10 m (pour les blocs, **N** = 5 m). L'échelle des couleurs est identique à celle utilisée pour la **Figure 41**, sauf pour le blanc (valeurs aberrantes, valeurs hautes).

**Résultat 2** : Les cartes obtenues à la sous-étape (2.3) sont des grilles aux 5 m, produites à partir d'échantillons pris aux 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, et 100 m (7 grilles) et pour **N** = 5 m dans tous les cas. Ces grilles ont été comparées ; c.-à-d. qu'en chaque point, l'écart type entre les 7 valeurs de Au, par exemple, a été calculé. Ceci a permis de produire la **Figure 45**. Ce calcul donne une idée des zones pour lesquelles les teneurs seront les plus difficiles à interpoler (voir zones où l'écart type est maximal).

Ces cartes (**Figure 46**) ne sont pas équivalentes à celles qui pourraient être produites par simulation conditionnelle, mais elles donnent tout de même une idée des zones où les erreurs sur les prédictions sont les plus probables.

Sans surprises, les zones les plus difficiles à interpoler sont les zones de haute teneur. Là, selon l'endroit où les échantillons sont pris, ils peuvent refléter des valeurs  $\pm$  anormales, et les erreurs sur les prédictions seront plus probables. Les teneurs en Au et surtout en Ag apparaissent beaucoup plus difficiles à estimer que celles en Cu, Pb et Zn (**Figure 46**).



**Figure 45 :** Écarts types entre les valeurs prédites à partir de diverses mailles de forages, pour les teneurs en Au, Ag, Cu, Zn et Pb.

**Résultat 3 :** À la sous-étape (2.4), les teneurs interpolées à partir des diverses mailles de forage sont comparées, par l'intermédiaire d'un calcul d'erreur (voir **section 4.1**), à la carte de référence produite à la sous-étape (2.1). Pour ces premiers résultats, les sous-échantillonnages effectués aux sous-étapes (2.1) et (2.4) ont été effectués aux 20 m (**N**). Ceci revient à identifier la maille de forages pertinente **POUR** la production d'un modèle de blocs aux 20 m. Nous abordons ici la problématique du choix d'une taille de bloc.

Les valeurs interpolées obtenues à la sous-étape (2.4) ont été **moyennées** pour chaque substance et chaque test, et comparées aux valeurs « vraies », calculées à partir du modèle de blocs complet non modifié : ceci correspond au calcul des **erreurs globales**. Ensuite, les valeurs de chacun des blocs produits (blocs de 20 m \* 20 m) ont été comparées à la carte de référence produite à la sous-étape (2.1) (sous-échantillonnage aux 20 m), et la **médiane** de ces erreurs calculées pour chaque bloc a été conservée : ceci correspond au calcul des **erreurs locales**.

Ces opérations ont été répétées (sous-étapes 2.1 à 2.4 et comparaisons décrites ici) pour tester des modèles de blocs (ou valeurs de **N**) aux 5 m, 10 m, 30 m, 40 m, 50 m et 100 m. Les erreurs globales et locales sont présentées par les **figures 46 à 52**. Aussi, les cartes d'erreurs de 4 de ces tests sont présentées ci-dessous (**figures 53 à 56**). Ces résultats sont aussi résumés au **tableau 7**.

D'après ces tests, les remarques suivantes peuvent être formulées. Les teneurs en Pb sont les plus difficiles à interpoler, probablement parce que les teneurs de cet élément sont faibles, valant en moyenne 0,018 %pds (de petites erreurs de prédictions apparaissent donc plus importantes qu'elles ne sont en réalité). Les teneurs de Zn, dont la moyenne est 0,23 %pds, sont possiblement difficiles à prédire pour les mêmes raisons. Ensuite, vient Ag, qui est tout de même relativement bien prédit et dont la teneur moyenne est 6,21 ppm. Les éléments Au et Cu, dont les teneurs moyennes sont 1,42 ppm et 0,078 %pds, respectivement, sont curieusement plus faciles à prédire que les teneurs en Ag. Il semble donc que, de par leurs distributions spatiales particulières, Ag, Pb et Zn soient plus difficiles à modéliser que Au et Cu.

Aussi, quel que soit le type de modèle de blocs que l'on souhaite produire, les mailles de forages aux 50 m et 100 m ne sont pas adaptés, puisque de telles mailles produisent des erreurs locales et globales > 40 % (voir de 60 % à 80 %, selon les substances) (**figures 51 et 53**). Aussi, en carte, les zones mal prédites sont concentrées dans des endroits précis et sont de grandes tailles (**figures 53 à 56**).

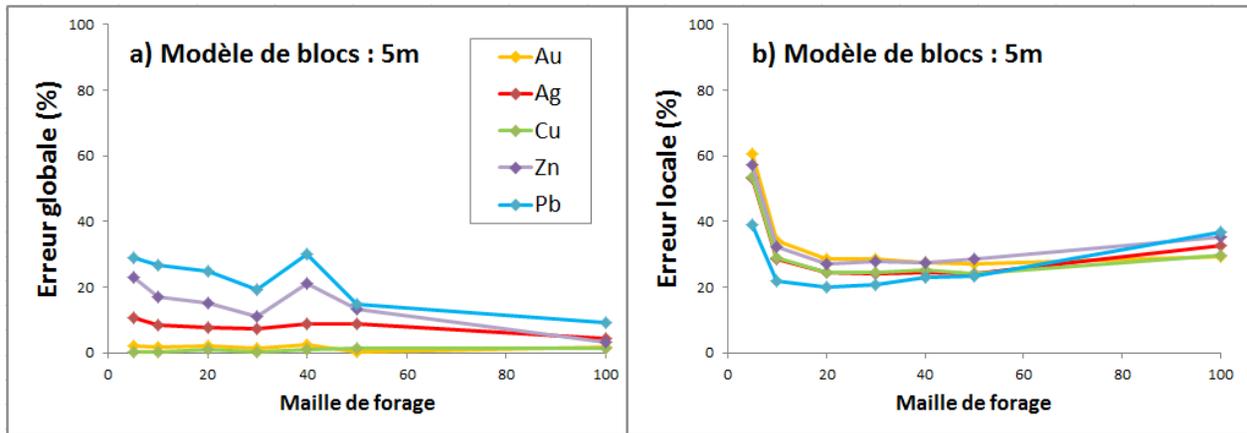
Pour produire des modèles de blocs contenant des blocs de 30 m \* 30 m à 100 m \* 100 m, une maille de forages aux 40 m semble suffisante, si l'on considère que des erreurs globales et locales de 20 % à 30 % sont acceptables (**figures 49 à 53 ; tableau 7**) et que les cartes produites sont utilisables (**figures 53 à 56**). Pour produire des modèles de blocs contenant des blocs de 10 m \* 10 m à 20 m \* 20 m, une maille de forages aux 30 m, peut-être 40 m, est suffisante (**tableau 7**). Pour produire des modèles de blocs contenant des blocs de 5 m \* 5 m, une maille de forages aux 20 m, peut-être 30 m, semble nécessaire (**tableau 7**). Avec ces paramètres, les erreurs globales et locales seront d'environ 20 % à 30 % dans tous les cas. L'effet de telles erreurs sur la ressource calculée est présenté au **tableau 8**.

**Tableau 7** : Résultat 3 (pour plus de détails, voir **figures 46 à 56**).

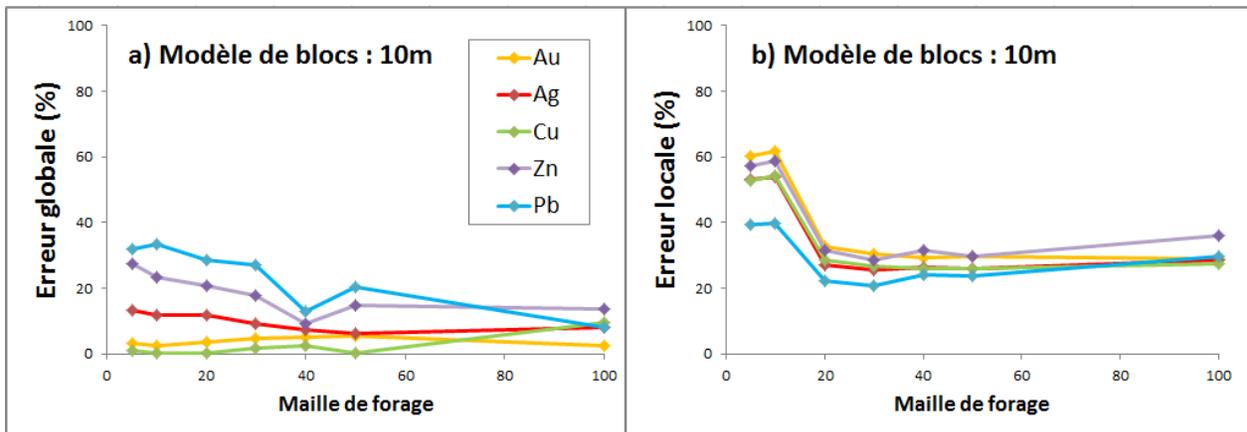
Taille des blocs du modèle que l'on souhaite produire	Forages (intervalle maximum acceptable)	Erreur globale	Erreur locale
5 m	20-30 m	<20 %	20-30 %
10 m	30-40 m	<30 %	20-30 %
20 m	30-40 m	<30 %	25-30 %
30 m	40 m	<20 %	25-30 %
40 m	40 m	<20 %	20-30 %
50 m	40 m	<20 %	25-30 %
100 m	40 m	<20 %	25-35 %

**Tableau 8** : Effets d'erreurs de 20 % et 30 % sur le calcul des ressources en Au, Ag, Cu, Zn et Pb.

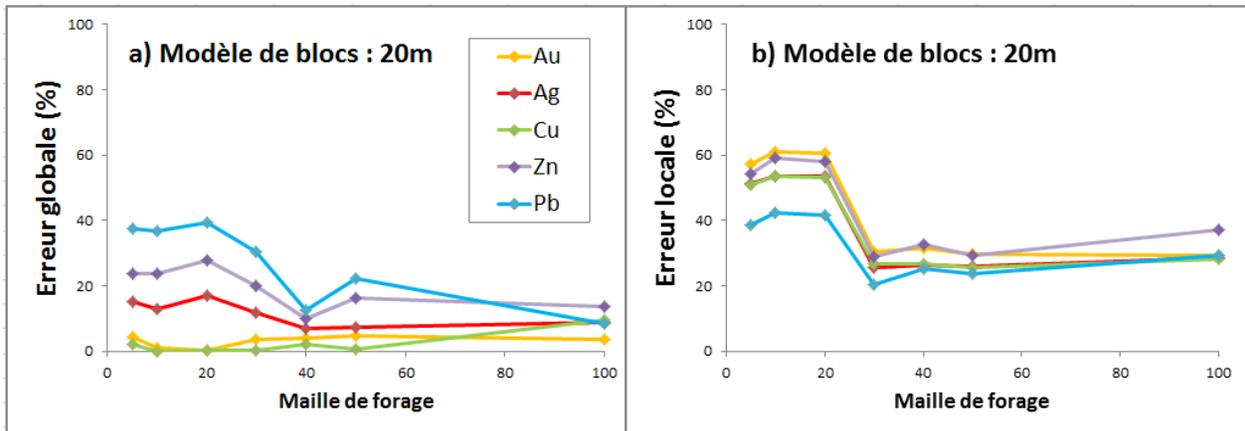
Substances	Moyenne globale (calculée à partir du modèle de blocs non modifié)	Effet d'une erreur de 20 %	Effet d'une erreur de 30 %
Au (ppm)	14 239	1,14 à 1,71	1,00 à 1,85
Ag (ppm)	62 139	4,97 à 7,46	4,35 à 8,10
Cu (%pds)	0,07806	0.062 à 0,094	0.055 à 0,101
Zn (%pds)	0,23459	0,19 à 0,28	0.16 à 0,30
Pb (%pds)	0,01827	0,015 à 0,022	0,013 à 0,024



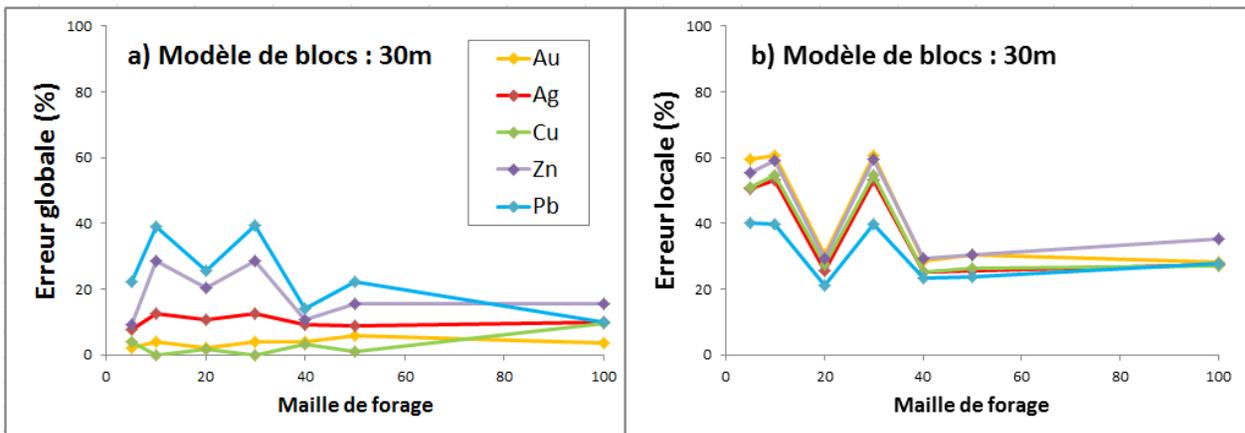
**Figure 46 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **5 m (N)**. Les cartes d'erreurs obtenues pour les tests Au (**figure 53**) et Ag (**figure 54**) sont présentées ci-dessous.



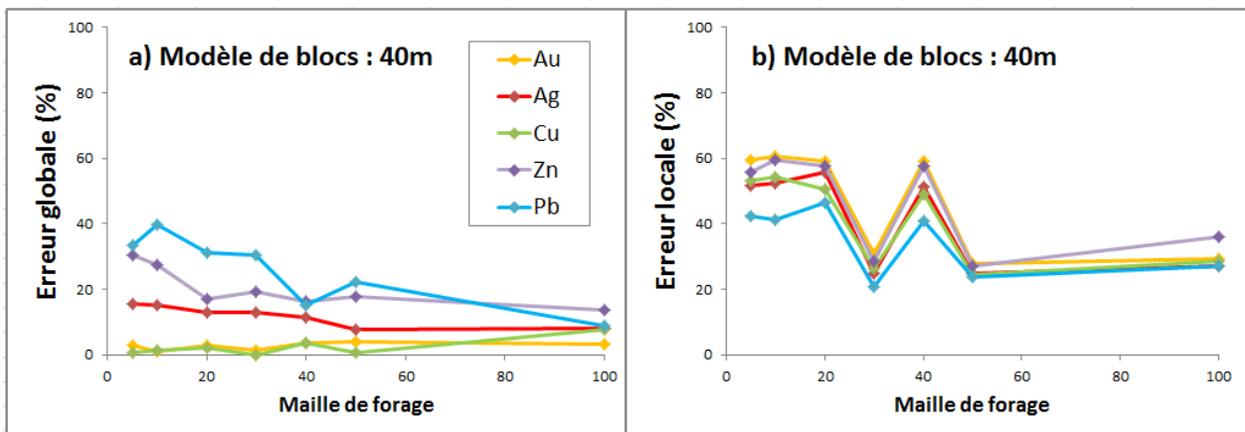
**Figure 47 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **10 m (N)**.



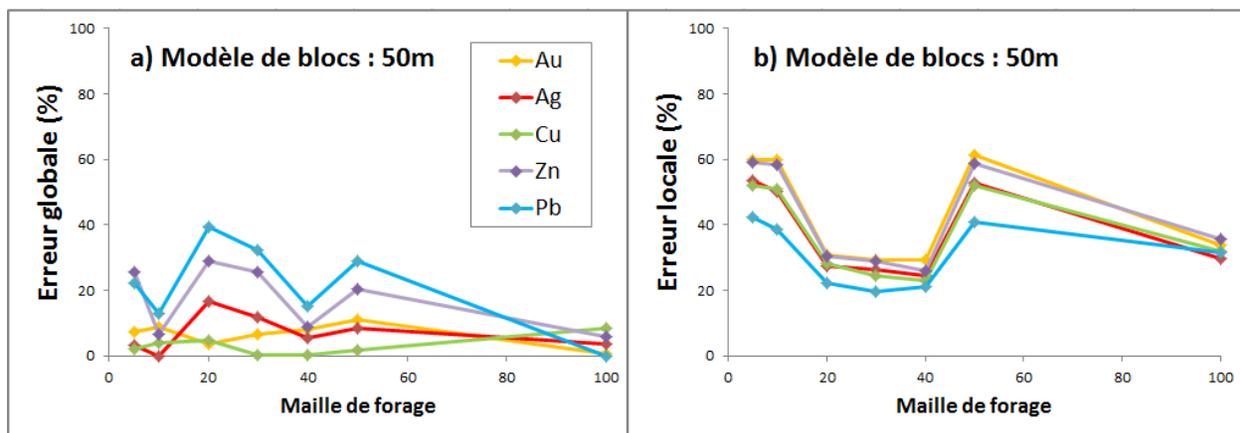
**Figure 48 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **20 m (N)**. Les cartes d'erreurs obtenues pour les tests Au (figure 55) et Ag (figure 56) sont présentées ci-dessous.



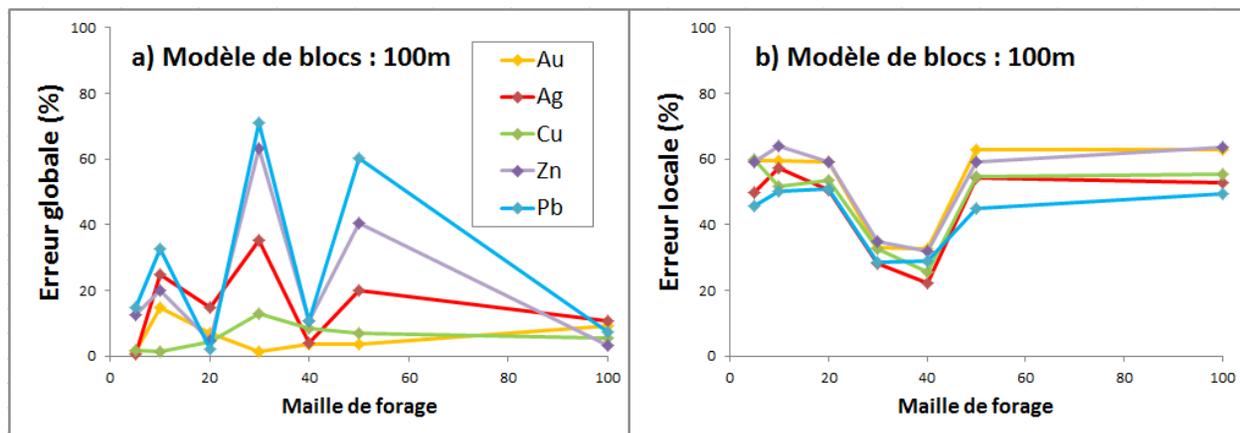
**Figure 49 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **30 m (N)**.



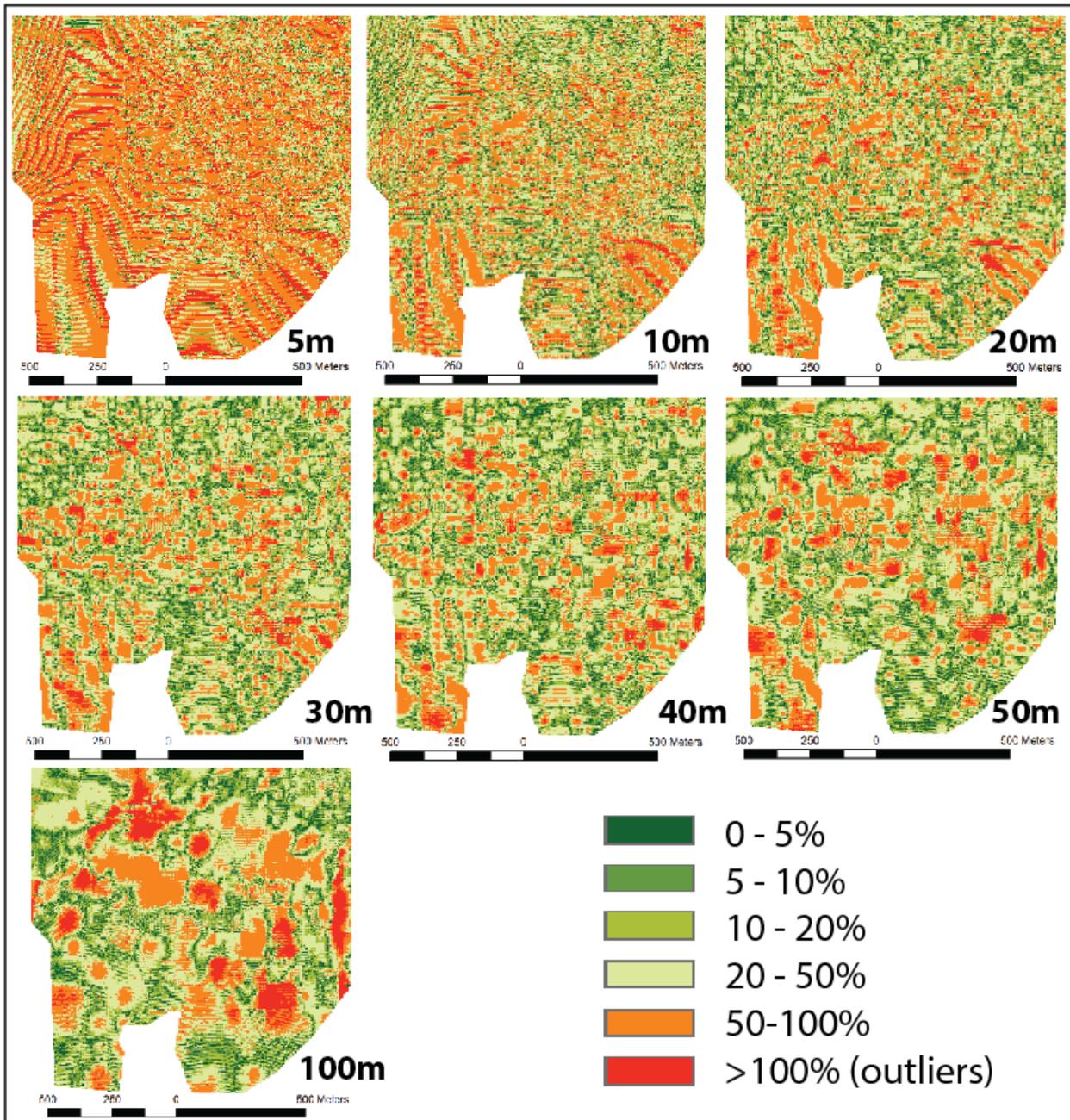
**Figure 50 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **40 m (N)**.



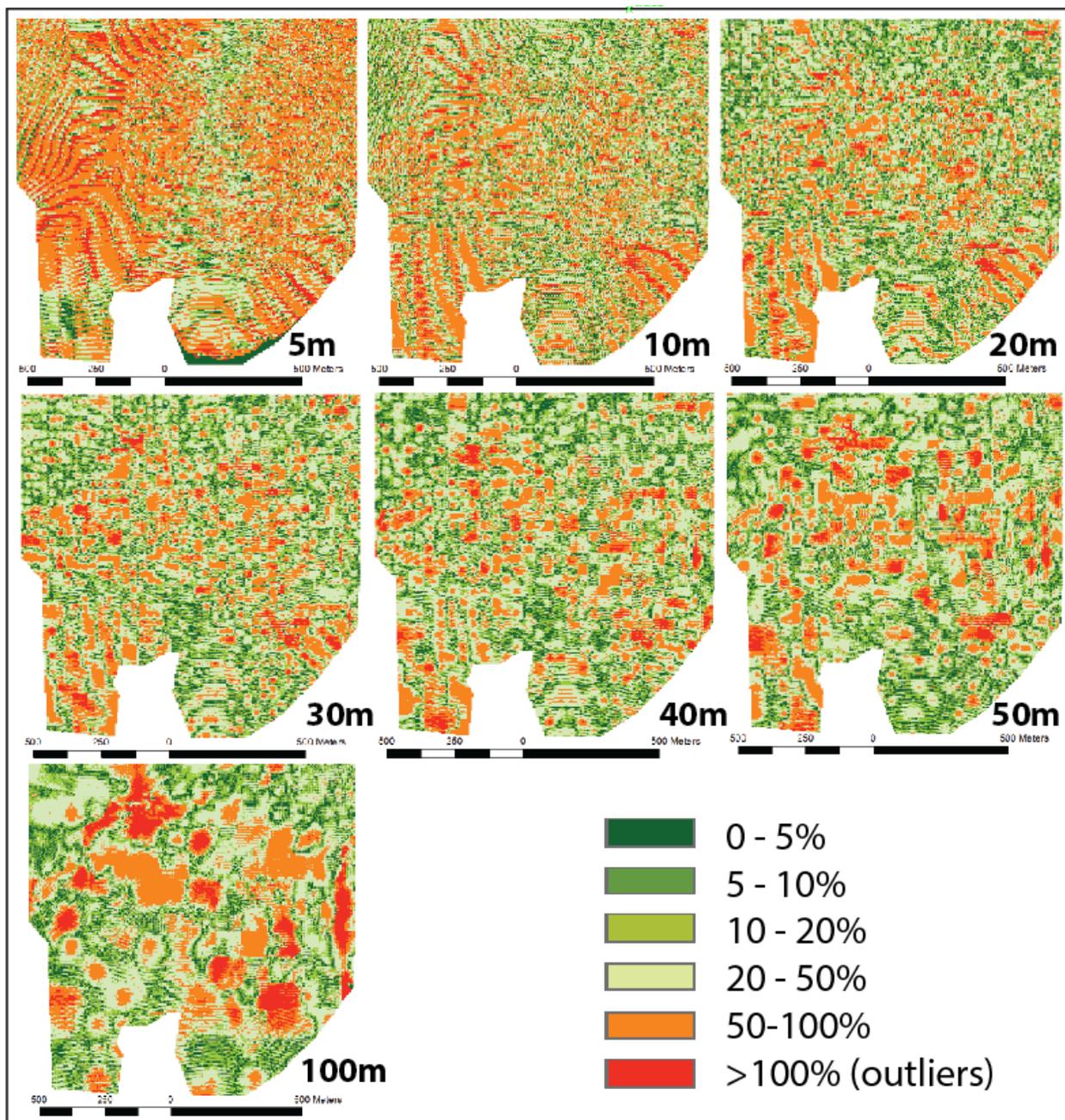
**Figure 51 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **50 m (N)**.



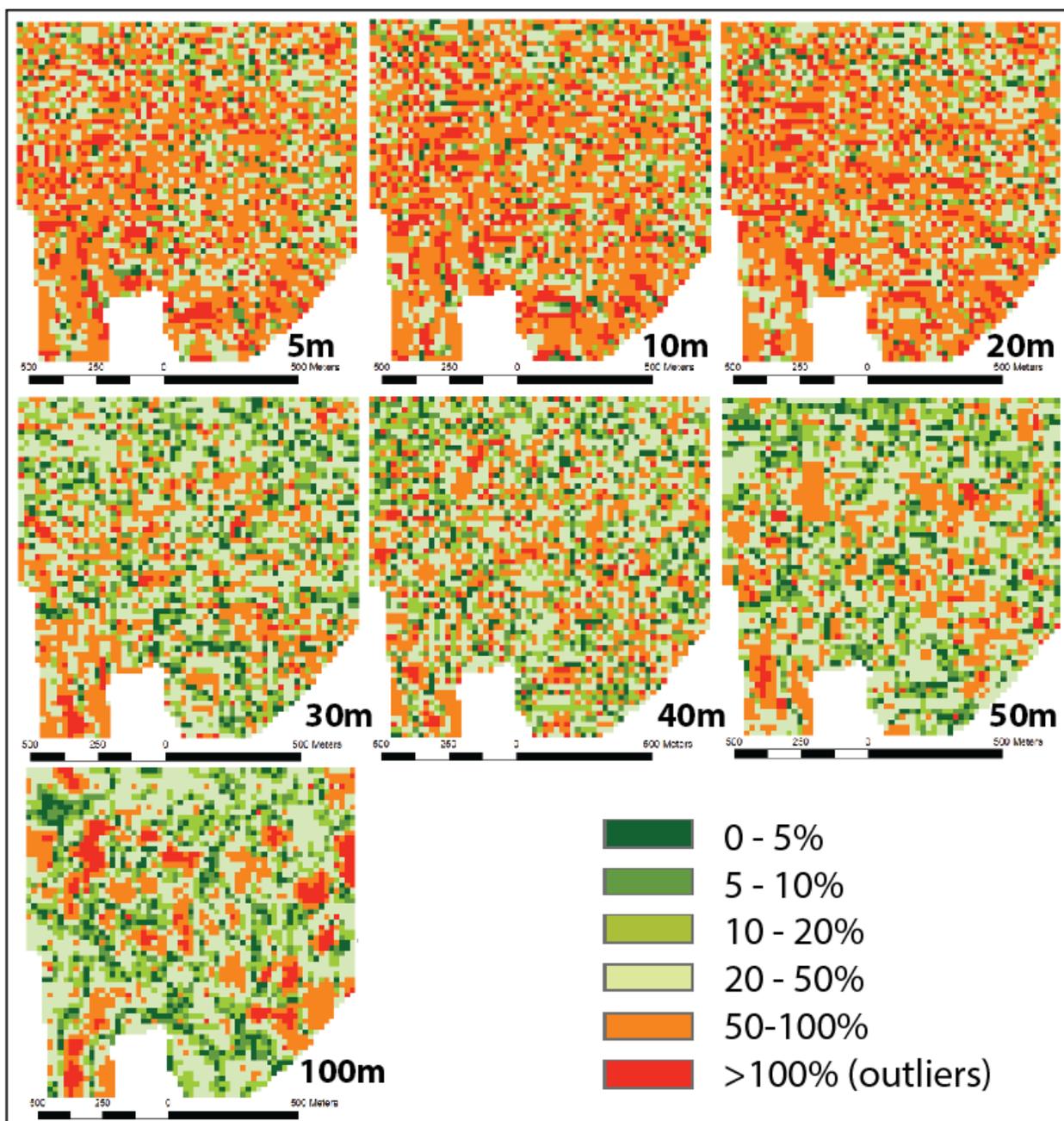
**Figure 52 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **100 m (N)**.



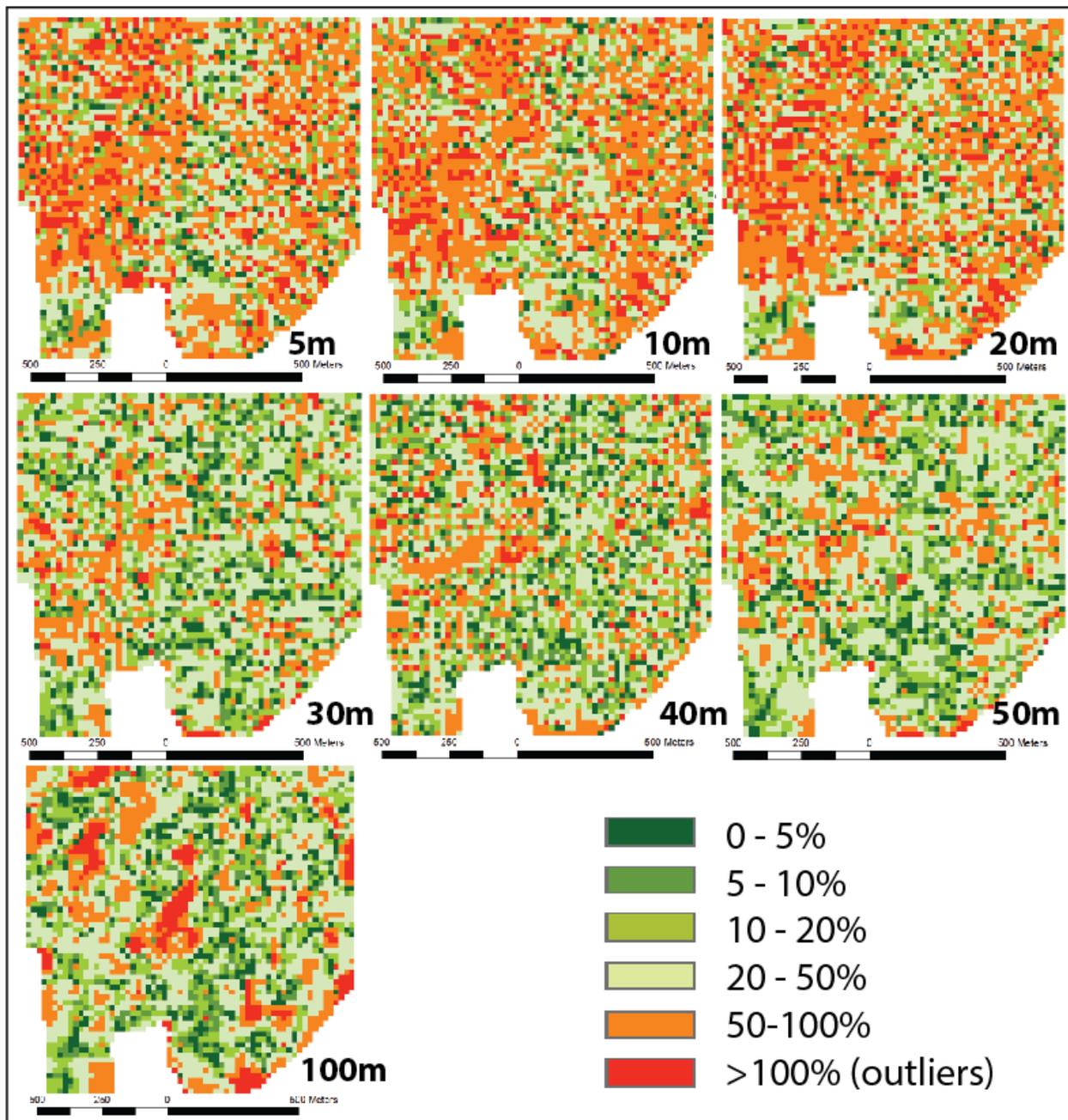
**Figure 53** : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux **5 m** (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux **5 m** (**N**, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour **Au**.



**Figure 54** : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux 5 m (sous-étape 2,4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux 5 m (N, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour Ag.



**Figure 55** : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux **20 m** (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux **20 m** (**N**, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour **Au**.



**Figure 56** : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (IDW) aux **20 m** (sous-étape 2.4) et le modèle de blocs sous-échantillonné aux **20 m** (**N**, sous-étape 2.1). Cartes des erreurs pour **Ag**.

**Résultat 4** : La procédure suivie pour obtenir ces résultats est identique à celle suivie pour obtenir les résultats 3. Les seules différences entre les deux résultats sont les suivantes :

- Le test reporté ici a été effectué sur une petite partie du modèle de bloc ; c.-à-d. dans un carré mesurant 250 m\*250 m;
- À la sous-étape (2,3), l'interpolation utilisée n'est pas de type IDW, mais plutôt krigeage ordinaire.

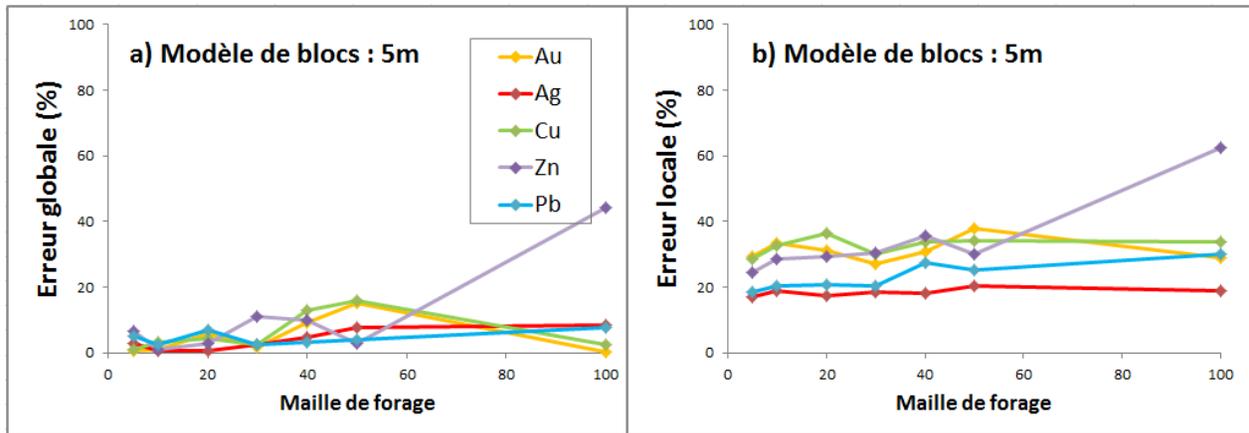
Comme pour le test précédent, les opérations ont été répétées (sous-étapes 2.1 à 2.4 et calculs d'erreurs décrits plus haut) pour tester des modèles de blocs (ou valeurs de **N**) aux 5 m, 10 m, 30 m, 40 m, 50 m et 100 m. Les erreurs globales et locales sont présentées aux **figures 57 à 63**. Aussi, les cartes d'erreurs de l'un de ces tests sont présentées ci-dessous (**figure 64**). Ces résultats sont aussi résumés au **tableau 9**.

Ces tests sont plus satisfaisants que ceux présentés par le résultat 3, car, contrairement à l'interpolation de type IDW, le krigeage s'accommode mieux des échantillons qui forment des grappes. Le test du résultat 4 n'a cependant pu être fait que sur une petite portion du modèle de blocs, car on ne peut pas calculer de variogramme à partir d'une trop grande quantité d'échantillons. A l'avenir, il serait bon de contourner l'outil d'ArcGIS, en le forçant à utiliser un variogramme modélisé par d'autres logiciels : ceci permettrait d'étendre ce test à tout le modèle de blocs, mais n'a pas pu être réalisé dans le cadre de ce projet.

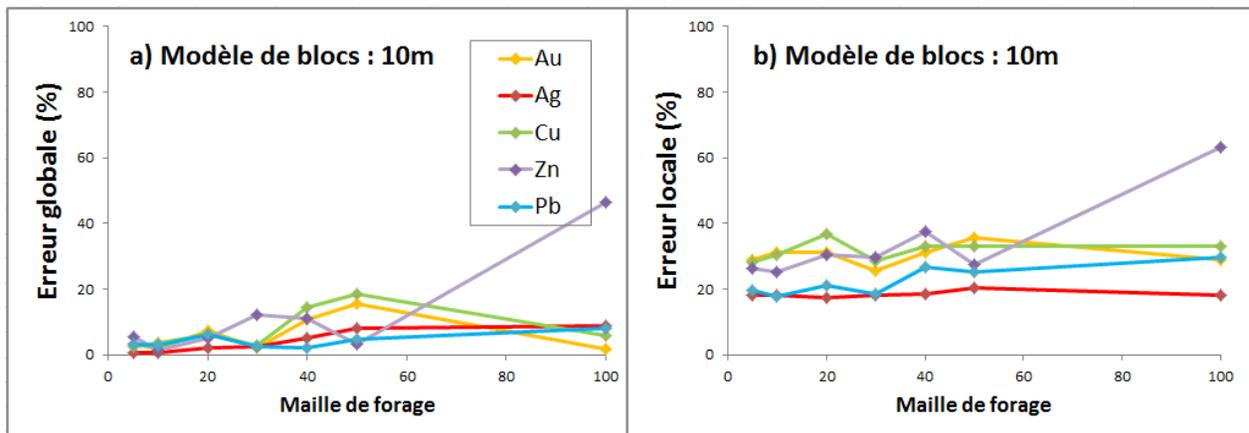
On remarque qu'avec un forage aux 20-30 m, les erreurs globales sont < 10 % et les erreurs locales sont de l'ordre de 20 % à 30 % (**Tableau 9**). Ce type d'espacement est possiblement un espacement optimal pour le SMV de La Ronde. Cependant, avec une maille de forages aux 40 m, on observe que les erreurs locales et globales sont encore très acceptables, surtout si l'on utilise de tels forages pour modéliser des blocs de 30 m \* 30 m ou moins. Lorsque l'espacement entre les forages est supérieur à 40 m, voir 50 m, les erreurs sur l'estimation des divers types de moyennes deviennent trop importantes (**Tableau 9**).

**Tableau 9** : Résultat 3 (pour plus de détails, voir **figures 57 à 63**).

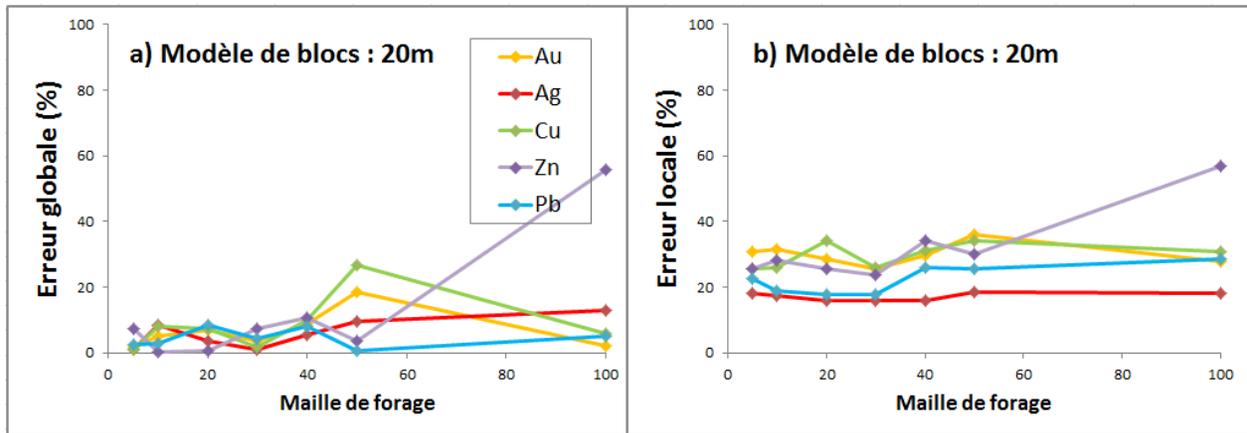
Taille des blocs du modèle que l'on souhaite produire	Forages (intervalle maximum acceptable)	Erreur globale	Erreur locale
5 m	20-30 m	<10 %	20-30 %
10 m	20-30 m	<10 %	20-30 %
20 m	30-40 m	<15 %	20-30 %
30 m	40 m	<15 %	20-30 %
40 m	40 m	<20 %	25-40 %
50 m	40 m	<20 %	20-40 %
100 m	40 m	<40 %	25-50 %



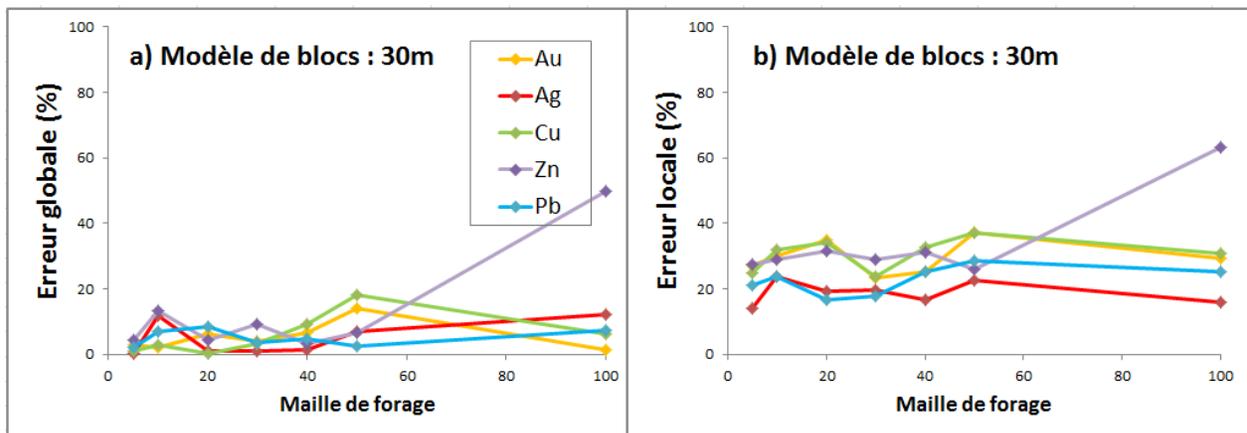
**Figure 57 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **5 m (N)**.



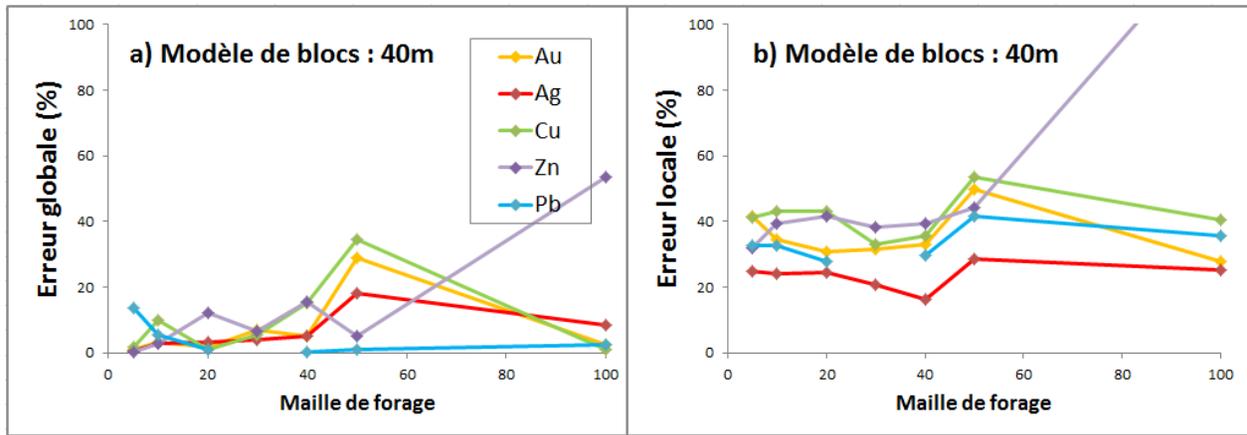
**Figure 58 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **10 m (N)**.



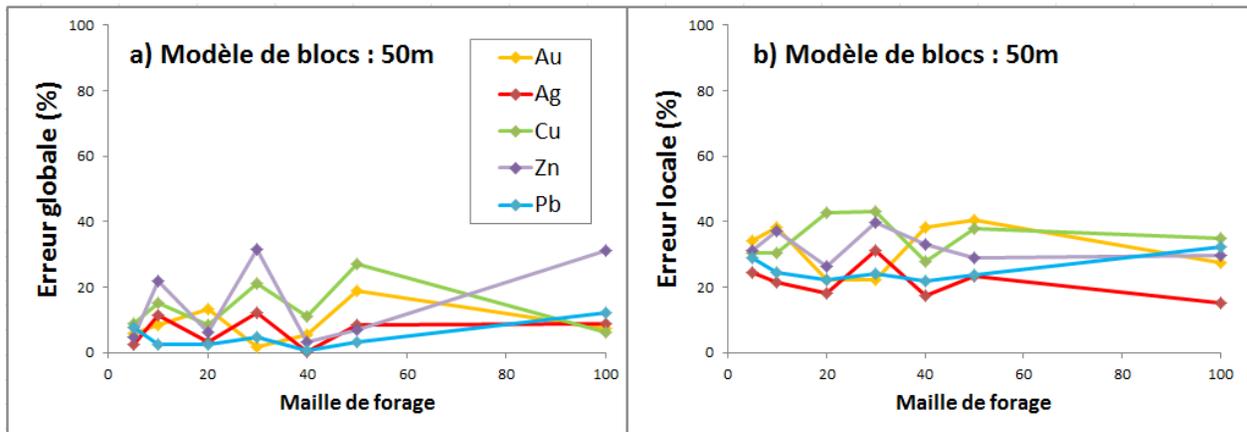
**Figure 59** : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **20 m (N)**.



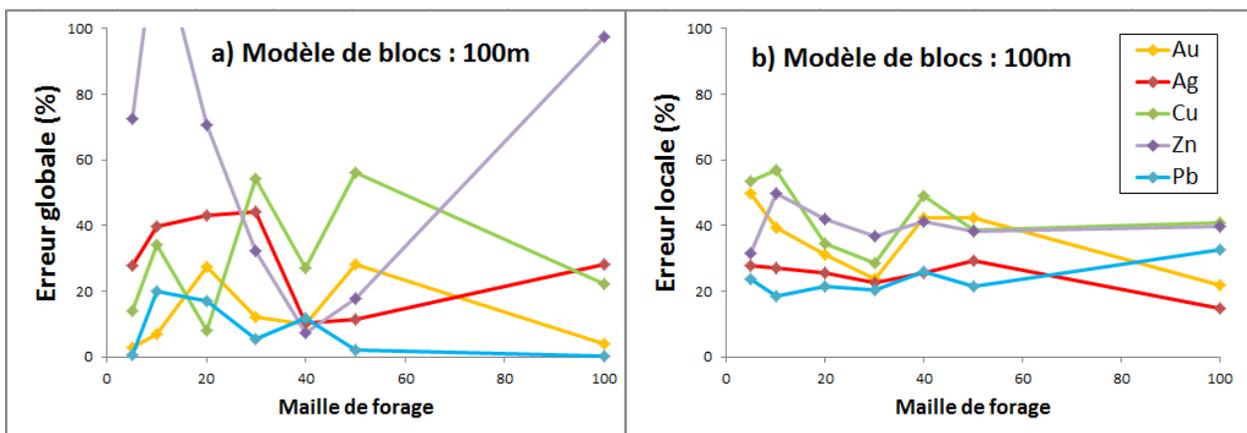
**Figure 60** : Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **30 m (N)**.



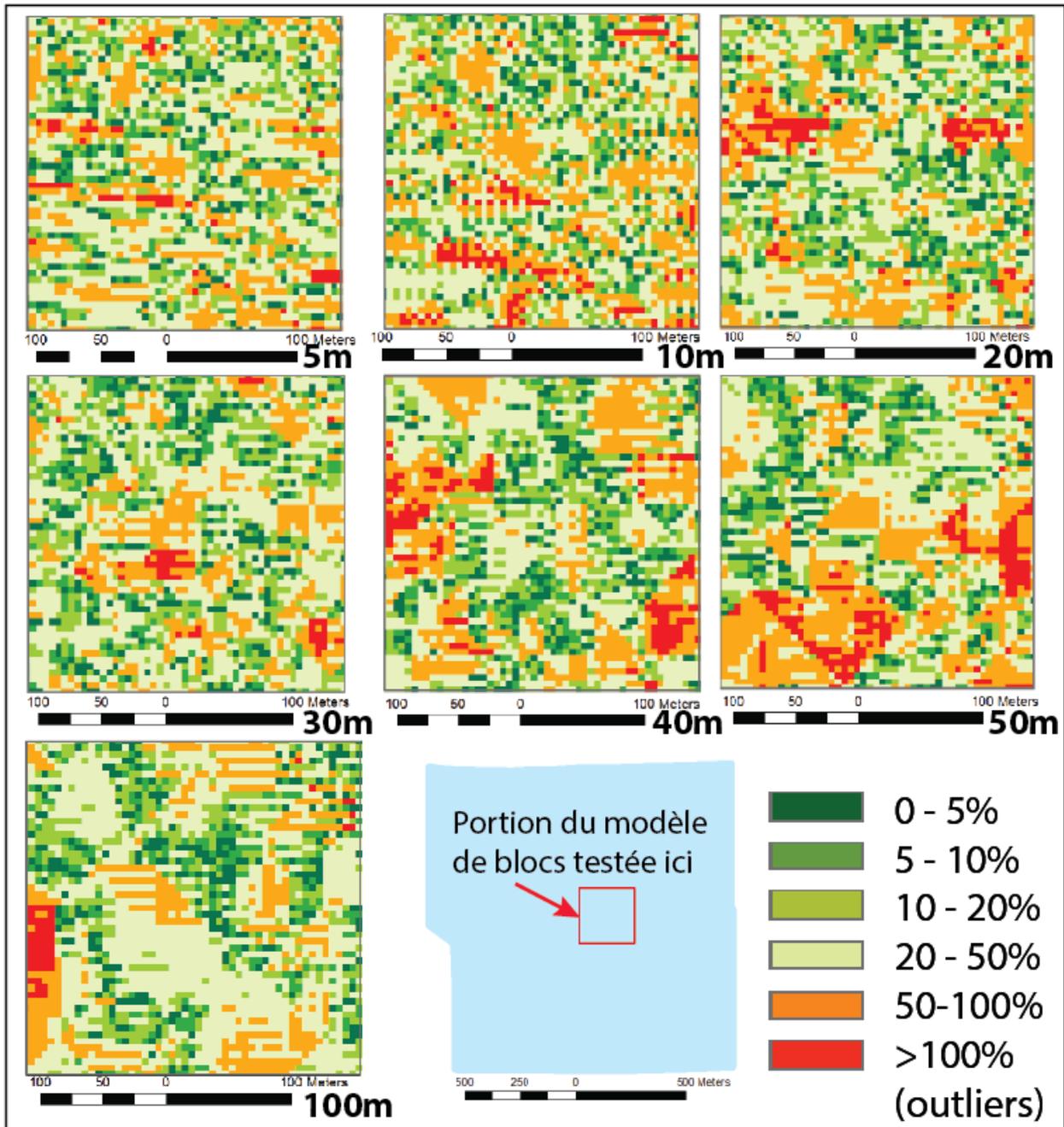
**Figure 61 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **40 m (N)**.



**Figure 62 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **50 m (N)**.



**Figure 63 :** Moyennes et médianes des erreurs calculées en comparant les interpolations obtenues à partir d'échantillons provenant de campagnes de forages simulées selon diverses mailles avec le modèle de blocs sous-échantillonné aux **100 m (N)**.



**Figure 64** : Comparaison (calcul d'erreurs) entre les interpolations effectuées à partir d'échantillons pris le long de diverses mailles de forages et interpolées (krigeage ordinaire) aux 5 m (sous-étape 2.4) et le modèle de bloc sous-échantillonné aux 5 m (N, étape 3). Cartes des erreurs pour Au.

## 7.5 Simulations conditionnelles

Les simulations conditionnelles de cette section ont été effectuées avec l'outil « *Gaussian Geostatistical Simulations* » de ArcGIS. Cet outil fonctionne de la façon suivante (description obtenue à partir du site internet d'ArcGIS) :

- Les données en entrée sont : 1) des échantillons (points.shp) ; et 2) une interpolation de type krigeage simple (avec transformation « Normal Score ») effectuée à partir de ces échantillons (cette interpolation donne à l'outil des informations sur l'autocorrélation).
- Une grille contenant des valeurs aléatoires et normalement distribuées (moyenne = 0, variance = 1) est d'abord créée. Ensuite, les données du krigeage fournies en entrée au modèle sont utilisées pour appliquer le modèle de covariance à la grille (la grille prend donc la structure spatiale des données fournies au modèle). La donnée spatiale matricielle ainsi produite est une simulation non conditionnée (Dietrich et Newsman, 1993).
- Les données spatiales matricielles ont ensuite été conditionnées avec les échantillons (points.shp) fournis au modèle. L'estimation obtenue par krigeage en chaque point de la grille est utilisée pour s'assurer que les données simulées honorent les échantillons (Journel 1974).
- Notez que cette procédure est différente de celle utilisée par les simulations de type SGS utilisées ci-dessus (section 6.4).

Cet outil a été utilisé de la façon suivante dans le cadre de ce projet :

- Données sources : modèle de blocs de La Ronde, auquel une rotation a été imprimée (voir section 7.1) et qui a été sous-échantillonné aux 5 m (voir section 7.3). Ces données sont représentées à la **figure 41**.
- Simulation de campagnes de forages aux 20 m\*20m, 30 m\*30m et 40 m\*40m. Pour chaque campagne de forages, des échantillons ont été prélevés à partir des données sources à intervalles réguliers. Ces échantillons constituent l'une des données fournies en entrée à l'outil d'ArcGIS.
- À partir des échantillons « de forage », une interpolation de type krigeage simple a été effectuée. Ces simulations sont le second type de données fournies en entrée à l'outil d'ArcGIS. Le résultat de ces interpolations est montré aux **figures 65 à 69**.
- Cent simulations ont été effectuées pour chaque test. Les résultats sont montrés aux **figures 57 à 61**, par des cartes d'écart types (c.-à-d. écart types calculés en chaque point de la grille, à partir des 100 données simulées par les 100 simulations successives).
- **Interprétation des résultats** : sur les cartes d'écart types, plus l'écart type est élevé, plus la zone en question est difficile à prédire correctement à partir des données disponibles. Notez que, contrairement à la simulation de type SGS, la taille des blocs n'est pas prise en considération ici ; la simulation étant effectuée à partir d'une interpolation de type krigeage directement produite sous ArcGIS, et non à partir d'une donnée spatiale matricielle dont la taille des blocs serait prédéfinie (pas d'effet de support ici).

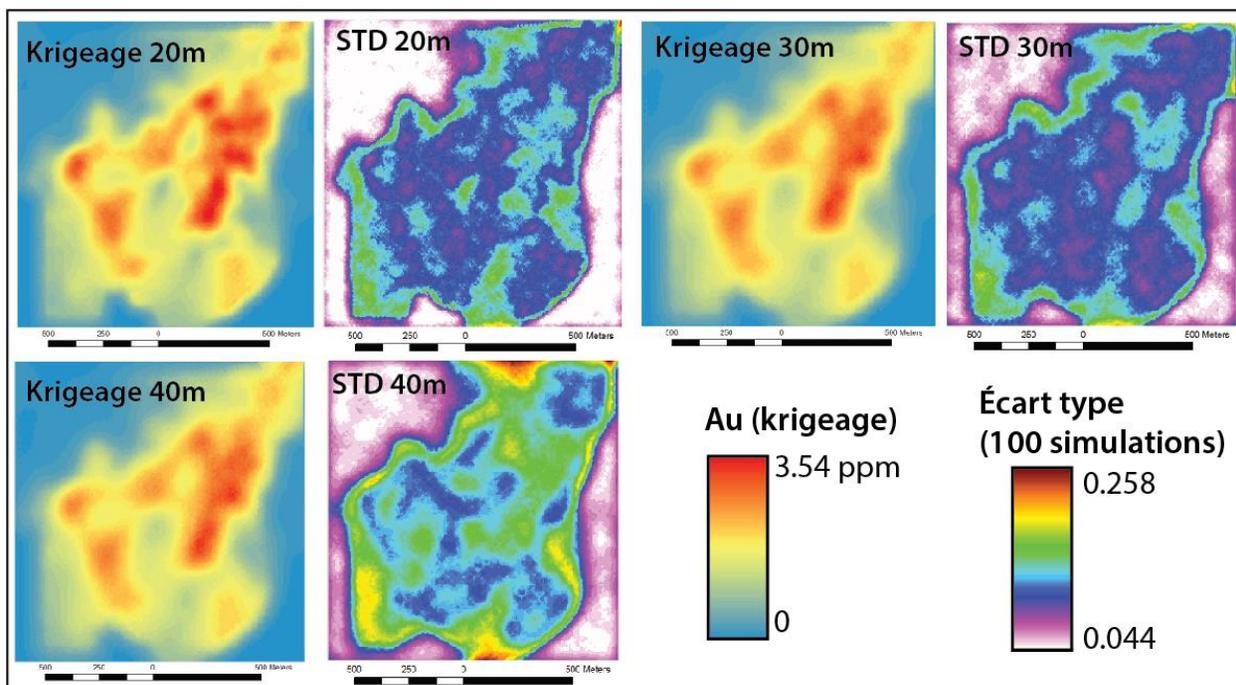
**Résultats** : Pour toutes les substances testées, l'interpolation est moins précise lorsque l'espacement entre les forages augmente, ce qui est un résultat attendu : plus les forages sont rapprochés, plus la prédiction est proche de la réalité. Les interpolations sont aussi systématiquement moins précises dans les zones de plus hautes teneurs (voir écart-type élevés, **figures 65 à 69**), ce qui est une illustration de l'effet proportionnel (tendance que les zones de hautes teneurs ont d'avoir une variabilité plus grande, donc d'être plus difficile à interpoler avec un nombre limité d'échantillons; voir section 2).

Les valeurs moyennes des écart types obtenues pour chaque simulation sont reportées au **tableau 10** (remarquez que des forages aux 10 m, 50 m et 100 m ont aussi été testés, en plus de ceux aux 20 m, 30 m et 40 m). Ces écart types moyens sont aussi traduits en pourcentages d'erreurs (**tableau 10**). On observe qu'un forage aux 30 m permet d'obtenir de bonnes estimations des teneurs globales, avec une erreur de 15 %-20 % pour Au, Ag et Cu, et plus élevée pour Zn et Pb. Selon l'erreur qui est jugée acceptable pour les diverses substances, on pourra préférer une maille de forages aux 20 m, 30 m ou 40 m.

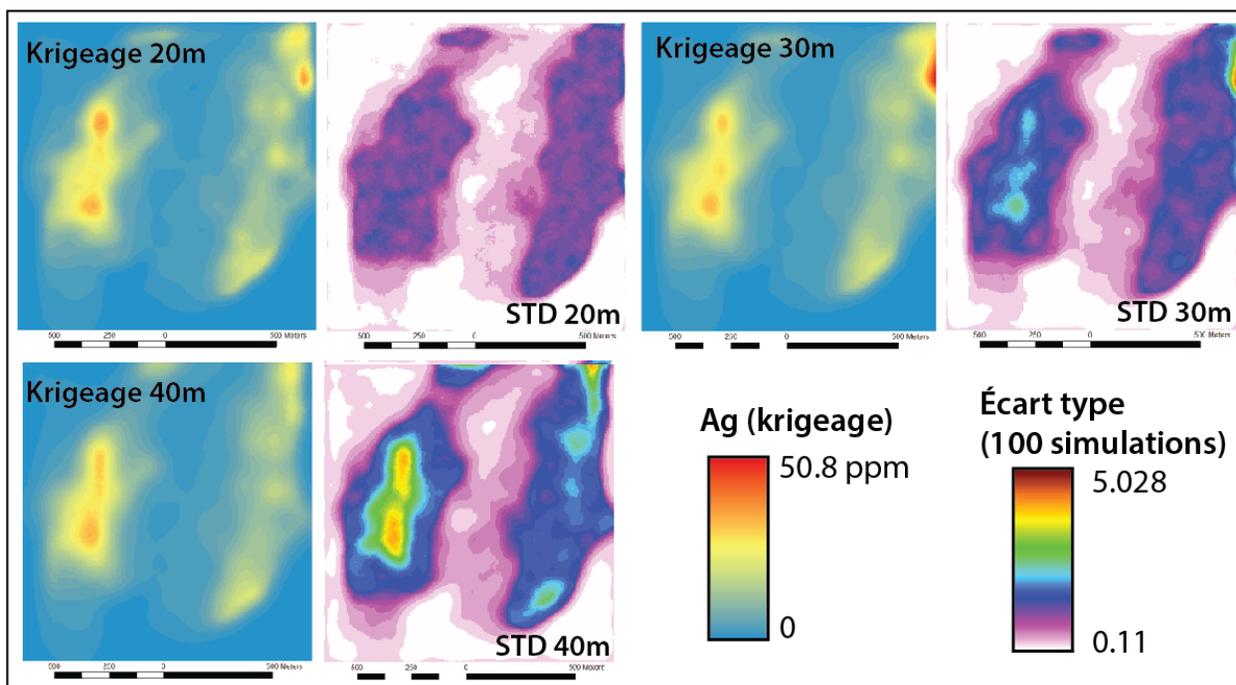
En fait, et d'après les résultats de ces simulations, si l'on souhaite estimer les teneurs moyennes avec une erreur moyenne maximale de 20 % environ, il faudra utiliser un espacement maximal entre les forages de: 50 m (Au), 30 m (Ag), 30-40 m (Cu), 20 m (Zn), et 10 m (Pb) (**tableau 10**). Il est surprenant de constater que Au est relativement facile à estimer dans ce cas, alors que Ag est plus difficile à interpoler.

**Tableau 10** : Écart types moyens obtenus à partir des simulations conditionnelles, traduits en pourcentages d'erreurs pour les diverses substances testées.

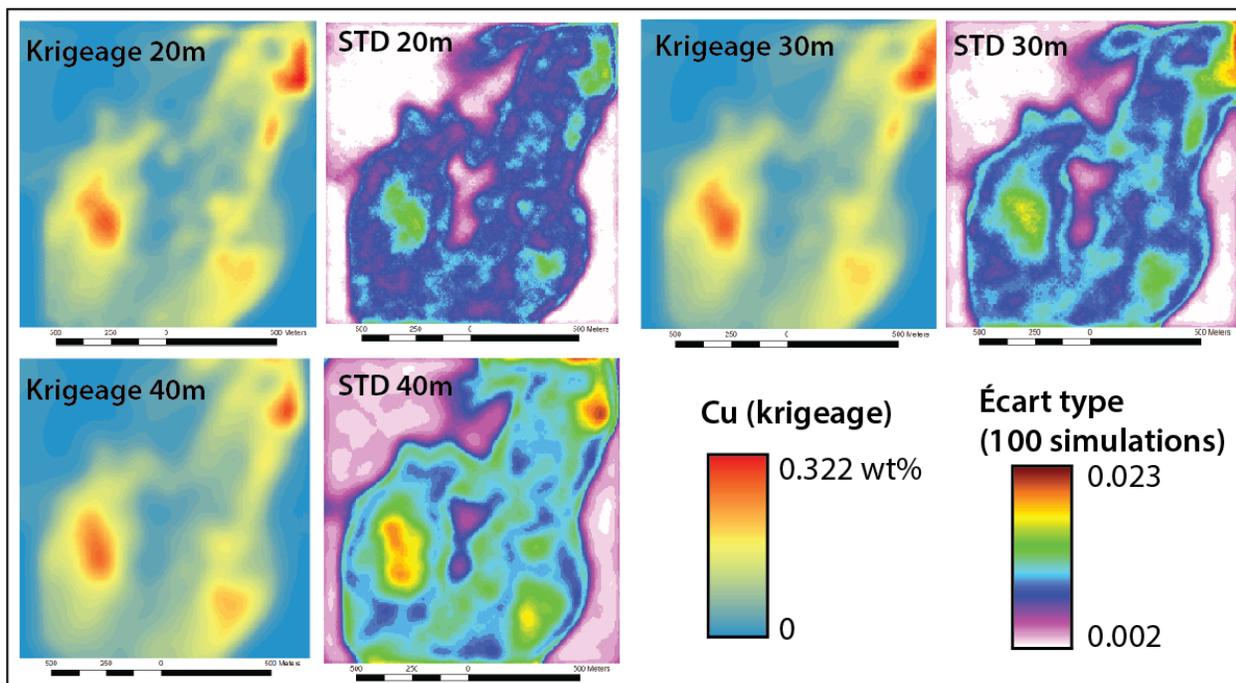
Forage	Au	Ag	Cu	Zn	Pb
<b>Moyenne globale (calculée à partir du modèle de blocs non modifié)</b>					
(aucun)	1,42 ppm	6,21 ppm	0,078 %pds	0,235 %pds	0,018 %pds
<b>Moyenne des écart types (résultats des simulations conditionnelles)</b>					
10 m	0,09874	0,45340	0,00584	0,01647	0,00115
20 m	0,09969	0,55059	0,00636	0,02328	0,00244
30 m	0,10359	0,65277	0,00724	0,03363	0,00300
40 m	0,12033	0,86325	0,00860	0,04628	0,00345
50 m	0,12942	0,87904	0,00939	0,04345	0,00395
100 m	0,21587	11 732	0,01616	0,05790	0,00685
<b>Erreurs (%) sur l'estimation des teneurs qui correspondent à <math>\pm 1</math> écart type</b>					
10 m	13,9	14,6	15,0	14,0	12,5
20 m	14,0	17,7	16,3	19,8	26,7
30 m	14,5	21,0	18,6	28,7	32,8
40 m	16,9	27,8	22,0	39,5	37,7
50 m	18,2	28,3	24,0	37,0	43,2
100 m	30,3	37,8	41,4	49,4	75,0



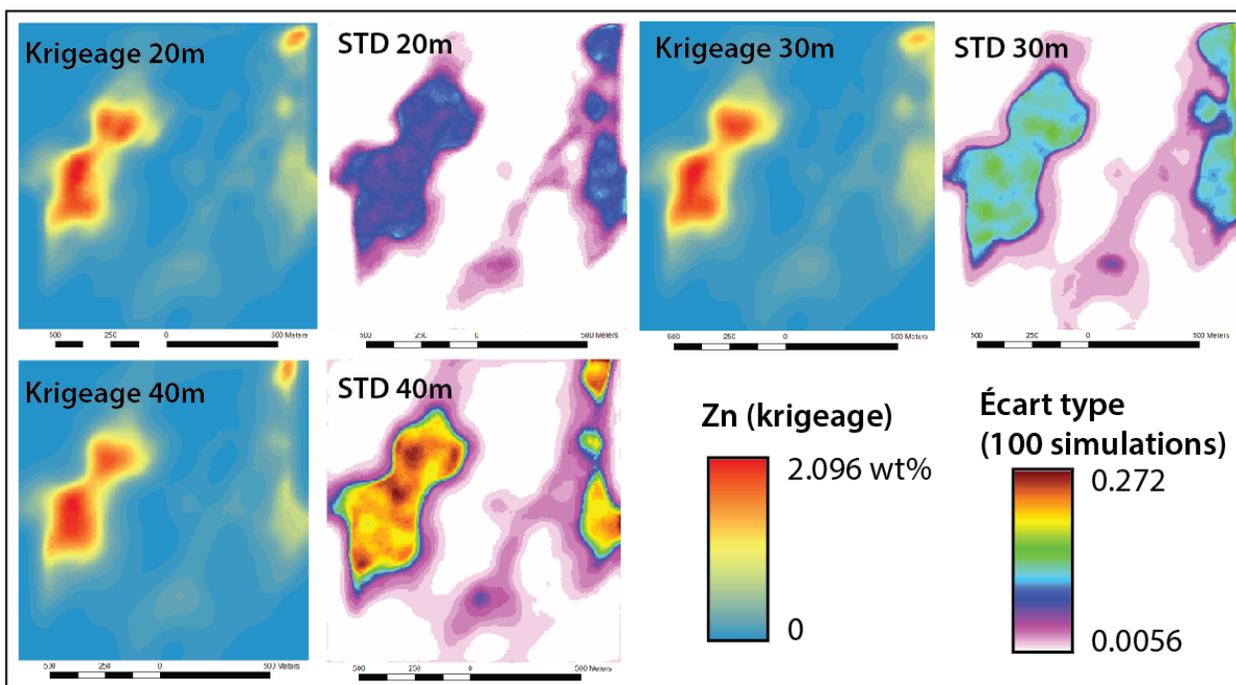
**Figure 65** : Teneurs en **Au** interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.



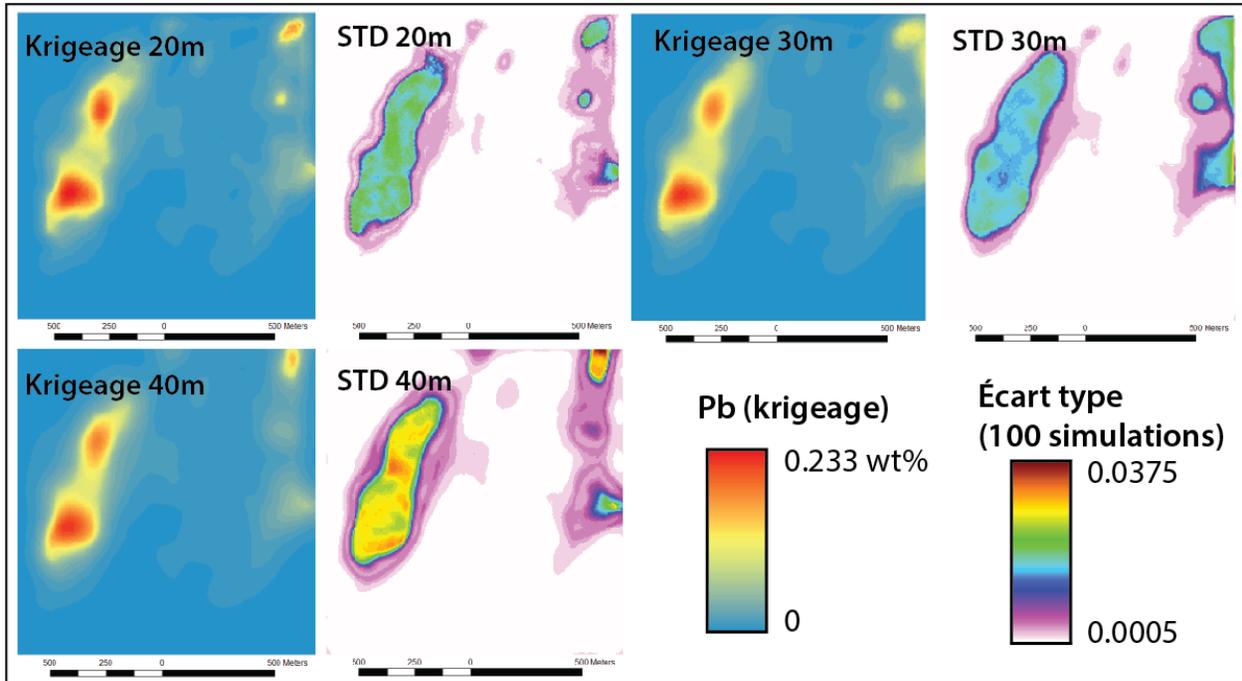
**Figure 66** : Teneurs en **Ag** interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.



**Figure 67 :** Teneurs en **Cu** interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.



**Figure 68 :** Teneurs en **Zn** interpolées par krigeage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart types qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigeage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.



**Figure 69** : Teneurs en **Pb** interpolées par krigage simple à partir d'échantillons pris aux 20 m, 30 m et 40 m, et cartes d'écart type qui présentent le résultat de simulations conditionnelles (outils d'ArcGIS) effectuées à partir des interpolations de type krigage et des échantillons pris à intervalles de 20 m, 30 m et 40 m.

---

## 8 CONCLUSIONS

---

### 8.1 Discussion et conclusions

Pour effectuer un calcul de ressources, il est nécessaire de suffisamment échantillonner un gisement pour pouvoir approximer les teneurs moyennes des substances d'intérêt ceci selon une marge d'erreur raisonnable. Il est également nécessaire d'obtenir une quantité d'échantillons suffisante permettant la documentation de la distribution spatiale des teneurs et leur interpolation avec des outils comme le krigeage.

Dans les phases précoces d'un projet, une fois que le type de minéralisation a pu être identifié et que quelques contraintes sur la géométrie du gisement sont disponibles (connaissance de l'attitude des couches, des structures majeures, etc.), alors il devient possible de sélectionner une maille de forages pour échantillonner le gisement de façon systématique. Cette maille sera choisie en fonction de l'expérience que l'on a de gisements similaires.

Ce projet a permis de faire quelques *post-mortem* sur trois gîtes de SMV et un gisement de phosphate. Cet exercice a été fait par le passé sur d'autres types de gisements, par divers auteurs. Cette approche documentaire devra être poursuivie à l'avenir, afin de mettre en place un catalogue des mailles optimales pour les différents types de gisements.

L'étude des modèles de blocs a permis de déterminer que les espacements entre les forages suivants permettaient d'approximer la moyenne globale avec une erreur raisonnable :

- Zone Paul ( $P_2O_5$ ) : maille aux 200 m, ou 200 m en N-S et de 100-200 m en E-O;
- *Bracemac* (Au, Ag, Cu, Zn) : mailles aux 20-30 m, selon les lentilles;
- *McLeod* (Au, Ag, Cu, Zn) : mailles aux 40 m environ;
- Agnico Eagle (Au, Ag, Cu, Zn, Pb) : mailles aux 20-30 m pour des erreurs très faibles, mais il est possible d'utiliser une maille aux 40 m, selon la marge d'erreur que l'on juge acceptable.

Notez que les mailles testées sont carrées, et d'autres tests devront être effectués avec des mailles rectangulaires.

Ce projet a principalement permis de tester des minéralisations de type SMV pour lesquelles des mailles aux 20 m pour les plus petites lentilles, et aux 30-40 m pour les autres, semblent adaptées. Une bonne pratique serait peut-être la suivante pour des gisements de SMV (voir méthode utilisée à La Ronde (Gosselin, 2005)) :

- Forages d'exploration aux 60-80m;
- Forages de définition entre les forages d'exploration, pour obtenir des mailles aux 30-40 m.

### 8.2 Exemple de procédure

Dans cette section, un exemple de procédure à suivre pour le forage d'un SMV est présenté, à l'aide du modèle de blocs de la lentille *Bracemac Key tuffite* (MDL\_Data\_23, données de Glencore). Le test a été effectué en 2D : pour ce faire, une portion du modèle de blocs située à < 1 m d'un plan parallèle aux couches stratigraphiques et passant par le centre de la lentille a été extraite (les points extraits sont représentés à la **Figure 70**).

Le test a été effectué sur les teneurs en Cu. Une fois les blocs extraits (**Figure 70-a**), ils ont servi à une interpolation de type krigeage simple et la moyenne des teneurs en Cu, d'après cette interpolation, est 1,0033 %pds (**Figure 70-b**). Le variogramme de la population interpolée est présenté par la **Figure 72** (notez la portée, qui vaut environ 23 m).

À partir de ces données 2D et des teneurs en Cu, la procédure suivante a été suivie :

**Étape 1 :** Simulation de forages d'exploration, avec une maille lâche. En conditions réelles, la lentille forée serait tridimensionnelle, et des forages aux 60 m ou 80 m seraient effectués. Ici, comme les données 2D sont peu abondantes, cette maille lâche est représentée par un forage aux 20 m. Les échantillons extraits ne sont pas suffisamment nombreux pour effectuer une interpolation de type krigeage, et un interpolant de type IDW est donc utilisé (**Figure 71-a**). Une fois les données interpolées, la teneur moyenne en Cu vaut 1,1500 %pds (erreur de 14,62 % par rapport à la moyenne initiale);

**Étape 2 :** Simulation de forages plus précis, entre les forages effectués précédemment (forages aux 10 m). Les échantillons extraits sont suffisamment abondants pour permettre une interpolation de type krigeage (**Figure 71-b**). Une fois interpolée, la teneur en Cu moyenne vaut 1,0284 %pds (erreur de 2,50 %). L'erreur est très bonne, et l'on pourrait arrêter l'échantillonnage ici : la procédure est cependant poursuivie à titre d'exemple;

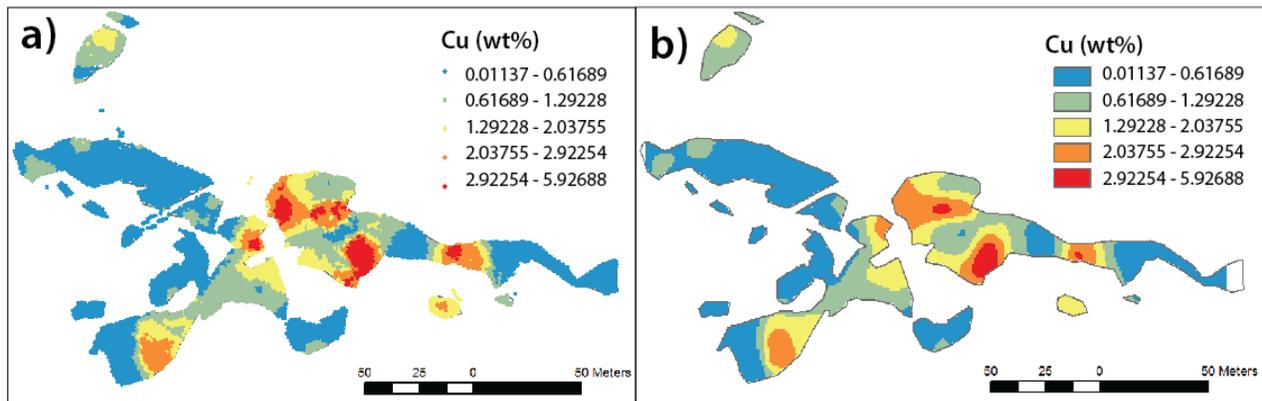
**Étape 3 :** Une simulation conditionnelle est effectuée à partir des données de forages aux 10 m. Les résultats montrent les zones qui sont les moins bien documentées à partir des échantillons disponibles (voir zones rouges sur la **Figure 71-d**). Ces zones correspondent aux domaines de hautes teneurs en Cu. Pour information, la « variance de krigeage » (**Figure 73-b, c**) est aussi comparée aux résultats des simulations conditionnelles (**Figure 73-d**). On observe que, avec krigeage simple (**Figure 73-b**), la variance de krigeage est principalement dépendante de la position des échantillons, et ne permet pas une bonne estimation de l'incertitude. Avec le krigeage ordinaire (**Figure 73-c**), la variance de krigeage, dans ce cas, donne un résultat similaire à celui des simulations (**Figure 73-d**), bien que l'échelle des valeurs soit légèrement différente. Une comparaison entre les deux techniques demanderait plus de travail (notez que contrairement aux simulations, la variance de krigeage ne prend pas en compte les valeurs de Cu);

**Étape 4 :** Les zones à « risque » (où l'incertitude sur la qualité de l'interpolation est la plus grande) mises en valeur par la simulation conditionnelle sont forées aux 5 m. Avec ces nouveaux échantillons et ceux précédemment prélevés aux 20 m puis aux 10 m, une nouvelle interpolation de type krigeage simple est effectuée (**Figure 71-c**), qui est de meilleure qualité que celle effectuée à l'étape précédente, lorsque comparée à la carte de départ (**Figure 70-a**). Une fois interpolée et moyennée, la teneur en Cu vaut 1,0840 %pds (erreur de 8,04 %).

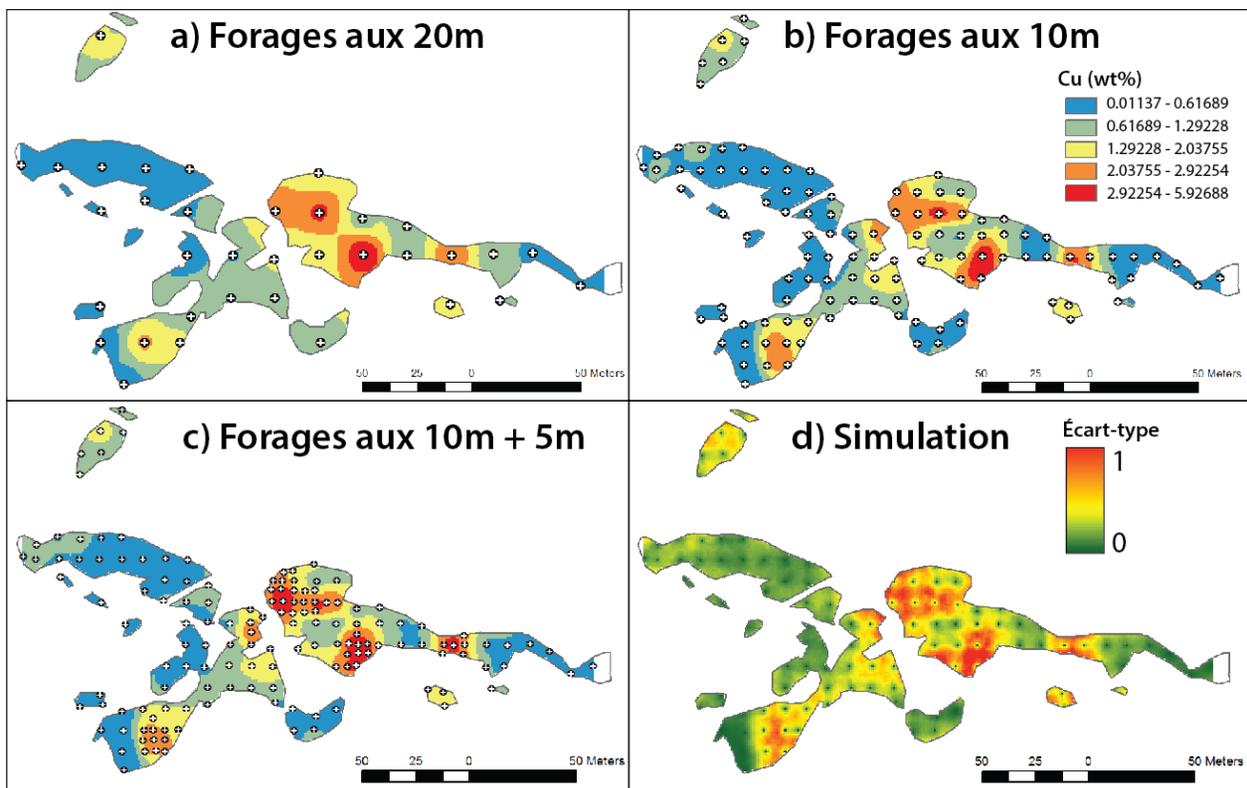
Si l'on fore un SMV, les mailles recommandées sont aux 30-40 m. La procédure recommandée, dans ce cas, est la suivante :

- 1) Forages d'exploration aux 60-80 m;
- 2) Forages de précision aux 30-40 m;
- 3) Dès que possible (c.-à-d. dès que l'on peut calculer un variogramme cohérent), utiliser les simulations conditionnelles pour cibler les zones qui mériteraient d'être mieux échantillonnées. Ces zones sont souvent celles à haute teneur, et peuvent être identifiées sans l'aide de la simulation conditionnelle. Par contre, l'avantage des simulations est de chiffrer l'incertitude, permettant ainsi une décision éclairée : est-ce que l'erreur est acceptable ou faut-il forer davantage ? Si nécessaire, forer certaines zones aux 10-20 m.

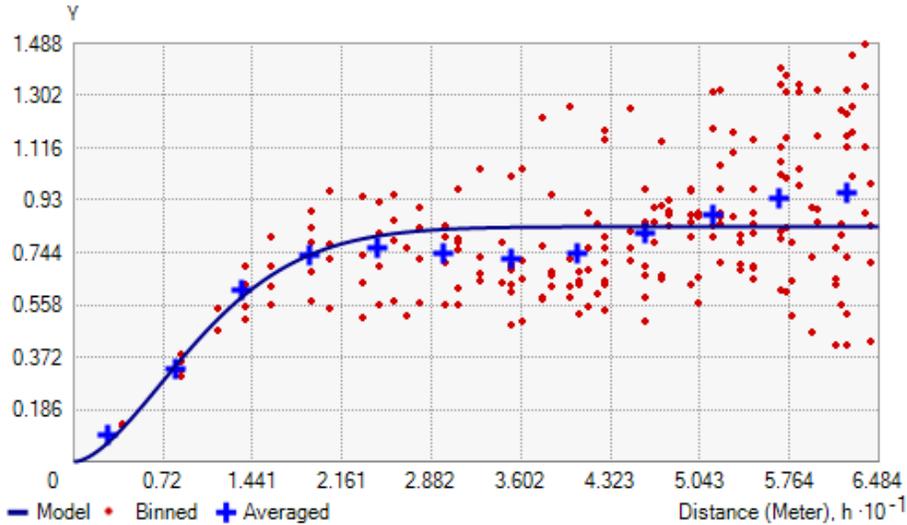
Les simulations conditionnelles mises à part, ce type de procédure est déjà employée par l'industrie. La donnée manquante est celle-ci : quelles sont les mailles recommandées pour les divers types de substances ? Une réponse complète à cette section demandera la documentation poussée des gisements connus à l'aide, par exemple, des procédures développées dans le cadre de ce projet.



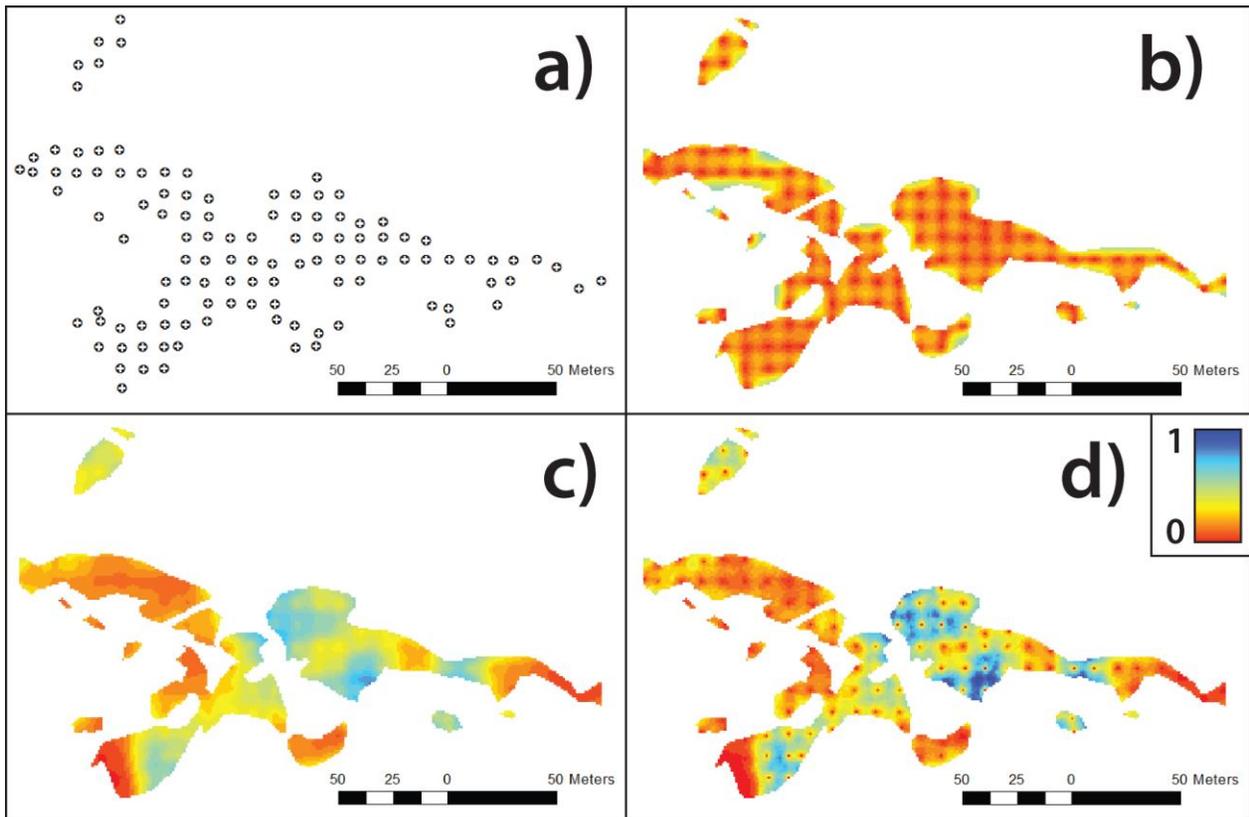
**Figure 70 :** a) Blocs extraits du modèle de blocs MDL\_Data\_23 (code couleur : teneurs en Cu ; moyenne = 1,0253 %pds) ; b) interpolation de type krigeage simple effectuée sous ArcGIS à partir des blocs de la figure (a) (moyenne des teneurs en Cu = 1,0033 %pds).



**Figure 71 :** a) Interpolation de type IDW effectuée à partir de forages simulés aux 20 m ; b-c) Interpolation de type krigeage simple effectuée à partir de forages simulés aux 10 m (b) et aux 10 m et 5 m par endroits (c) ; d) Résultats de 100 simulations conditionnelles calculées avec l'outil de ArcGIS, à partir de forages aux 10 m (voir carte b) (carte d : carte des écarts-types ; les zones en rouges sont les moins faciles à interpoler et mériteraient d'être mieux forées – voir carte c). Les croix blanches sur fond noir représentent les trous de forages.



**Figure 72 :** Variogramme calculé sous ArcGIS, à partir de tous les blocs extraits du modèle de blocs MDL\_Data\_23 (Figure 70-a). Les paramètres du variogramme sont : *Effet pépité* = 0, *plateau* = 0,836 32, et *portée* = 23 405.



**Figure 73 :** a) Échantillons (forages aux 10 m) ; b-c) « kriging variances », calculées à partir d'échantillons pris aux 10 m (a) et d'interpolations de types krigeage ordinaire (b) et krigeage simple (c) ; d) Résultats (carte des écarts-types) de 100 simulations conditionnelles calculées avec l'outil d'ArcGIS, à partir de forages aux 10 m (a). L'échelle des couleurs est identique pour les figures (a, b, c).

### 8.3 Perspectives

Ce projet sur les mailles de forages est une thématique récente au CONSOREM. Ce projet est un premier « débroussaillage » et de très nombreuses pistes restent encore à explorer, parmi lesquelles :

- Tester des mailles rectangulaires — **thématique** : calculs de ressources;
- Étudier et utiliser les corrélations croisées pour améliorer les modèles et, peut-être, réduire la quantité minimale de forages requis — **thématiques** : calculs de ressources, interpolations spatiales;
- Faire une revue de toutes les méthodes de simulations conditionnelles, de leurs avantages et limites et des solutions logiciels qui existent — **thématique** : classification des ressources et réserves;
- Continuer à définir des mailles de forages optimales pour le calcul de modèles contenant des blocs d'une taille donnée (réflexion entamée avec les tests effectués sur les données de la Ronde). Quelles sont les tailles de blocs les plus utiles au calcul des ressources et à la planification des opérations de minage ? Avec quel détail est-il nécessaire de documenter les variations à petite échelle ? — **thématiques** : calculs de ressources et réserves.

---

## RÉFÉRENCES

---

- Adair, R.N. (2009) Technical Report on the Resource Calculation for the Bracemac-McLeod Discoveries, Matagami Project, Québec. Technical report NI-43-101 prepared for Donner Metals Ltd. by Zorayda Consulting Ltd., 197 p.
- Agarwal J.C., Brown S.R., Katrak S.E. (1984) Taking the sting out of project start-up problems. *E&Mj-Engineering and Mining Journal*, 185(9):62-70.
- ArcGIS (2015) Site internet de ArcGIS. <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-gaussian-geostatistical-simulations-works.htm> [consulté le 11 février 2016]
- Burmeister B.B. (1988) From resource to reality: a critical review of the achievements of new Australian gold mining projects during the period January 1983 to September 1987. Macquarie University.
- CIM (2000) CIM standards on mineral resources and reserves—Definitions and guidelines. Prepared by the CIM Standing Committee on Reserve Definitions: *CIM Bull.*, v. 93, no. 1044, p. 53–61.
- Clow G. (1991) Why gold mines fail. *Northern Miner Magazine*, 6:31-34.
- CSA (2001) Standards of disclosure for mineral projects: National Instrument 43–101, Canadian Securities Administration, 22 p.
- David M. (1988) Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation. Elsevier, Amsterdam, 216 p.
- Deutsch C.V. (2002) Geostatistics Reservoir Modeling. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Deutsch C.V., Journel A.G. (1998) GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, second edition. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Dietrich C.R., Newsam G.N. (1993) A Fast and Exact Method for Multidimensional Gaussian Stochastic Simulations. *Water Resources Research*, 29(8):2861–2869.
- Emery X., Ortiz J.M., Rodríguez J.J. (2006) Quantifying uncertainty in mineral resources by use of classification schemes and conditional simulations. *Mathematical geology*, 38(4) :445-464.
- EURO (2002) Code for reporting of mineral exploration results, mineral resources and mineral reserves (the European code): Report prepared by the Institution of Mining and Metallurgy Working Group on Resources and Reserves in conjunction with the European Federation of Geologists and the Institute of Geologists of Ireland, 34 p.
- Gosselin G. (2005) 2005 LaRonde Mineral Resource & Mineral Reserve Estimate, Agnico-Eagle Mines Ltd. LaRonde Division. Report Agnico-Eagle, 120 p.
- Guy H. (1969) Laboratory theory and methods for sediment analysis. United State Geological Survey report, 69 p.
- JORC (2004) Australasian Code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves (the JORC Code, 2004 Edition): Report prepared by the Joint Ore Reserve Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia, 21 p.
- Journel A.G. (1974) Geostatistics for Conditional Simulation of Ore Bodies. *Economic Geology*, 69:673–687.

- Journel A.G., Huijbregts C.J. (1978) Mining geostatistics. Academic press.
- Knoll K. (1989) And now the bad news. Northern Miner Magazine, 4:48-52.
- King H.F. McMahon D.W., Bujtor, G.J. (1982) A guide to the understanding of ore reserve estimation. Supplement to Proceedings, Australasian Institute of Mining and Metallurgy 281, 21 p.
- Krige D.G. (1996) A Practical Analysis of the Effects of Spatial Structure and of data Available and Accessed, on Conditional Biases in Ordinary Kriging, in: Geostatistics Wollongong '96 (Eds: E.Y. Baafi and N.A. Schofield), p. 799-810 (Kluwer, The Netherlands, 1997).
- Lantuejoul C. (2002) Geostatistical Simulation: Models and Algorithms, Springer, Berlin.
- McCarthy, P.L. (2003) Managing technical risks for mine feasibility studies. In: Proceedings, Mining Risk Management Conference. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 21-27.
- Mantoglou A., Wilson J.W. (1982) The Turning Bands Methods for Simulation of Random Fields Usin Line Generation by a Spectral Method. Water Research, 18(5):1379.
- Rachidi M., Duplessis C. (2015) Mise à jour de l'estimation des ressources, NI 43-101, Projet du Lac-à-Paul, Québec, Canada — Février 2015. Mémoire, rapport NI43-101, 29 p.
- Rafini S. (2014) Assurance et contrôle de la qualité (QA/QC) en exploration minérale : synthèse et évaluation des usages. Projet Consorem 2013-05, 52 p.
- Ravenne C., Beucher H. (1988) Recent Development in Description of Sedimentary Bodies in a Fluvio Deltaic Reservoir and Their 3D Conditional Simulations. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 October 1988. SPE-18310-MS, <http://dx.doi.org/10.2118/18310-MS>
- Rossi M.E., Deutsch C.V. (2014) Uncertainty and Risk. In: Mineral Resource Estimation, Springer Netherlands, 209-221.
- SAMREC (2000) South African Code for Reporting of Mineral Resources and Mineral Reserves (The SAMREC Code): Report prepared by the South African Mineral Resource Committee SAMREC under the auspices of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 38 p.
- SME (1999) A guide for reporting exploration information, resources, and reserves: Report prepared by SME Resources and Reserves Committee, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 17 p.
- USGS (1980) Principles of a resource/reserve classification for minerals: U.S. Geological Survey Circular 831, 5 p.