

---

## **Applications des outils de la géostatistique**

### **V.3.1. Variographie des différents gisements**

Malgré les règles géologiques simples qui ont présidé à la formation des gisements d'argiles kaoliniques des Charentes, l'intensité des phénomènes mis en jeu n'était pas identique dans tous les gisements. Comme on a vu précédemment, certains gisements ont subi des phénomènes post sédimentaires très intenses tandis que les gisements simples restent dans le cadre d'une composition kaolinique avec la silice et le mica en tant qu'impuretés principales. Leur géométrie détaillée présente une grande complexité, et la taille et la forme des dépôts d'argile changent d'un gisement à l'autre. L'influence de tous ces facteurs sur la structure spatiale des variables caractérisant le kaolin mène à une situation où les structures spatiales des variables sont distinctes d'un gisement à l'autre.

Dans cette partie, on présente les variogrammes expérimentaux calculés sur les gisements les plus typiques des Charentes. Parmi ces gisements on a choisi les gisements qui ont des échantillons suffisants pour une étude variographique robuste. La figure suivante montre l'implantation des sondages dans chaque gisement. Les gisements Chez-Arlot, Bois Charles, Chierzac et Chez-Maudet sont sondés avec une maille de 20m. La dimension de maille de sondage pour le gisement de Saint-Georges est de 10m. Une partie du gisement de BDR est également échantillonnée par les sondages espacés de 10m de distance. Comme on l'observe sur les cartes, certaines irrégularités sont visibles et dues aux sondages supplémentaires ou aux sondages anciens. Les cartes d'implantation des sondages sont présentées dans la figure V.25.

Cette étude est réalisée sur les données régularisées sur un support d'une longueur d'un mètre pour tous les gisements. Le pas des variogrammes horizontaux est choisi égal à la dimension de la maille des sondages. Pour faciliter la tâche de comparaison, la moyenne des variogrammes horizontaux a été calculée. Autrement dit, les variogrammes sont calculés avec une tolérance angulaire de 90° et une demi-hauteur de tranche inférieure à 1 m (0.99m).

La figure V.26 présente les variogrammes horizontaux de la teneur en alumine brute. Ces variogrammes sont normés par la variance des données prises en compte dans le calcul. Les variogrammes du BDR-10\*10 et de Maudet, se comportent de façon très particulière. Ils sont caractérisés par une montée très rapide aux faibles distances. A 20m de distance entre les paires, on a 80% de la variance totale des données. D'autre part, c'est le variogramme de Chierzac qui reste sous la barre de la variance totale même à une distance importante. Entre ces deux cas on trouve le variogramme de Chez-Arlot et le variogramme du gisement de St. Georges qui sont plus continus. A cause de la non-stationnarité de la moyenne, on constate une dérive, aux distances prises en compte.

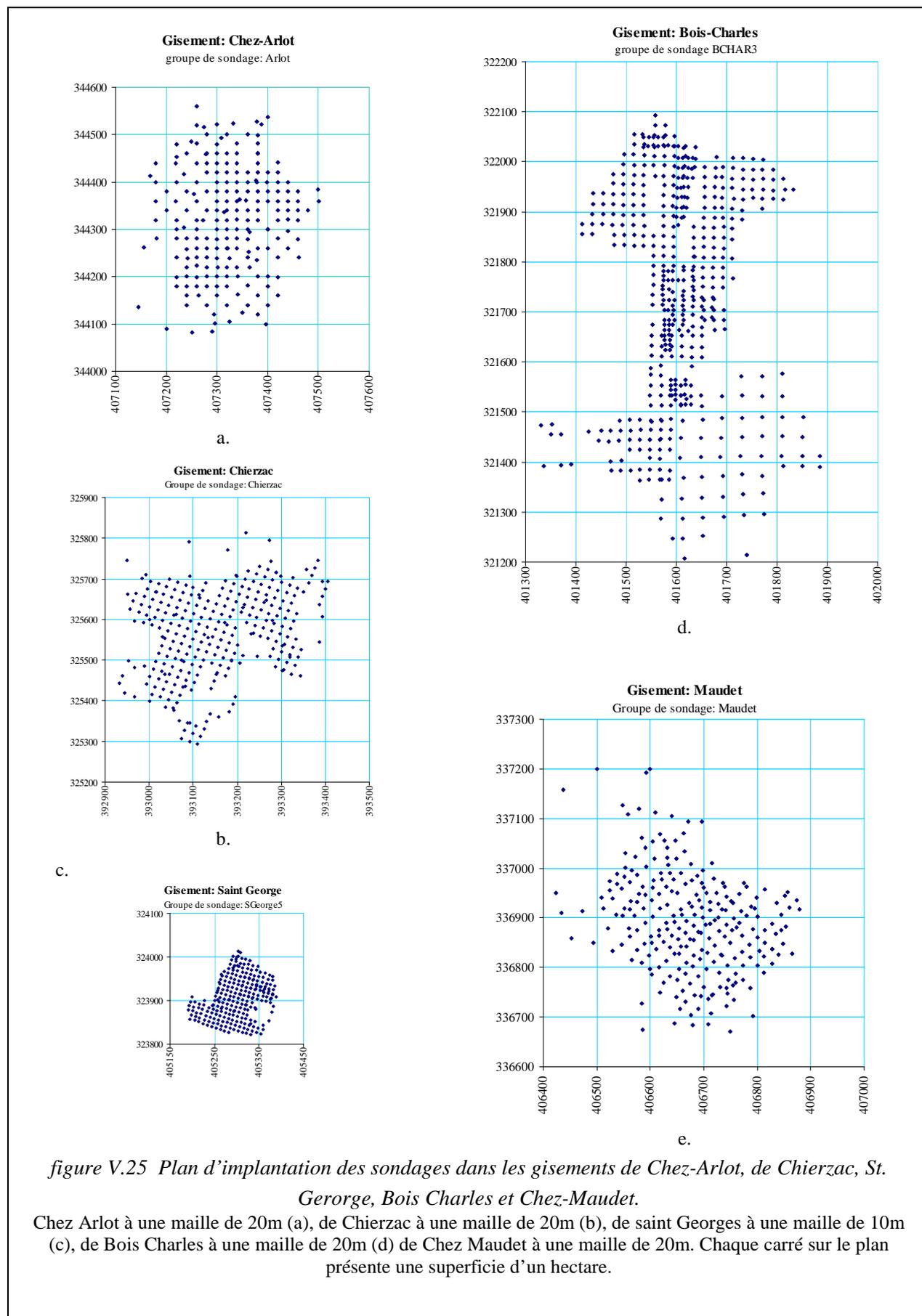
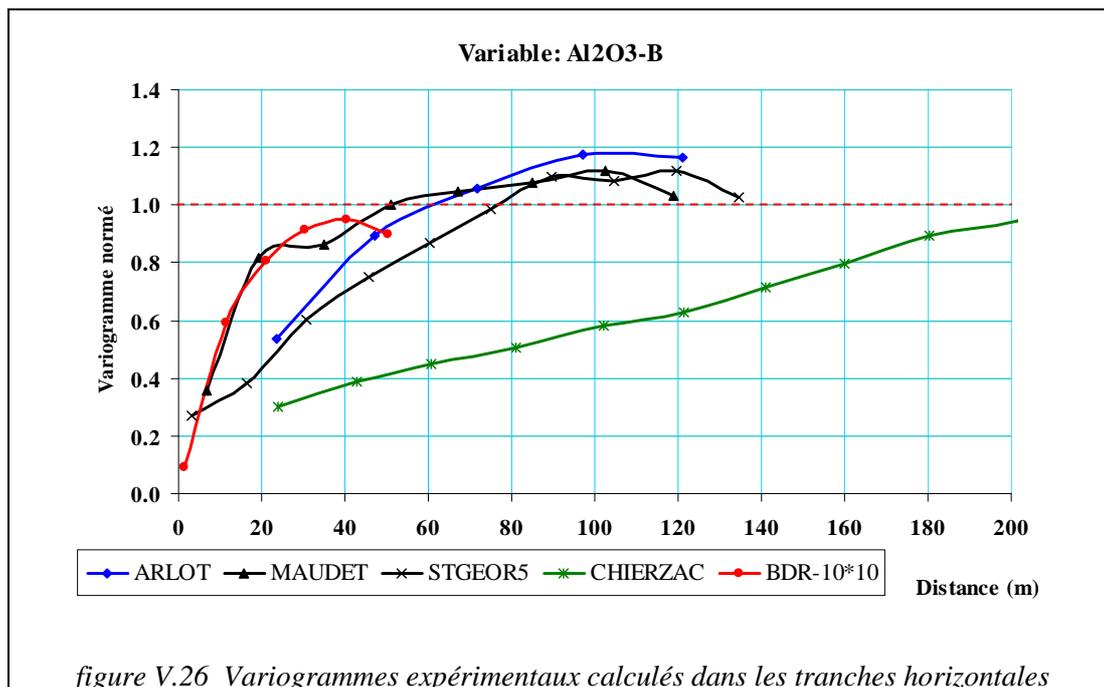


figure V.25 Plan d'implantation des sondages dans les gisements de Chez-Arlot, de Chierzac, St. George, Bois Charles et Chez-Maudet.

Chez Arlot à une maille de 20m (a), de Chierzac à une maille de 20m (b), de saint Georges à une maille de 10m (c), de Bois Charles à une maille de 20m (d) de Chez Maudet à une maille de 20m. Chaque carré sur le plan présente une superficie d'un hectare.



### V.3.2. Maille de sondage optimale

La taille d'un gisement et la variabilité spatiale de qualité du minerai sont les deux principaux facteurs de guidage qui jouent un rôle essentiel en déterminant l'espacement optimum entre sondages. La qualité de minerai dans un dépôt est ordonnée par les facteurs géologiques. La variation de ces facteurs géologiques mène à la dissimilitude spatiale de la qualité de minerai à l'intérieur du gisement. Ainsi, les échantillons prélevés très étroitement tendent à refléter la nature homogène d'un dépôt et réciproquement les échantillons à une distance importante présentent sa nature non homogène. Ceci rend nécessaire la formulation d'une stratégie de sondage. L'optimisation de la maille de sondage utilisant des relations géostatistiques de volume-variance a été employée dans le monde entier en ce qui concerne beaucoup de dépôts de minerai surtout pour le charbon (Saikia et al 2006, Noppe 1994, Armstrong 1983, Kim et al 1981).

Le système de krigeage ainsi que la variance de krigeage ne dépendent que de la fonction structurale  $C(h)$  ou  $\gamma(h)$  et des géométries estimé-estimant et non des valeurs de l'information. En conséquence on peut, connaissant la configuration de l'information et avant d'engager les travaux de forage, prévoir la qualité du krigeage de tel ou tel panneau (Journel 1978). La variance de krigeage permet ainsi de gérer au mieux un budget de reconnaissance. Une fois que l'on sait calculer la variance d'estimation, on peut déterminer la maille de sondage optimale pour une variable particulière (Armstrong 1997).

Ici optimal peut signifier que le maillage doit donner les informations nécessaires avec un minimum de sondages et occasionner le moins de dépenses possibles. Une des stratégies peut être basée sur la limite de la précision de l'estimation. On cherche à définir la maille de sondage avec laquelle l'erreur d'estimation sera inférieure à une limite imposée.

L'optimisation de maille de sondage peut être basée sur la prise en considération de la relation des coûts-rendements. L'amélioration marginale dans l'information acquise peut être comparée au coût marginal de forage d'un sondage supplémentaire. En formulant une stratégie de forage optimale utilisant la variance du krigeage, certaines hypothèses implicites sont faites. Une de ces hypothèses est que le modèle de variogramme utilisé dans le calcul de la variance de krigeage représente bien la variabilité du

gisement. En conséquence, les valeurs d'échantillons disponibles aux étapes successives du forage dans le futur ne devraient pas modifier rigoureusement le type de variogramme et la moyenne de la population des divers paramètres de qualité.

On présente ici, une étude sur le calcul de la variance d'estimation d' $Al_2O_3$ -B, de la PF, de  $Fe_2O_3$ -B et de  $K_2O$ -B dans trois gisements différents. Le gisement Chierzac est connu en tant que gisement du type nappe et sans argile hyperalumineuse. En revanche, le gisement BDR-NE est un gisement très riche en alumine et chenalisé (moins important que la partie Sud-ouest du gisement BDR). Le gisement St. Georges est un gisement kaolinique à variabilité moins importante. Le premier sondage, en reconnaissance dite tactique (T1) est foré sur une maille de 56.5m, sur le centre d'une cellule de 80m\*80m (Tableau V.5 et figure V.27).

La variance d'estimation est calculée pour l'estimation d'un bloc ayant la même taille que la maille de sondage pour chaque étape. L'estimation de l'étape 0 commence par les quatre sondages de type S3, sur un bloc de taille 80\*80 centré sur le centre (0,0).

**Tableau V.5 Maille de sondage aux différentes étapes d'exploration**

Type	S3	T1	T2	T3	T4	T4/T5	T5
Configuration	80*80	56.5*56.5	40*40	28*28	20*20	15*15	10*10
Nombre total	4	5	9	13	25	41	81
sondages ajoutés	4	1	4	4	12	16	40
Sondage de cellule	0	1	1	5	9	25	49
Entre 2 cellules	0	0	4	4	12	12	28
Entre 4 cellules	4	4	4	4	4	4	4
Nombre par cellule	1	2	4	8	16	32	64
Ajouté par cellule		1	2	4	8	16	32

A ce stade, on utilise seulement le variogramme horizontal pour avoir la précision minimale. Dans l'étape suivante, l'estimation sera faite par 5 sondages, les quatre sondages de S3 avec un nouveau sondage de T1 sur un bloc de taille 56.5\*56.5. Ensuite on ajoute les quatre sondages de T2 pour estimer d'un bloc de taille 40\*40 centré sur l'origine (figure V.28). La précision de l'estimation est présentée en tenant compte de l'écart type de l'erreur d'estimation et pour le quantile à 95% de confiance ( $1.96*s$ ).

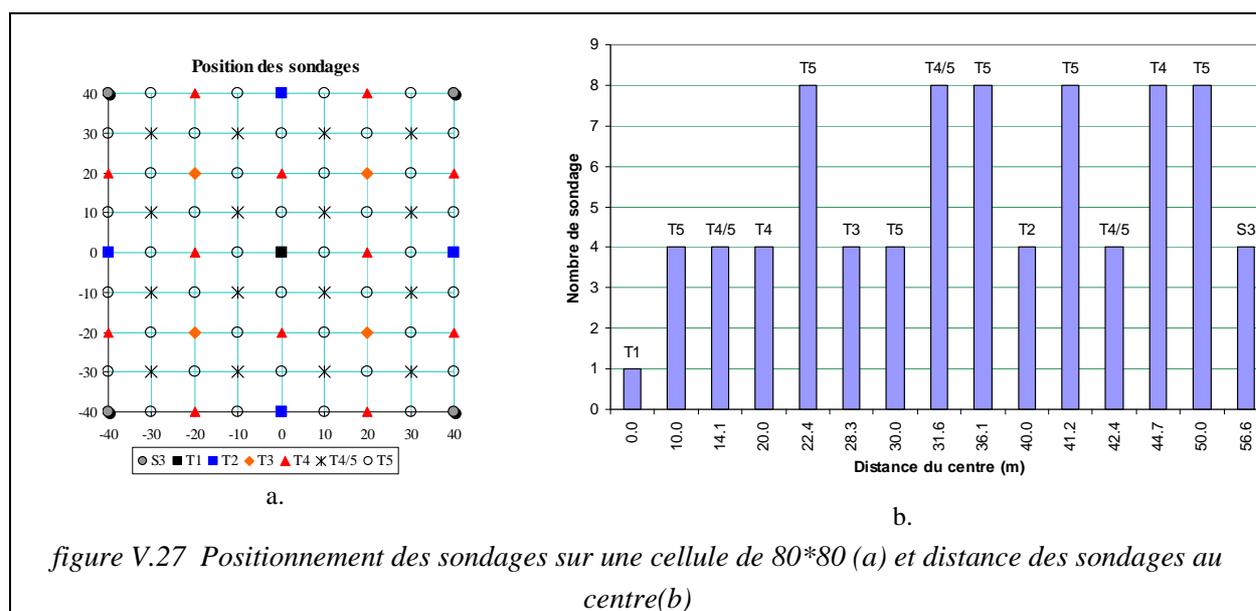
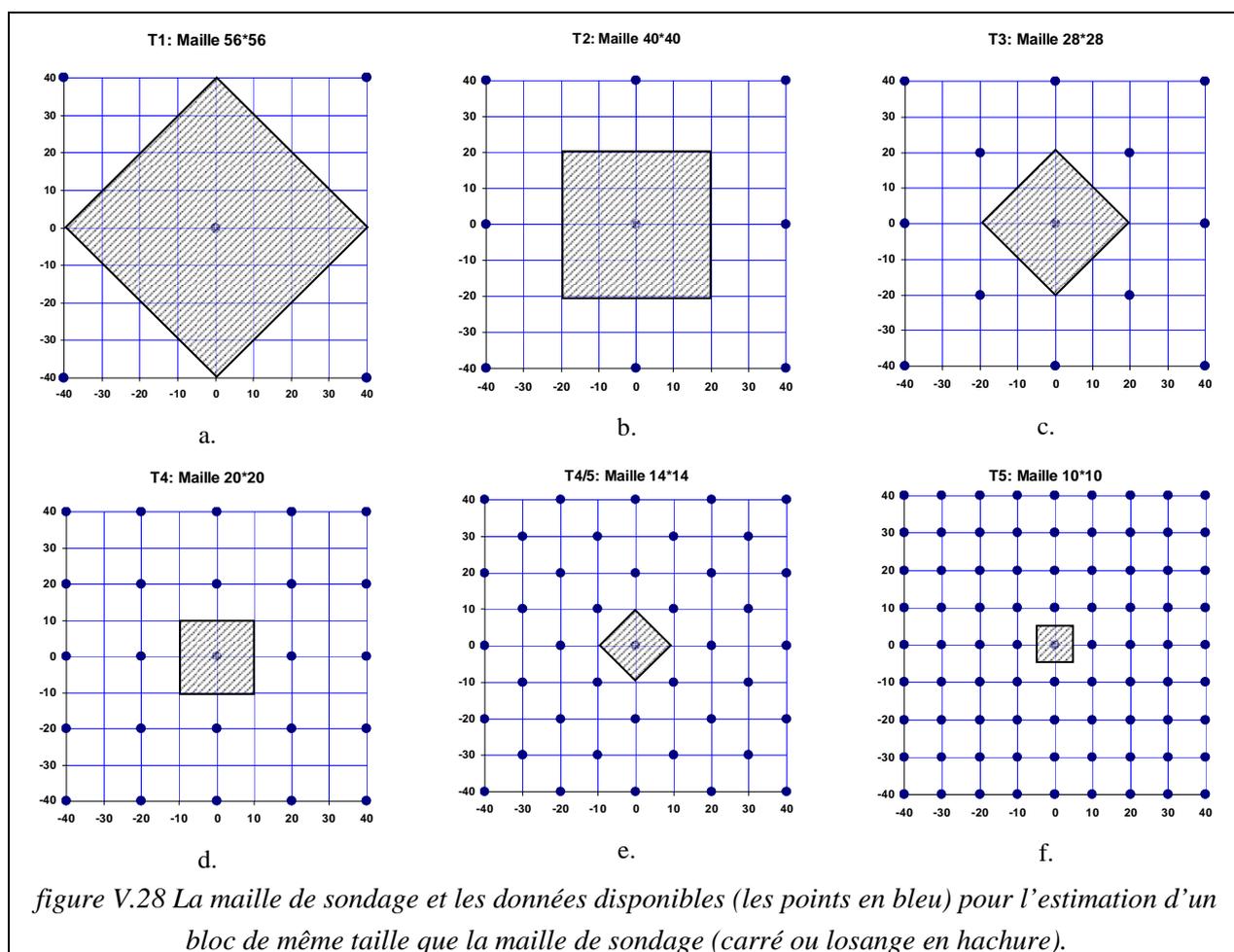


figure V.27 Positionnement des sondages sur une cellule de 80\*80 (a) et distance des sondages au centre(b)

L'amélioration de la précision est étudiée en la comparant avec la précision de l'étape zéro. Cette amélioration exprimée en pourcentage est calculée en divisant l'écart de précision de chaque étape par la précision de l'étape zéro (Base S3). On regarde ensuite l'amélioration de la précision étape par étape. Dans cette phase de calcul, l'écart de précision entre les deux stades successifs est divisé par la précision de l'étape préliminaire et présenté en pourcentage. Pour se rapprocher d'un concept économique, on fait entrer dans le système le nombre des sondages qui sont ajoutés au système à chaque nouvelle étape. On divise alors l'amélioration de chaque étape par le nombre des sondages ajoutés. On en déduit l'amélioration marginale apportée par chaque sondage.

L'utilisation du nombre des nouveaux sondages à chaque étape est valable dans le cas d'une cellule isolée, tandis que par exemple chaque sondage S4 qui est situé au coin d'une cellule, participe à l'estimation, des quatre cellules voisines. On peut calculer le nombre propre des sondages par cellule qui prend en compte ce fait en utilisant un poids pour les sondages ( $n$  sondages) communs entre deux ou quatre cellules ( $n/2$  ou  $n/4$ ). En tout cas, la réalité se situe entre ces deux cas. Pour les petits gisements, on est proche du cas d'une cellule isolée et pour les gisements assez grands, le chiffre s'approche de celui d'une grille continue.



Les variogrammes calculés pour les quatre variables mentionnées peuvent être représentés par les équations suivantes :

## Estimation de la qualité des kaolins des gisements du bassin des Charentes

$$\lambda_{Al_2O_3-b}(h) = 2.5 * Sph(h/20) + 6.5 * Sph(h/50) + 4.0 * Lin(h/800)$$

$$\lambda_{PF}(h) = 1.0 * Sph(h/20) + 2.5 * Sph(h/50) + 2.5 * Lin(h/1000)$$

$$\lambda_{Fe_2O_3-b}(h) = 0.1 * Sph(h/20) + 0.12 * Sph(h/120) + 0.06 * Lin(h/800)$$

$$\lambda_{K_2O-b}(h) = 0.06 * Sph(h/20) + 0.06 * Sph(h/50) + 0.06 * Lin(h/800)$$

Les variogrammes horizontaux ne sont pas proportionnels, mais on constate la similarité des éléments les composant. L'anisotropie structurale (zonale) est modélisée grâce au modèle linéaire. Pour éviter l'effet des valeurs aberrantes, le calcul du variogramme de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est limité aux échantillons ayant une teneur en fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) inférieure à 5%. La limite de 2% est retenue pour le calcul du variogramme de K<sub>2</sub>O-B. Pour la perte au feu, l'alumine brute et la potasse brute les deux structures sphériques atteignent leurs paliers seulement à 20m et à 50m. Presque un tiers de la variance est expliquée par le modèle linéaire qui met en évidence la zonalité verticale du gisement.

Une série des codes écrits pour MATLAB a permis de calculer la variance d'estimation et la moyenne du variogramme à l'intérieur du bloc. Elle est prise comme la variance à l'intérieur des blocs. On observe la conséquence directe de l'écart-type très important de la teneur en alumine brute et de la PF sur la variance de l'erreur d'estimation. Une maille de sondage de 20\*20 peut assurer une précision de 1% pour l'erreur d'estimation pour la PF, tandis que cela est n'est pas accessible même par une maille de 10\*10 pour l'estimation de l'alumine brute.

**Tableau V.6 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement BDR-NE**

(voir commentaires dans le texte)

Variable	Type	Config.	$\gamma_{vv}$	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(KO)$		95%	Base S3	Par étape	Nb	Cellule
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B	S3	80*80	7.93	2.669	20.5	3.20				
	T1	56.5*56.5	7.08	1.834	14.1	2.65	17.1	17.1	17.1	17.1
	T2	40*40	5.93	1.378	10.6	2.30	28.1	13.3	3.3	6.7
	T3	28*28	4.74	1.147	8.8	2.10	34.5	8.8	2.2	2.2
	T4	20*20	3.67	0.754	5.8	1.70	46.9	18.9	1.6	2.4
	T4/T5	14*14	2.71	0.536	4.1	1.43	55.2	15.7	1.0	1.0
	T5	10*10	1.96	0.395	3.0	1.23	61.5	14.1	0.4	0.4
PF	S3	80*80	3.14	1.043	17.4	2.00				
	T1	56.5*56.5	2.79	0.726	12.1	1.67	16.6	16.6	16.6	16.6
	T2	40*40	2.35	0.539	9.0	1.44	28.1	13.8	3.5	6.9
	T3	28*28	1.88	0.447	7.4	1.31	34.6	9.0	2.2	2.2
	T4	20*20	1.45	0.294	4.9	1.06	46.9	18.9	1.6	2.4
	T4/T5	14*14	1.07	0.209	3.5	0.90	55.3	15.7	1.0	1.0
	T5	10*10	0.78	0.152	2.5	0.76	61.8	14.7	0.4	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B	S3	80*80	0.16	0.049	17.6	0.44				
	T1	56.5*56.5	0.14	0.038	13.4	0.38	12.8	12.8	12.8	12.8
	T2	40*40	0.12	0.029	10.5	0.34	22.8	11.5	2.9	5.8
	T3	28*28	0.10	0.023	8.2	0.30	31.7	11.4	2.9	2.9
	T4	20*20	0.08	0.016	5.7	0.25	43.1	16.7	1.4	2.1
	T4/T5	14*14	0.06	0.012	4.5	0.22	49.7	11.6	0.7	0.7
	T5	10*10	0.05	0.009	3.3	0.19	56.7	13.9	0.3	0.4
K <sub>2</sub> O-B	S3	80*80	0.11	0.035	19.3	0.37				
	T1	56.5*56.5	0.10	0.027	14.9	0.32	12.2	12.2	12.2	12.2
	T2	40*40	0.09	0.021	11.7	0.28	22.1	11.2	2.8	5.6
	T3	28*28	0.07	0.018	9.7	0.26	29.0	8.9	2.2	2.2
	T4	20*20	0.06	0.012	6.7	0.21	41.2	17.2	1.4	2.2
	T4/T5	14*14	0.04	0.009	4.8	0.18	49.9	14.8	0.9	0.9
	T5	10*10	0.03	0.007	3.6	0.16	56.8	13.7	0.3	0.4

L'amélioration de l'estimation est très importante pour la première étape. En ajoutant seulement un sondage on baisse l'erreur d'estimation de 13 à 18%. Au fur et à mesure, la baisse de l'erreur devient de plus en plus coûteuse, par exemple pour avoir le même taux de baisse de l'erreur à partir d'une maille 28\*28m, entre 9 à 12 sondages supplémentaires seront nécessaires pour chaque cellule. Selon le Tableau V.6, et les indications de variabilité souhaitées par l'exploitant, une maille de 20\*20 est souhaitable pour le gisement BDR-NE.

Comme on a vu précédemment le gisement de Chierzac est plus régulier que le gisement de BDR, la variance de l'Alumine et de la PF sont relativement faibles. La variance de la PF est égale à 1. Les variogrammes horizontaux du gisement Chierzac sont calculés comme expliqué pour le gisement BDR-NE.

$$\lambda_{Al_2O_3-b}(h) = 1.8 * Sph(h/30) + 6.8 * Sph(h/300)$$

$$\lambda_{PF}(h) = 0.28 * Sph(h/40) + 0.78 * Sph(h/300)$$

$$\lambda_{Fe_2O_3-b}(h) = 0.08 * Cub(h/30) + 0.13 * Sph(h/225)$$

$$\lambda_{K_2O-b}(h) = 0.008 * Cub(h/20) + 0.020 * Sph(h/300)$$

La variance de l'alumine brute est égale à 8.6 ce qui est environ deux tiers de la variance de l'alumine de BDR-NE. Le modèle se révèle plus continu et la structure a une portée plus petite (30m) représentant seulement 20% de la variance totale. Le reste est représenté par un modèle sphérique d'une portée de 300m. Pour l'oxyde de fer et la potasse, on constate une continuité à l'origine grâce à la variographie au long des sondages. Cela nous permet d'utiliser un modèle cubique (ou gaussien), comme première structure.

Remarque : les variogrammes sont calculés sur les échantillons régularisés sur les supports d'une longueur de 1m. Le découpage des échantillons longs en des segments plus petits, peut artificiellement baisser la somme des carrés des écarts pour le premier pas du variogramme vertical et induire par conséquent une impression de continuité (une pente faible à l'origine). Les variogrammes verticaux de l'oxyde de fer et de la potasse montrent une pente faible à l'origine, cela n'est pas vu dans le cas des variogrammes de l'alumine et de la perte au feu. Pour cela on a préféré utiliser le modèle cubique pour le variogramme de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B et de K<sub>2</sub>O-B.

Malgré la continuité observée sur les variogramme verticaux, la portée du modèle cubique est seulement de 30m pour la variable de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B et de 20m pour K<sub>2</sub>O-B, et leurs paliers présentent environ 40% et 30% de leurs variances respectives. La variance de la potasse est très faible.

En conséquence, on s'attend à ce qu'une maille plus grande soit suffisante pour répondre au même niveau de précision d'estimation souhaité que pour le gisement BDR-NE. On peut obtenir une précision d'estimation en alumine pour le gisement Chierzac avec une maille de 40\*40, supérieur à celle d'une maille 20\*20 pour le gisement BDR (N'oublions pas que dans ces calculs la taille des blocs est choisie égale à la maille de sondage).

Le Tableau IV.7 récapitule le résultat de la précision de l'estimation en tranche horizontale pour le gisement Chierzac. Pour ce gisement une maille de 40\*40 est largement suffisante pour ce qui concerne le niveau de précision de l'estimation pour les quatre variables principales.

Le gisement de Saint-Georges a été classé par Delineau (1994), comme le Bois Charles, en gisement d'argile kaolinique blanche à mica (type III). La variation des variables chimiques est faible comme on l'a vu dans IV.6. La structure spatiale se montre plus robuste que celle du gisement de BDR, mais moins continue que celle de Chierzac.

## Estimation de la qualité des kaolins des gisements du bassin des Charentes

Les équations suivantes montrent les résultats d'une étude variographique sur les échantillons régularisés sur un support d'une longueur de 1m. La variographie le long des sondages témoigne de l'absence d'un effet de pépite important. Les modèles ne sont pas stationnaires. Le variogramme de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est calculé en masquant les échantillons ayant une teneur de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supérieure à 2%. Ces échantillons sont rares dans ce gisement. Le modèle, sauf pour le K<sub>2</sub>O-B, se compose d'un modèle sphérique à une faible portée, le reste étant expliqué par un modèle linéaire.

**Tableau V.7 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Chierzac**

(voir commentaires dans le texte)

Variable	Type	Config.	$\gamma_{vv}$	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(KO)$		95%	Base S3	Par étape	Nb	Cellule
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B	S3	80*80	3.08	0.928	10.9	1.89				
	T1	56.5*56.5	2.56	0.662	7.8	1.59	15.5	15.5	15.5	15.5
	T2	40*40	2.10	0.467	5.5	1.34	29.0	16.0	4.0	8.0
	T3	28*28	1.64	0.317	3.7	1.10	41.5	17.6	4.4	4.4
	T4	20*20	1.22	0.246	2.9	0.97	48.5	11.9	1.0	1.5
	T4/T5	14*14	0.89	0.179	2.1	0.83	56.1	14.8	0.9	0.9
	T5	10*10	0.64	0.118	1.4	0.67	64.3	18.6	0.5	0.6
PF	S3	80*80	0.41	0.131	13.8	0.71				
	T1	56.5*56.5	0.34	0.084	8.8	0.57	20.0	20.0	20.0	20.0
	T2	40*40	0.27	0.053	5.6	0.45	36.5	20.6	5.1	10.3
	T3	28*28	0.20	0.040	4.2	0.39	44.9	13.2	3.3	3.3
	T4	20*20	0.15	0.030	3.1	0.34	52.5	13.8	1.2	1.7
	T4/T5	14*14	0.10	0.019	2.0	0.27	61.6	19.2	1.2	1.2
	T5	10*10	0.07	0.014	1.5	0.23	67.4	15.1	0.4	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B	S3	80*80	0.11	0.033	15.9	0.36				
	T1	56.5*56.5	0.10	0.026	12.3	0.31	12.2	12.2	12.2	12.2
	T2	40*40	0.08	0.019	9.1	0.27	24.5	14.0	3.5	7.0
	T3	28*28	0.07	0.012	5.6	0.21	40.8	21.6	5.4	5.4
	T4	20*20	0.05	0.005	2.5	0.14	60.4	33.1	2.8	4.1
	T4/T5	14*14	0.03	0.002	1.2	0.10	73.1	32.0	2.0	2.0
	T5	10*10	0.02	0.001	0.7	0.08	78.8	21.4	0.5	0.7
K <sub>2</sub> O-B	S3	80*80	0.01	0.003	12.1	0.11				
	T1	56.5*56.5	0.01	0.003	9.7	0.10	10.4	10.4	10.4	10.4
	T2	40*40	0.01	0.002	7.6	0.09	20.7	11.5	2.9	5.8
	T3	28*28	0.01	0.002	6.5	0.08	26.9	7.8	1.9	1.9
	T4	20*20	0.01	0.001	4.4	0.07	39.8	17.6	1.5	2.2
	T4/T5	14*14	0.00	0.001	2.1	0.05	58.3	30.8	1.9	1.9
	T5	10*10	0.00	0.000	0.9	0.03	72.7	34.4	0.9	1.1

En comparant les modèles mentionnés ci-dessus, avec ceux des deux gisements précédents, on s'attend à avoir des résultats plus proches des résultats de Chierzac. Les variances de la perte au feu, de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B sont assez faibles pour qu'on puisse assurer une précision d'estimation acceptable avec une maille de sondage large.

$$\lambda_{Al_2O_3-b}(h) = 1.60 * Sph(h/25) + 4.22 * Lin(h/100)$$

$$\lambda_{PF}(h) = 0.31 * Sph(h/15) + 1.16 * Lin(h/120)$$

$$\lambda_{Fe_2O_3-b}(h) = 0.009 * Sph(h/20) + 0.008 * Lin(h/200)$$

$$\lambda_{K_2O-b}(h) = 0.059 * Lin(h/60)$$

## Estimation de la qualité des kaolins des gisements du bassin des Charentes

Les résultats sont présentés dans le Tableau V.8. Avec une maille de sondage 40\*40 la précision d'estimation sur la teneur en  $Al_2O_3$  est inférieure à 1.5%. Au stade de T2, on constate une amélioration de 27.3% par rapport à celle de la cellule de base (Maille S3). L'amélioration finale (stade T5) présente 62.4% d'amélioration. Cela veut dire que les 5 sondages supplémentaires primaires portent plus que 40% d'amélioration de la précision par rapport au meilleur cas, pour un total de 81 sondages.

Une maille de sondage de 28\*28 sera largement suffisante pour assurer la précision d'estimation de ces paramètres principaux au dessous d'un niveau acceptable d'évaluation du gisement.

Pour pouvoir comparer les résultats de ces gisements, on calcule la variance d'estimation sur un bloc de base de 80\*80, et un bloc de 40\*40 centrés sur l'origine. A chaque stade, on utilise toutes les données disponibles dans la cellule pour estimer la teneur moyenne du bloc.

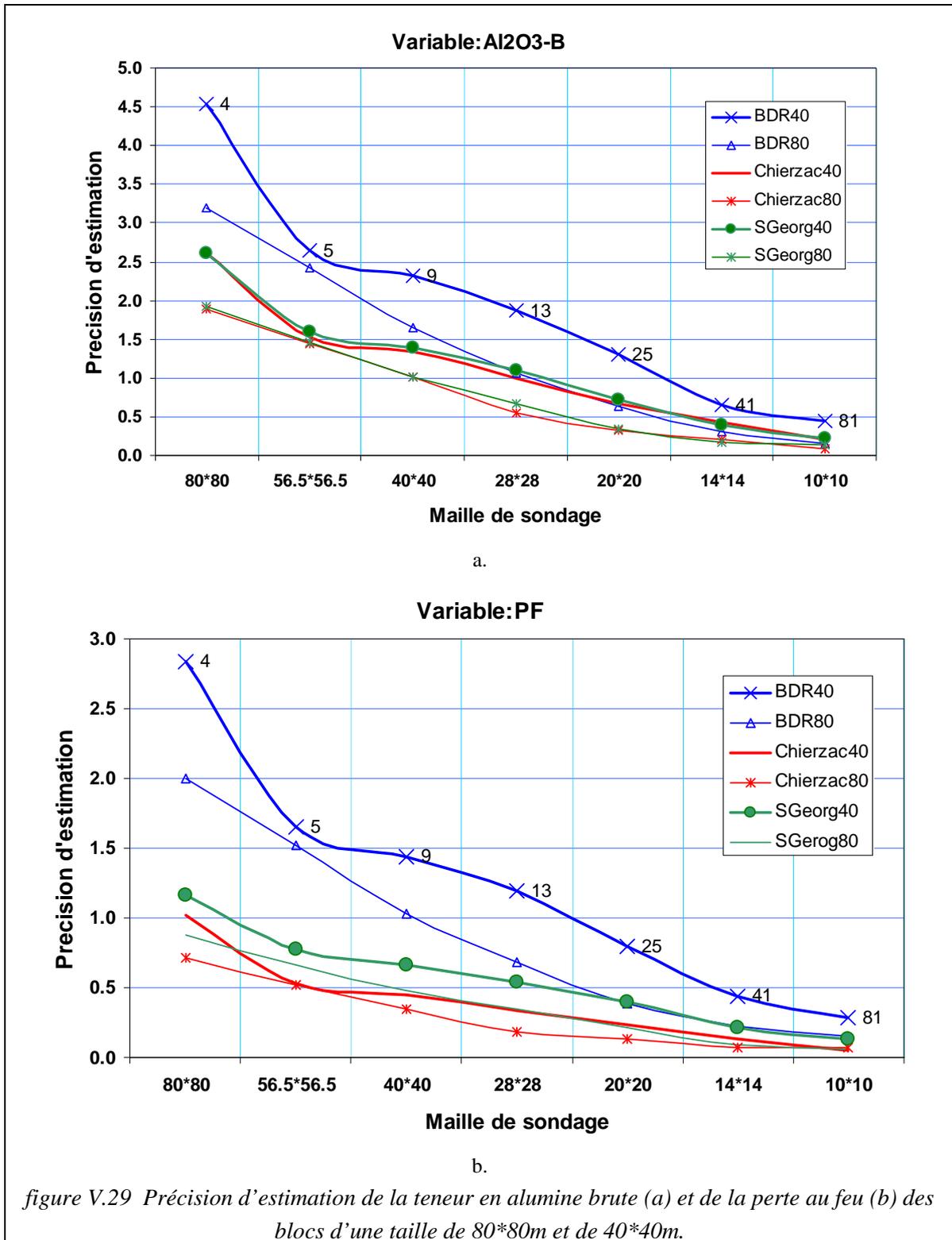
La figure V.29.a montre la précision de l'estimation de la teneur en alumine brute. Pour les blocs les plus grands on s'attendrait à un meilleur gain relatif de précision. La pente de la ligne liant deux étapes successives est un indice de l'efficacité de l'investissement pour avoir des informations supplémentaires. Pour le bloc 40\*40 le fait de forer un sondage au centre de la maille S3 présente un intérêt très important. Pour le bloc de 80\*80 l'amélioration de la précision de l'estimation se révèle plus difficile à faire.

**Tableau V.8 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Saint-Georges.**

Variable	Type	Config.	$\gamma_{vv}$	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(KO)$		95%	Base S3	Par étape	Nombre	Cellule
$Al_2O_3$ -B	S3	80*80	3.26	0.967	19.7	1.93				
	T1	56.5*56.5	2.69	0.686	14.0	1.62	15.8	15.8	15.8	15.8
	T2	40*40	2.20	0.512	10.4	1.40	27.3	13.6	3.4	6.8
	T3	28*28	1.76	0.365	7.5	1.18	38.5	15.5	3.9	3.9
	T4	20*20	1.34	0.260	5.3	1.00	48.2	15.7	1.3	2.0
	T4/T5	14*14	0.98	0.199	4.1	0.88	54.6	12.4	0.8	0.8
	T5	10*10	0.71	0.136	2.8	0.72	62.4	17.3	0.4	0.5
PF	S3	80*80	0.70	0.202	20.8	0.88				
	T1	56.5*56.5	0.58	0.144	14.8	0.74	15.6	15.6	15.6	15.6
	T2	40*40	0.49	0.116	11.9	0.67	24.3	10.3	2.6	5.2
	T3	28*28	0.41	0.098	10.1	0.61	30.3	8.0	2.0	2.0
	T4	20*20	0.34	0.075	7.7	0.54	39.1	12.6	1.1	1.6
	T4/T5	14*14	0.27	0.052	5.3	0.45	49.4	16.9	1.1	1.1
	T5	10*10	0.20	0.041	4.2	0.40	55.0	11.0	0.3	0.3
$Fe_2O_3$ -B	S3	80*80	0.01	0.003	17.0	0.11				
	T1	56.5*56.5	0.01	0.002	14.3	0.10	8.3	8.3	8.3	8.3
	T2	40*40	0.01	0.002	11.0	0.08	19.5	12.2	3.1	6.1
	T3	28*28	0.01	0.002	9.4	0.08	25.5	7.4	1.9	1.9
	T4	20*20	0.01	0.001	7.0	0.07	35.7	13.7	1.1	1.7
	T4/T5	14*14	0.00	0.001	5.7	0.06	42.3	10.2	0.6	0.6
	T5	10*10	0.00	0.001	4.3	0.05	49.8	13.0	0.3	0.4
$K_2O$ -B	S3	80*80	0.04	0.012	20.1	0.22				
	T1	56.5*56.5	0.03	0.005	9.1	0.14	32.7	32.7	32.7	32.7
	T2	40*40	0.02	0.004	6.5	0.12	43.3	15.8	3.9	7.9
	T3	28*28	0.01	0.003	4.4	0.10	53.1	17.2	4.3	4.3
	T4	20*20	0.01	0.002	3.1	0.08	61.0	16.9	1.4	2.1
	T4/T5	14*14	0.01	0.001	2.2	0.07	66.7	14.7	0.9	0.9
	T5	10*10	0.01	0.001	1.6	0.06	72.1	16.2	0.4	0.5

(voir commentaires dans le texte)

En ce qui concerne de la précision sur l'estimation de la teneur en  $Al_2O_3-B$ , le gisement BDR-NE se distingue des gisements de Chierzac et de St Georges qui se comportent d'une façon très similaire. Dans la figure V.29.b, on distingue très bien les courbes de la baisse de la précision de l'estimation de la perte au feu pour ces trois gisements.



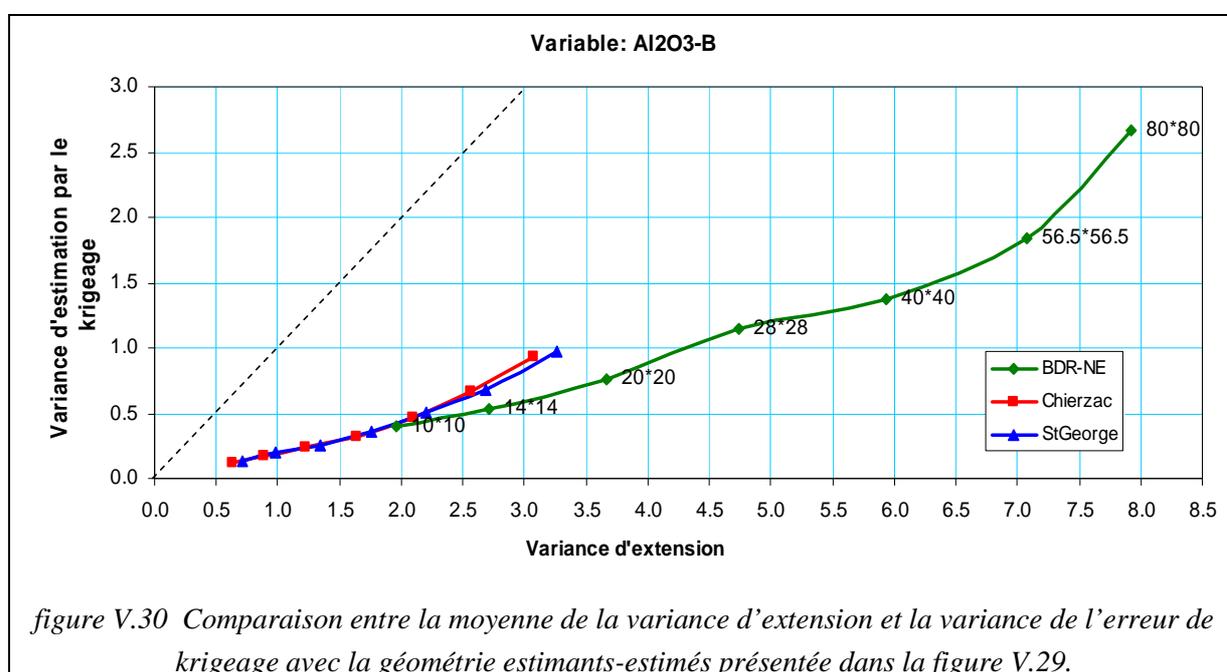
Pour définir la taille optimale de la maille de sondage en vue d'assurer une erreur d'estimation inférieure à une limite souhaitée, l'étude de la structure spatiale est nécessaire. L'étude variographique, à la fin de chaque phase de forage, permet d'examiner la nécessité du passage à une maille de sondage plus

serrée. Cette étude montre qu'une maille de sondage de 40\*40 sera suffisante pour les gisements les plus continus tels que Chierzac et St. Georges, tandis que pour le Bois des Rentes la maille de sondage doit être plus serrée (au moins 20\*20).

### V.3.3. Comparaison du krigeage avec la méthode du plus proche voisin (PPV)

Dans la méthode du plus proche voisin, on étend la valeur d'un point échantillonné situé à l'intérieur d'un bloc à la totalité du bloc, en tant que valeur moyenne du bloc. Dans le cas de l'échantillonnage sur une maille régulière cette méthode correspond à la méthode du polygone d'influence.

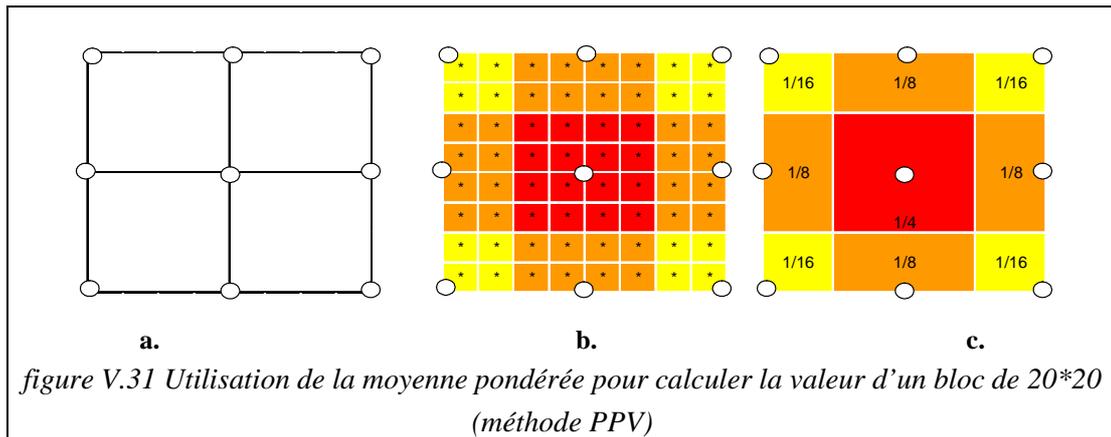
Théoriquement, on peut comparer ces deux méthodes du point de vue de la précision de l'estimation. Si le positionnement du point dont on étend la valeur au bloc est aléatoire, alors la moyenne de la variance d'extension coïncide avec la moyenne du variogramme sur le bloc ( $\gamma_{vv}$ ). Ainsi on peut comparer deux méthodes en connaissant la fonction d'auto-corrélation et la géométrie des estimants-estimés.



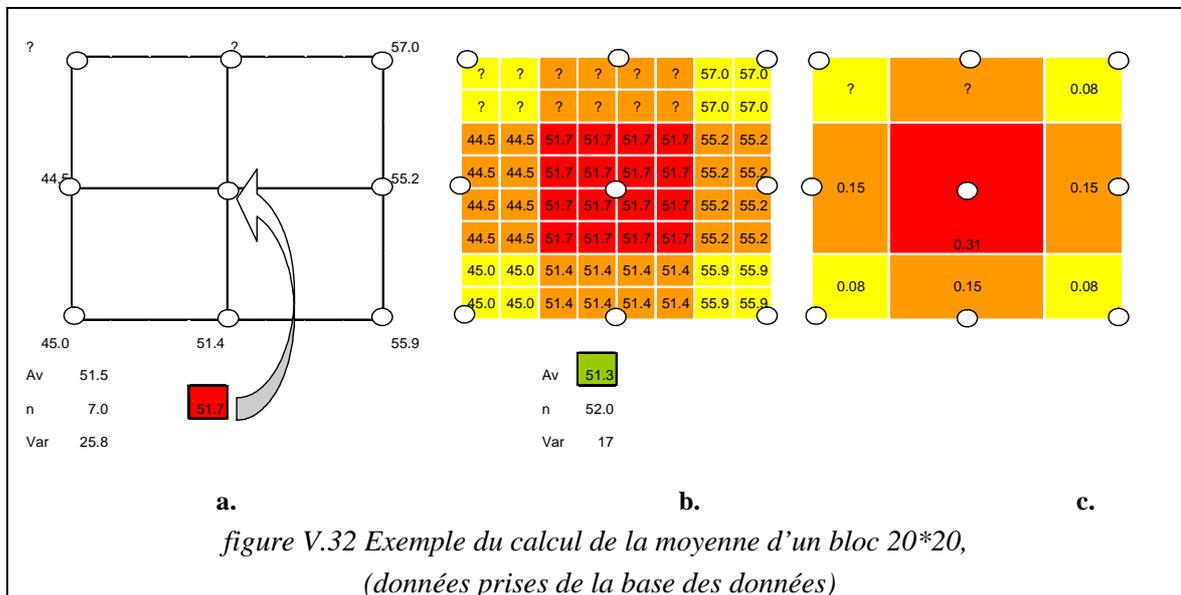
Dans cette partie, on essaie de comparer le krigeage avec la méthode du plus proche voisin. On sait maintenant que le fait de donner la valeur de l'échantillon à un volume comme un bloc doit être accompagné par une variance de l'erreur, qu'on a appelé « la variance d'extension ». En utilisant la moyenne de n échantillons dans le volume comme sa valeur, on divise la variance d'extension par n. Mais dans le cas actuel on aura au maximum un échantillon dans chaque bloc, et la variance de cette méthode sera égale à la variance dans chaque bloc qui est la moyenne du variogramme entre tous les points de bloc ( $\gamma_{vv}$ ).

On cherche un estimateur idéal, dans lequel la valeur estimée de chaque bloc soit égale à sa vraie valeur, mais on n'aura de valeur vraie de bloc qu'après l'exploitation du bloc (et son analyse). Dans cette étude, on utilise une approximation de la valeur vraie de bloc.

L'idée de cet exercice est d'estimer la valeur par les données situées sur une maille de 20\*20 et les comparer avec une moyenne pondérée des données de maille de 10\*10. La figure V.31 explique la manière de calculer la valeur prise comme valeur vraie de bloc. Ensuite, chaque bloc sera estimé par la méthode PPV, grâce au point central du bloc.



La figure V.32 illustre le calcul de la moyenne de bloc par les données extraites de la base des sondages



Pour mieux connaître la zone du sud-ouest du gisement BDR, une série de sondages sur une maille de 10m a été faite en 3 à 4 étapes successives (3m pour chaque étape). Le plan d'implantation des sondages est présenté dans la figure V.33. Les sondages de chaque étape ne sont pas exactement calés sur l'endroit des sondages de l'étape précédente et ont été enregistrés individuellement avec leur propre nom de sondage. Ce décalage entre les carottes échantillonnées aux différentes étapes cause certaines lacunes verticales. Par ailleurs, les niveaux communs sont doublement échantillonnés. Cette irrégularité rend plus difficile le traitement numérique des données, une maille régulière virtuelle a été calée sur ces sondages et les échantillons ont été repositionnés par rapport à cette maille régulière.

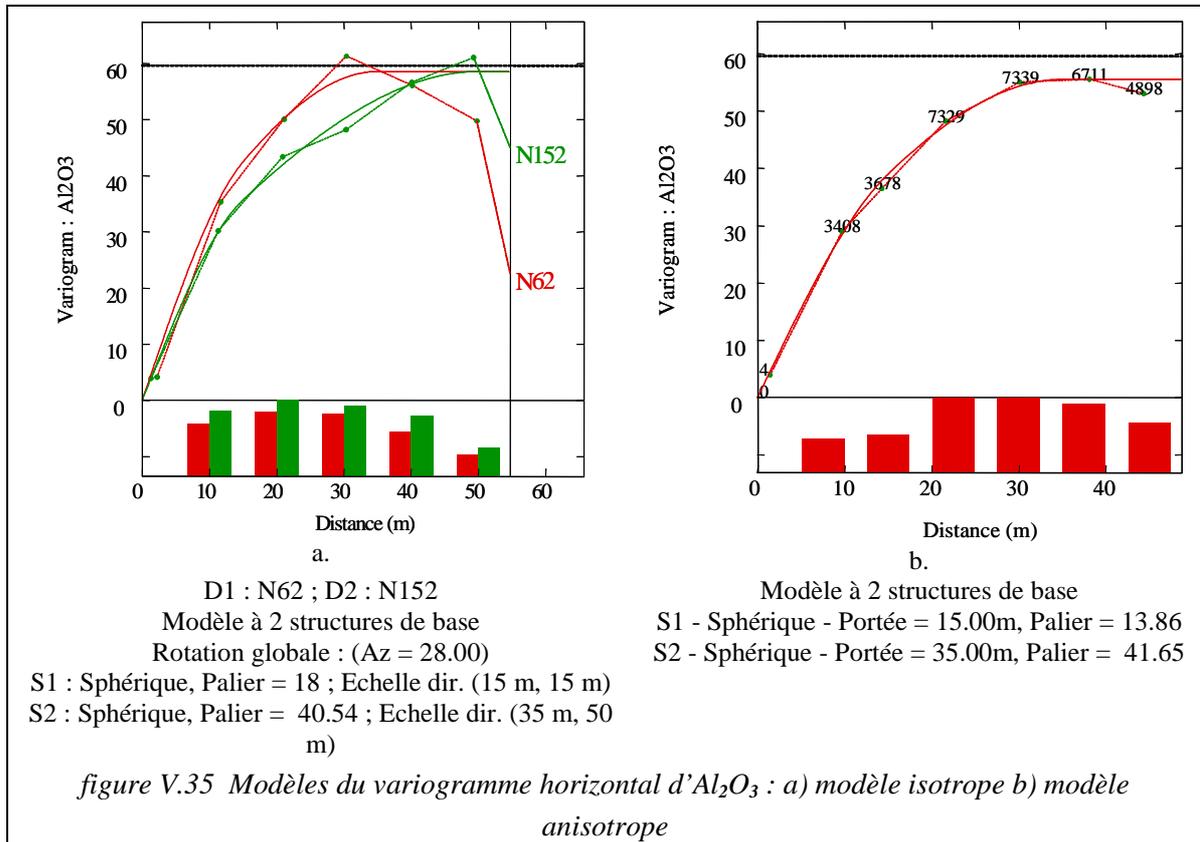
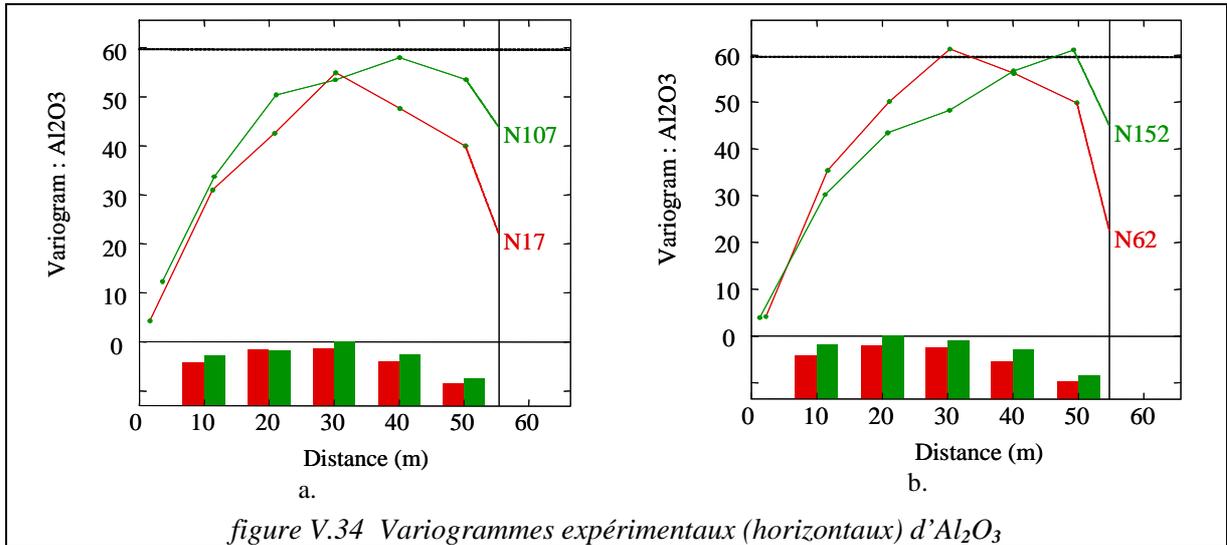
Du fait des problèmes d'échantillonnage déjà mentionnés, et compte tenu du temps limité par des impératifs de thèse, on va travailler sur les segments d'une longueur d'un demi-mètre. La régularisation automatique des échantillons, et la gestion des lacunes seront très compliquées.

### V.3.3.1. Variogrammes expérimentaux

L'étude de la variographie sur les segments montre une légère anisotropie géométrique dans différentes directions horizontales. Le rapport d'anisotropie le plus important est entre les directions N62 et N152. La figure V.34 montre les variogrammes horizontaux anisotropes dans les directions N17 et



(tolérance verticale : 0.25m), mais pour le variogramme anisotrope, un balayage de l'espace est utilisé (tolérance angulaire : 45° et distance maximum à l'axe égale à 20m).



On peut résumer la composition des variogramme par les équations suivantes :

Modèle isotrope

$$\gamma(h) = 13.86 * \text{Sph.}(15) + 41.65 * \text{Sph.}(35)$$

Modèle anisotrope

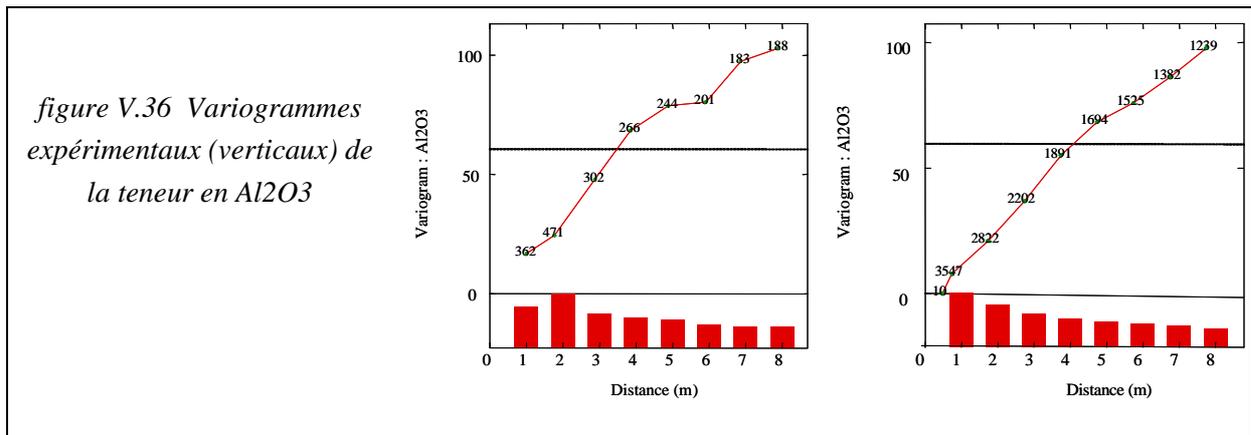
$$\gamma(h) = 18 * \text{Sph.}(15, 15) + 40.54 * \text{Sph.}(35, 50)$$

Les variations à faible distance, inférieure à 15m, représentent presque un tiers de la variation totale. La portée la plus grande est d'environ 35m. On n'a pas d'effet de pépète, ce qui témoigne d'un changement apparemment graduel de la teneur.

### V.3.3.3. Variogramme vertical

La figure V.36 compare le variogramme vertical calculé avec les données brutes (a) et le variogramme qu'on a calculé avec les données des segments, on constate le remplacement de la forme de la courbe du variogramme des données brutes, par une forme plus lisse (quasiment linéaire). On a déjà averti le lecteur de cet effet du lissage sur la variance des données. Cet effet sera accentué sur les valeurs du variogramme aux distances plus petites que la longueur réelle des carottes.

On remarque une anisotropie de structure en observant les variogrammes horizontaux, bornés à une valeur inférieure à la variance totale, et la forme du variogramme vertical (figure V.36). Ce variogramme n'est pas un variogramme stationnaire, mais on reste dans le cas de la stationnarité d'ordre 2. La non-stationnarité de la moyenne sur le variogramme vertical révèle des structures spatiales non-bornées (l'existence d'une portée très grande peut également produire une telle tendance).



### V.3.3.4. Modèle du variogramme en 3D

On peut résumer la formule du modèle de variogramme gigogne par l'équation suivante :

$$\gamma(h) = 13 * \text{Sph.}(15, 15, 5) + 41 * \text{Sph.}(30, 55, 10) + 20 * \text{Lin.}(200, 200, 3)$$

Les chiffres dans les parenthèses, sont les portées du variogramme dans la direction N152, N62 et dans la direction verticale. Un modèle linéaire a été introduit pour modéliser l'isotropie zonale (dans ce cas, le « palier » est simplement le valeur du variogramme lorsque la distance est égale à la « portée »).

La portée de 10m pour le deuxième variogramme sphérique montre une structure spatiale très intéressante, qui peut être en relation avec les chenaux très profonds dans cette zone du gisement.

Le modèle de variogramme isotrope horizontalement peut être décrit par l'équation suivante :

$$\gamma(h) = 13 * \text{Sph.}(15, 5) + 41 * \text{Sph.}(35, 10) + 20 * \text{Lin.}(200, 3)$$

où les nombres entre parenthèses donnent la portée horizontale et la portée verticale.

### V.3.3.5. Exemple de poids du krigeage pour le modèle en 3D

A titre d'exemple, on a choisi l'estimation d'un bloc de 10m\*10m\*0.5m à partir de 11 échantillons ponctuels : 8 échantillons au centre des voisins de même dimension sur le même niveau, l'échantillon central et deux échantillons à une distance verticale d'un mètre du centre du bloc estimé.

La figure V.37 montre la géométrie de l'espace d'estimation, et les tableaux des poids de krigeage, le point central porte 47% du poids total, chacun des deux voisins verticaux est affecté d'une portion d'un peu plus de 9% (valeurs arrondies), chacun des quatre points sur les axes presque 8% tandis que les 4 points les plus éloignés du bloc estimé représentent ensemble seulement 4% de l'estimation. Le rapport d'anisotropie n'est pas très fort aux faibles distances. C'est pourquoi, les poids des points situés à une distance de 10m du centre de bloc ne sont pas sensiblement différents.

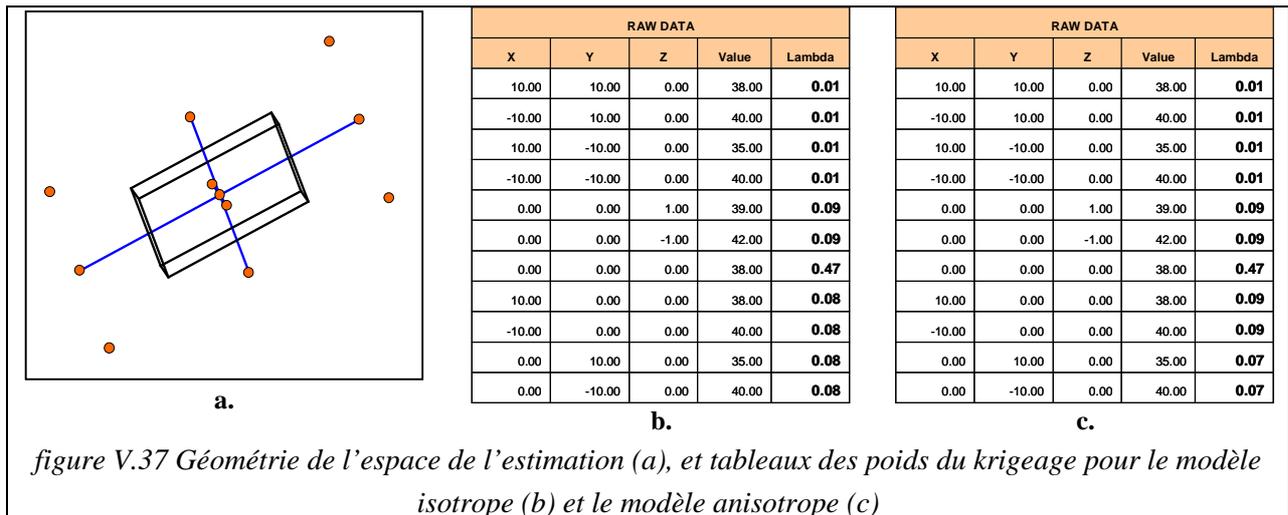


figure V.37 Géométrie de l'espace de l'estimation (a), et tableaux des poids du krigeage pour le modèle isotrope (b) et le modèle anisotrope (c)

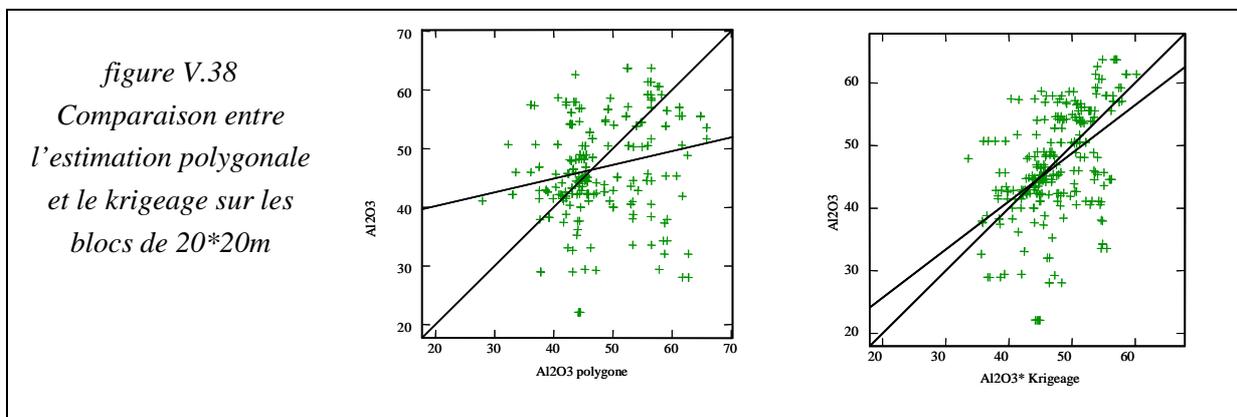
On aperçoit que les deux points voisins sur l'axe z, ont presque la même importance que les points sur les sondages voisins. L'écart-type de l'erreur d'estimation du modèle anisotrope (la racine carrée de la variance de krigeage) est légèrement plus faible que celui du modèle isotrope (0.95 et 0.97).

La valeur moyenne est 51.3%. La teneur d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> du point central est égale à 51.7%, la valeur estimée du même bloc par le krigeage sera égale à 51.41%. La variance d'extension est 28.54 et la variance de l'erreur d'estimation est de 4.41 (%<sup>2</sup>).

On réalise une estimation plus généralement de la façon suivante :

Pour le krigeage on utilise les données sur une maille de 20\*20, situées aux sommets des blocs. Seules les données situées sur les nœuds d'une maille de 20\*20 qui constituent les limites des blocs seront utilisées dans l'estimation par krigeage. La méthode PPV aura l'avantage de la participation dans le calcul de la valeur vraie (25%), en revanche on impose au minimum 4 points au voisinage pour l'estimation par krigeage (aucune de ces données n'a été utilisée pour le calcul de la vraie valeur des blocs).

Le résultat de cette estimation est présenté dans la figure V.38. La bissecteur présente l'estimateur idéal dans lequel l'estimé est égal à la vraie valeur. La ligne de régression pour chaque cas a été tracée. On constate que la pente de la ligne de tendance pour le cas d'extension de l'échantillon du sondage central est très faible et très loin d'être égale à 1. En revanche malgré la dispersion des points, la ligne de tendance pour le cas de krigeage est très proche de la ligne du bissecteur représentant l'estimateur idéal. Le coefficient de corrélation entre la teneur d'échantillon situé à l'intérieur du bloc et la valeur supposée comme la moyenne du bloc est très faible et d'environ 0.24. Ce coefficient dans le cas du krigeage n'est pas très fort, mais en comparaison avec la méthode précédente, on constate une amélioration très importante, le coefficient de corrélation est d'environ 0.47.



## V.4. Gisement Bois des Rentes (BDR)

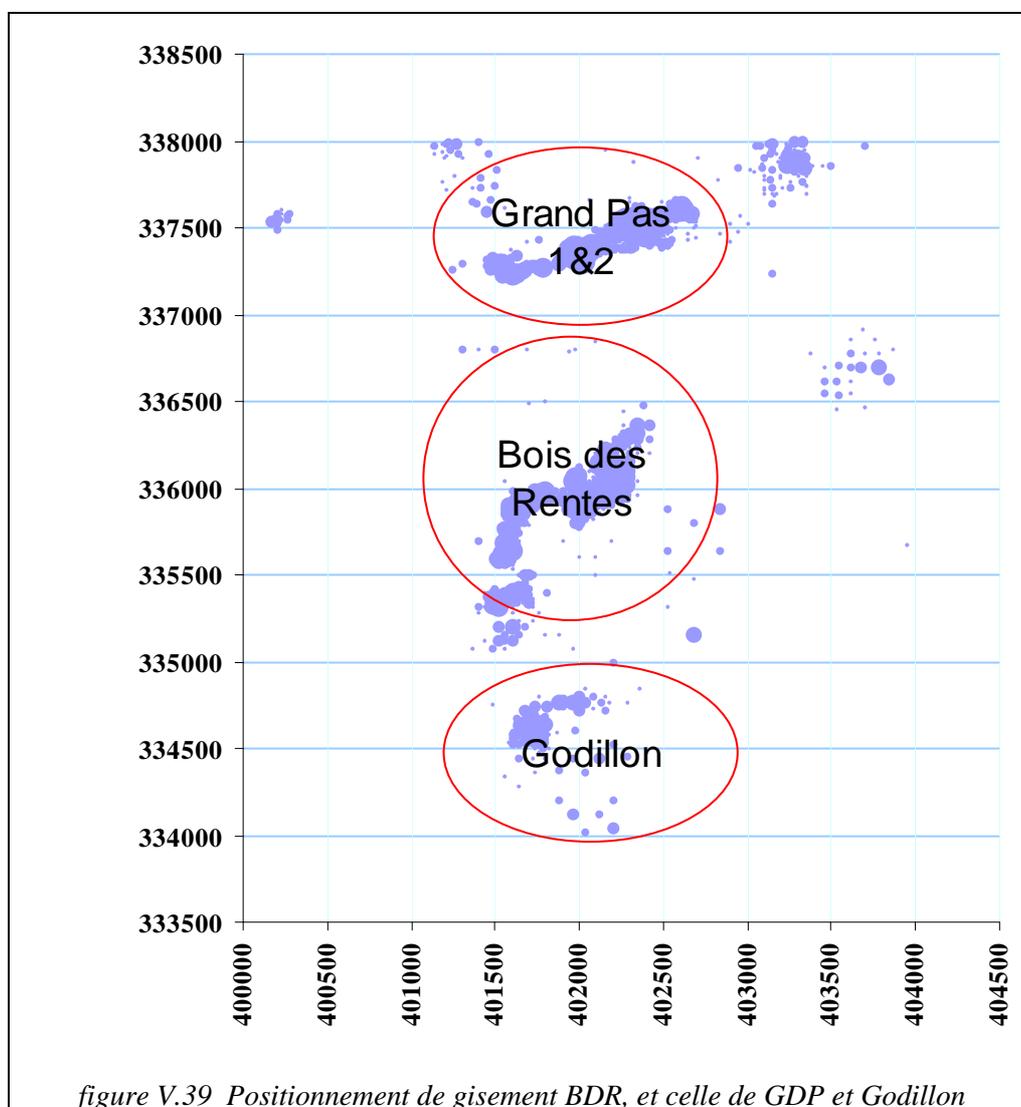
Une grande partie des études a été concentrée sur le gisement de Bois des Rentes, ce gisement est un des plus grands gisements en exploitation d'AGS. Le gisement de BDR est particulièrement riche en argile hyperalumineuse.

### V.4.1. Présentation du gisement

#### V.4.1.1. Localisation géographique

Le gisement kaolinique Bois des Rentes (on l'appelle BDR) est situé dans le bassin sédimentaire des Charentes. Ce gisement n'est pas très loin de l'usine de traitement de Clérac (déchiquetage, mélange, production de chamotte) et de l'usine d'Orillon.

Ce gisement se trouve au sud de deux grandes carrières en extraction d'AGS nommées Grand Pas 1 et Grand Pas 2 (GDP1, GDP2) et au nord de l'ancienne carrière de Godillon (figure V.39).



### V.4.1.2. Sondages de BDR

La forme géométrique du gisement de BDR a été imposée par l'architecture de la sédimentation du flux, avec des petits méandres. Pour cette étude on a choisi un cadre pour définir l'espace de travail. Dans ce cadre, on dénombre plus de 500 sondages : la maille de sondage est plus régulière dans la partie Nord-est du gisement (distance de 40m), tandis que dans secteur Sud-ouest, à cause de la forme chenalisée du gisement, la maille est plus serrée et moins régulière (la distance entre les sondages varie entre 15 et 20 m)

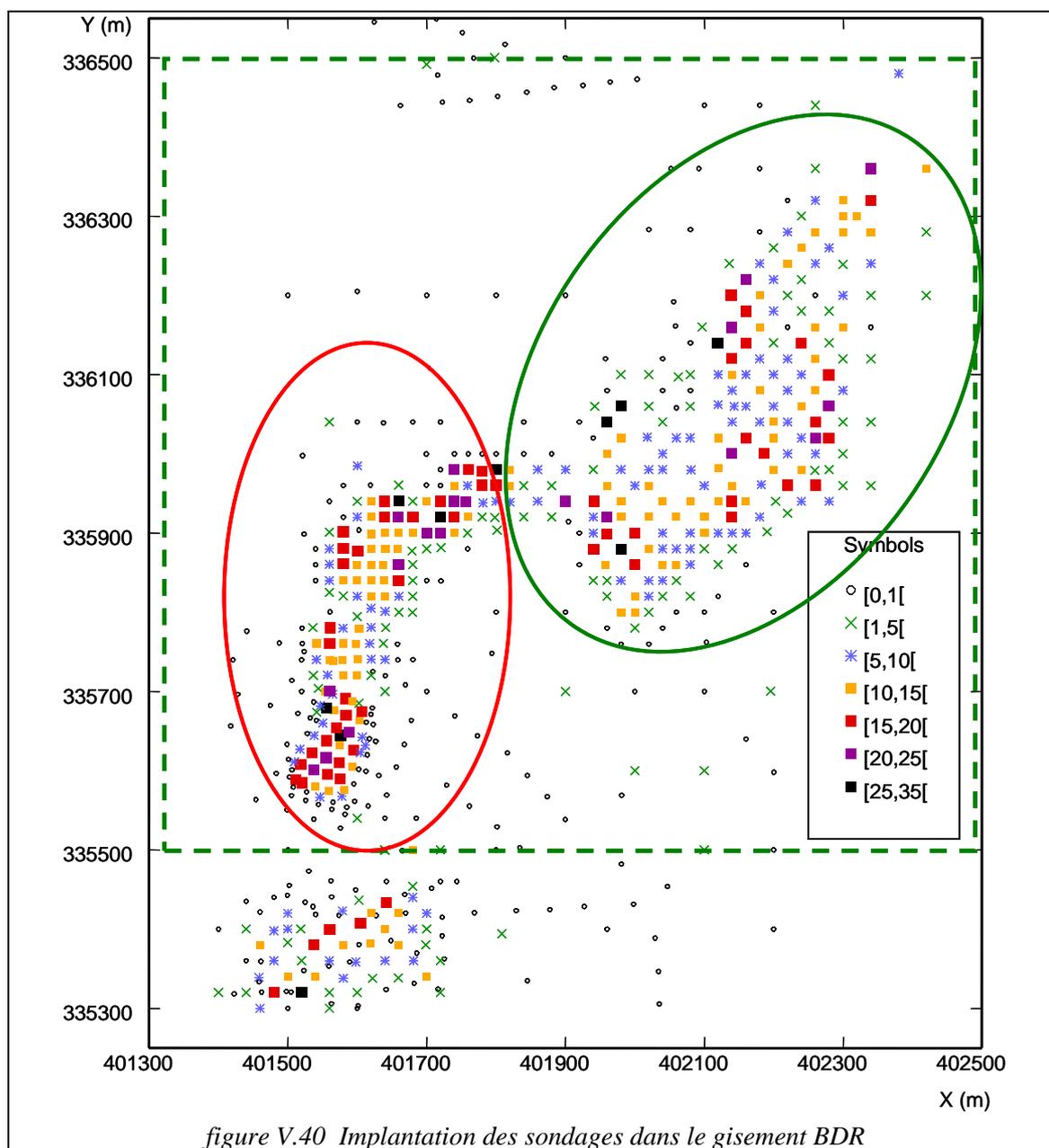


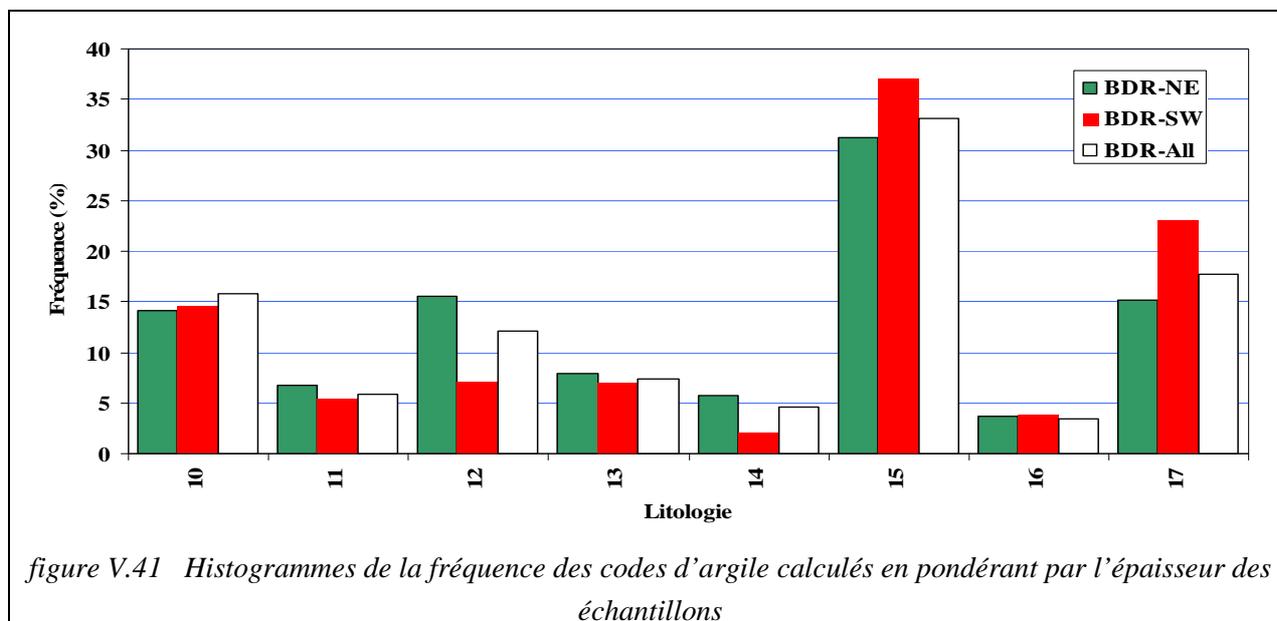
figure V.40 Implantation des sondages dans le gisement BDR

Dans la figure V.40, la somme de l'épaisseur totale de l'argile classée comme argile par AGS dans chaque sondage a été représenté par un symbole. Le cadre montre la zone de travail.

Certains sondages sont assez profonds pour toucher le socle calcaire massif, d'autres sondages ont été arrêtés dans le sable. Il y a des cas très rares où le sondage n'est pas assez profond.

### V.4.1.3. Description des unités lithologiques

Les faciès lithologiques sont présentés d'une manière descriptive dans le deuxième chapitre. La figure V.41 représente l'histogramme de la fréquence des différentes argiles kaoliniques dans le gisement BDR. On peut comparer leur fréquence dans la partie Sud-Ouest du gisement avec celle du Nord-Est du gisement. La fréquence des argiles de code 15 et 17 (argiles grasses et pierreuses) est sensiblement plus importante dans la partie Sud-Ouest du gisement, tandis que pour l'argile demi grasse à grain (de code 12), le gisement BDR-NE se révèle plus riche.



### V.4.1.4. Analyse statistique des données

Pour avoir une vision statistique des variables, on présente ici, brièvement, certains de leurs paramètres statistiques. On peut comparer les histogrammes d' $Al_2O_3$  et de PF (Perte au Feu) dans la totalité du gisement avec les deux sous domaines au Nord-Est et au Sud-Ouest du gisement, dans la figure V.42 (remarque : l'échelle de l'axe vertical des histogrammes n'est pas identique). Le Tableau V.9 résume les paramètres statistiques des variables les plus importantes.

On constate que les échantillons riches en  $Al_2O_3$  et en PF sont plus fréquents dans le Sud-Ouest de BDR. Cela confirme la tendance de la formation des argiles hyperalumineuses dans les parties chenalisées du gisement. Les histogrammes des deux variables sont très asymétriques. L'écart important entre les valeurs des échantillons très riches et celles des échantillons pauvres, aura un rôle décisif sur la forme du variogramme. Les données apparaissent plus dispersées dans le cas de la partie Sud-Ouest du gisement, et leur distribution présente un écart type plus important que celle des valeurs de la partie Nord-Est.

La forme bimodale est visible surtout pour l'histogramme de l'alumine calcinée de la partie Sud-Ouest du gisement. L'étude détaillée de la zone septentrionale de cette partie, qui a été récemment échantillonnée sur une maille de 10\*10 m, montre la présence probable de trois populations statistiques différentes. On a essayé de l'ajuster par trois distributions gaussiennes, la méthode des moindres carrés de la fréquence des classes a été utilisée comme critère d'ajustement.

Tableau V.9 Paramètres statistiques des éléments chimiques les plus importants

Domaine	Variable	N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Sud-ouest	PF	1915	6.10	61.40	15.76	5.2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1915	23.38	76.48	44.56	7.18
	TiO <sub>2</sub>	1915	0.44	4.52	1.26	0.37
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1915	0.01	12.32	1.22	0.72
	K <sub>2</sub> O	1817	0.01	2.04	0.55	0.5
	Epaisseur	1915	0.5	8.5	1.65	1.06
Nord-est	PF	1865	7.75	43.83	13.98	2.87
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1865	24.20	66.90	42.77	5.37
	TiO <sub>2</sub>	1865	0.68	5.30	1.38	0.43
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1865	0.29	13.32	1.34	0.79
	K <sub>2</sub> O	1865	0.01	2.44	0.63	0.49
	Epaisseur	1865	0.5	3.0	1.26	0.52
Total	PF	3793	6.10	61.40	15.00	4.55
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3789	23.38	76.48	43.75	6.50
	TiO <sub>2</sub>	3790	0.44	5.3	1.31	0.40
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3790	0.01	13.32	1.28	0.76
	K <sub>2</sub> O	3692	0.01	2.44	0.59	0.50

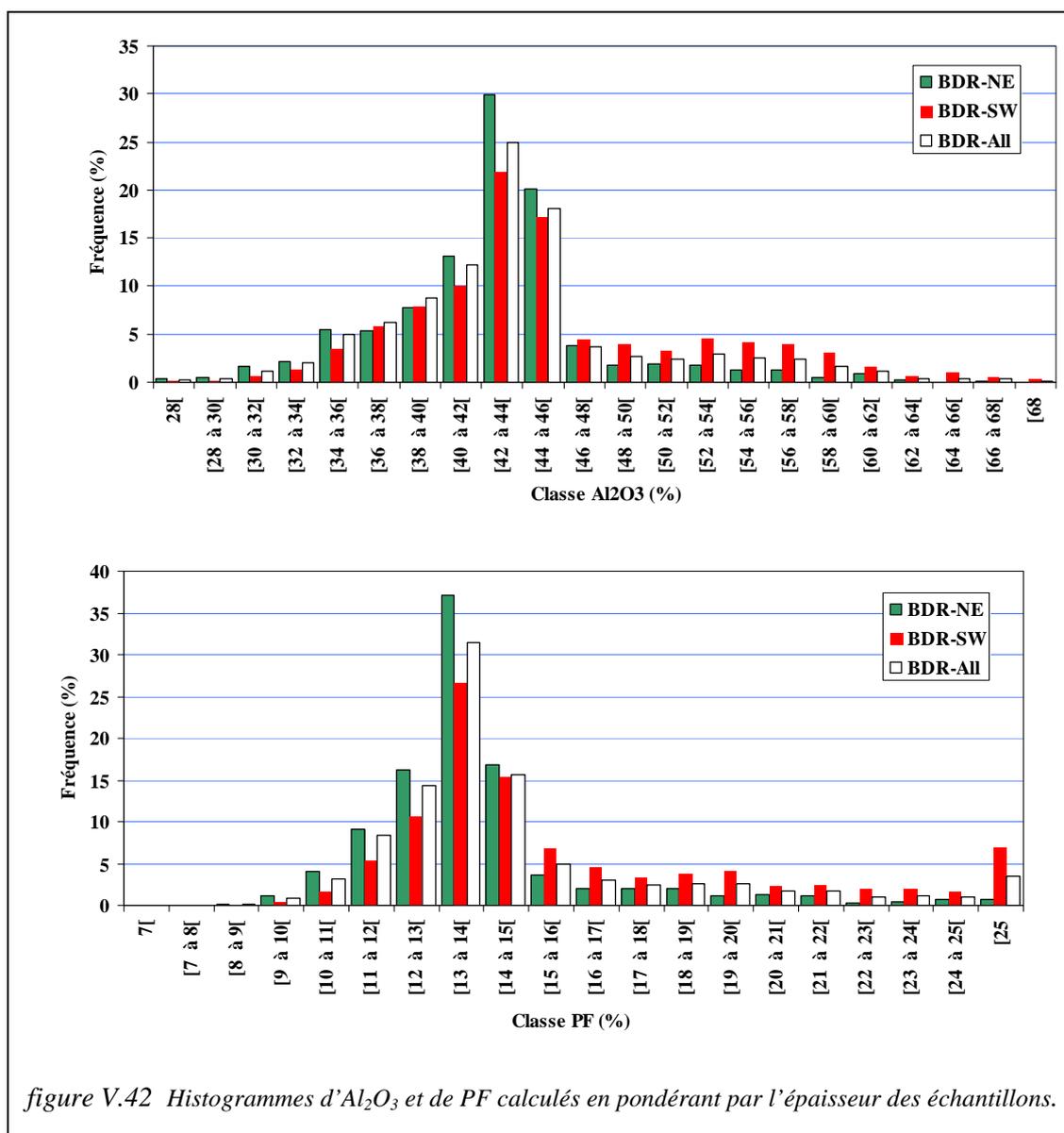
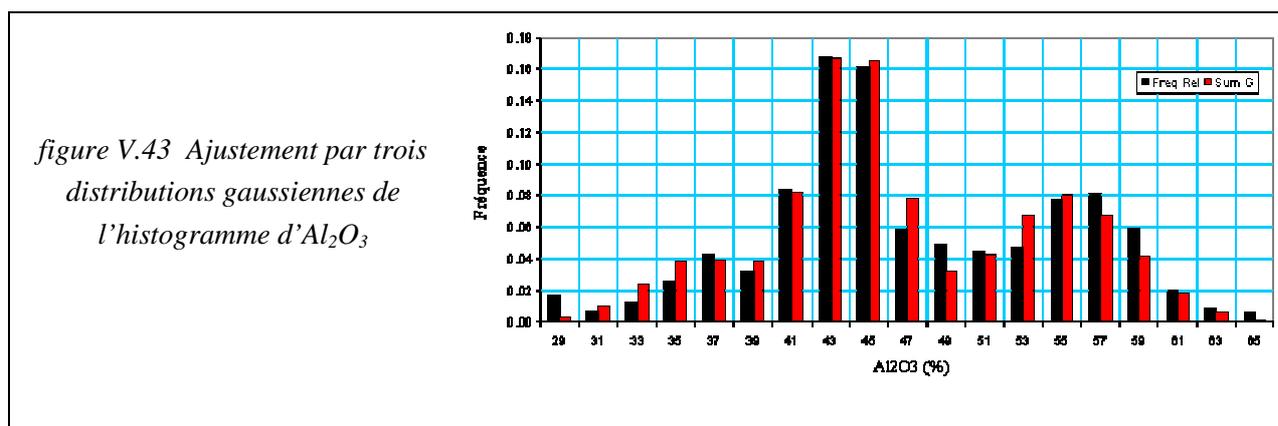


figure V.42 Histogrammes d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de PF calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.

La figure V.43 compare l'histogramme des données (pondérées par leurs épaisseurs) avec l'histogramme du modèle, on présente ici le modèle en termes mathématiques comme la combinaison linéaire suivante :

$X_i = 0.15 * G_1(36, 3.0) + 0.50 * G_2(44, 2.2) + 0.35 * G_3(55, 3.5)$ , où  $G_1, G_2$  et  $G_3$  sont trois lois de gauss et le premier chiffre dans la parenthèse présente la moyenne et le deuxième est l'écart type.

En général ce genre de distribution indique la présence de phénomènes différents qui peuvent être très distincts dans l'espace. On aura des zones riches et des zones pauvres très bien séparées dans l'espace (dans le gisement), mais cela ne signifie pas toujours que l'on saura différencier ces zones dans le gisement.



Comme on a vu dans le chapitre précédent, les argiles riches en alumine sont très pauvres en oxyde de fer et de potassium. La comparaison entre les histogrammes de l'oxyde de fer (figure V.44) et la potasse mesurée sur les échantillons confirme cette hypothèse. Cette tendance de corrélation inverse de teneurs entre la teneur en argile, et la teneur en potasse, est plus nette pour le cas de la potasse. (figure V.45).

La différence des histogrammes de TiO<sub>2</sub> dans les deux sous domaines n'est pas significative. La figure V.46 présente le nuage de dispersion de la teneur en alumine brute en fonction de la teneur en alumine calcinée (mesurée par la fluorescence de rayon X), dans le gisement de BDR. En premier lieu, on constate que la relation entre ces deux variables n'est pas linéaire. La valeur d'alumine brute est calculée en utilisant la PF et la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dans ce qui suit, pour éviter des confusions, on note les variables en état calciné présentées sous la forme « variable-C » ou le nom de variable tout court, et les variables brutes sont toujours présentées sous la forme « variable-B ».

On revient sur ce sujet, ci-après, dans le paragraphe concernant les problèmes d'estimation.

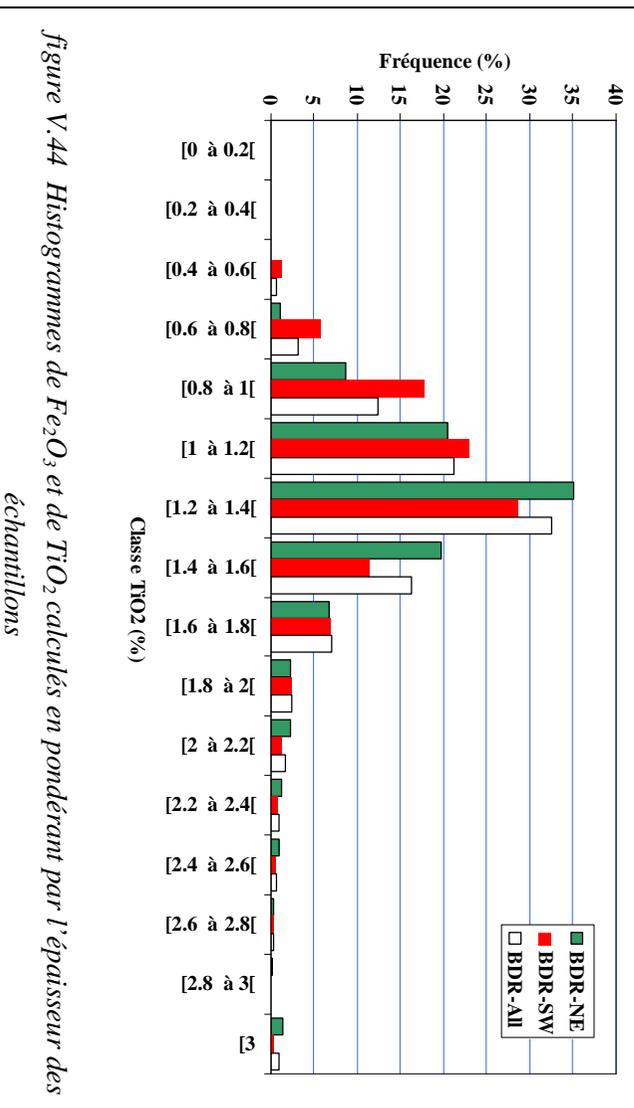
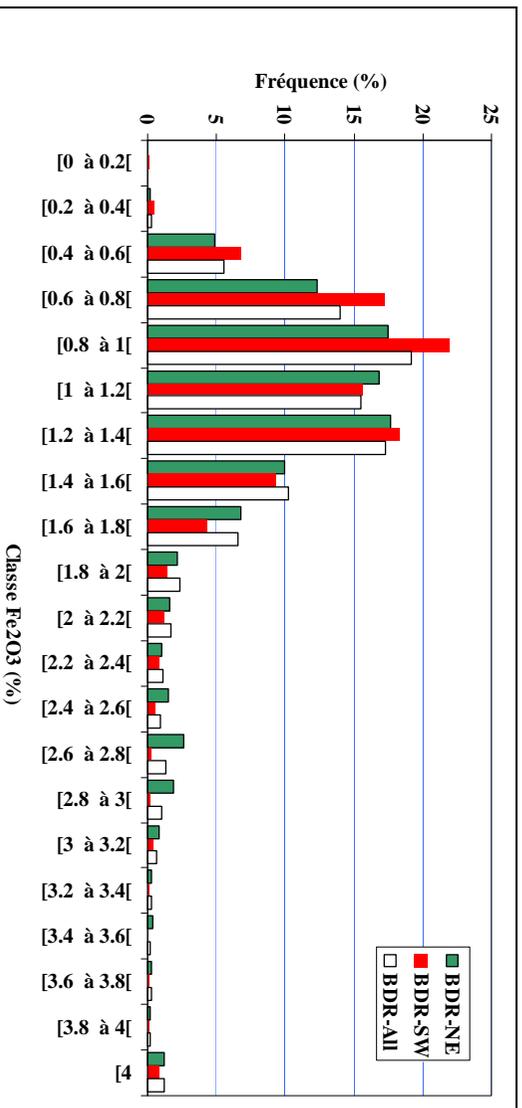


figure V.44 Histogrammes de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de TiO<sub>2</sub> calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons

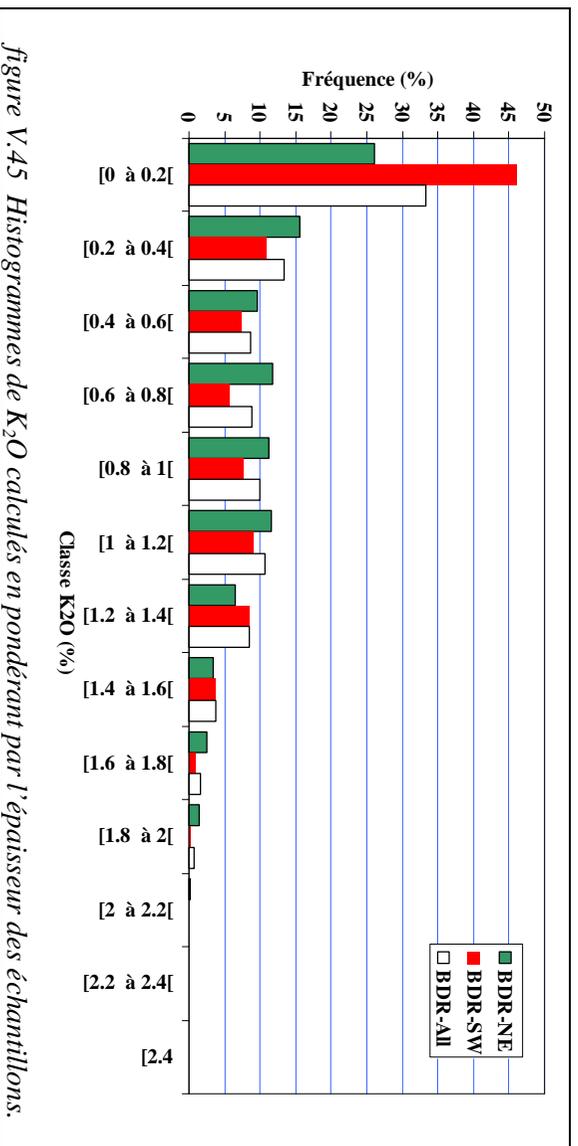
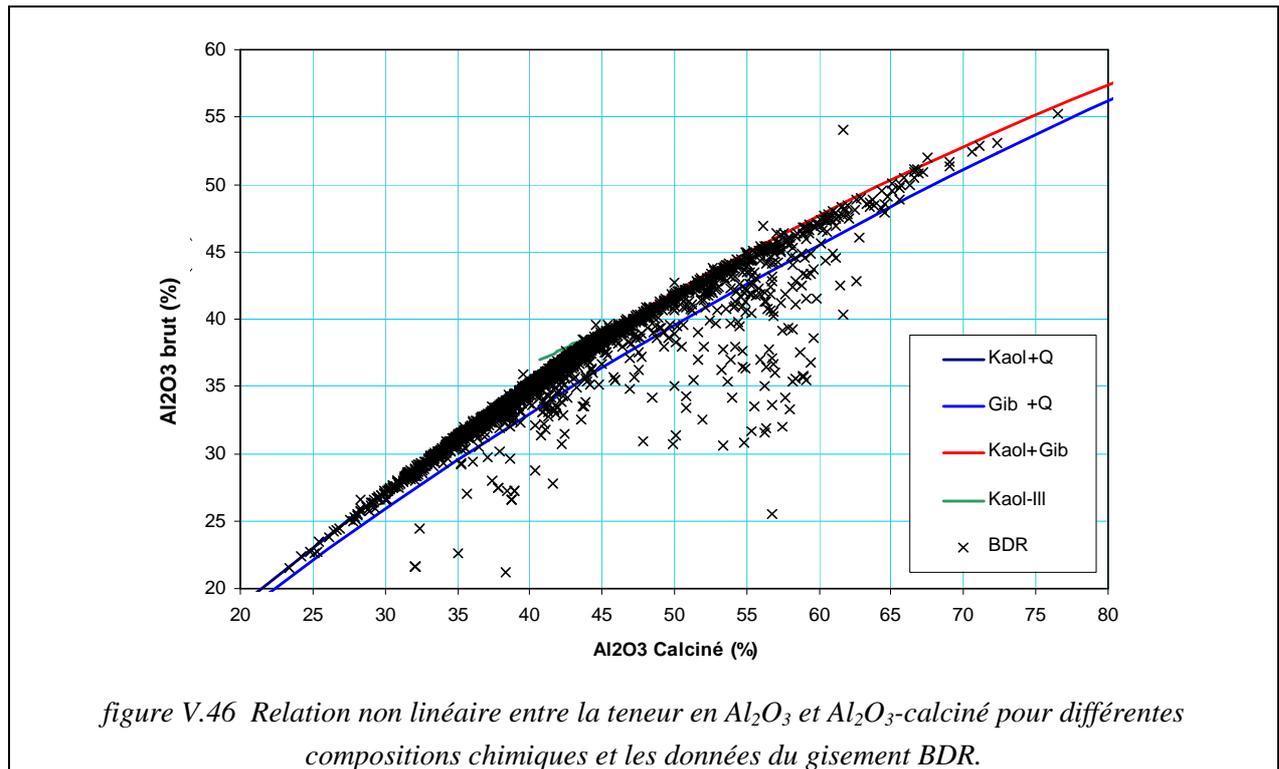
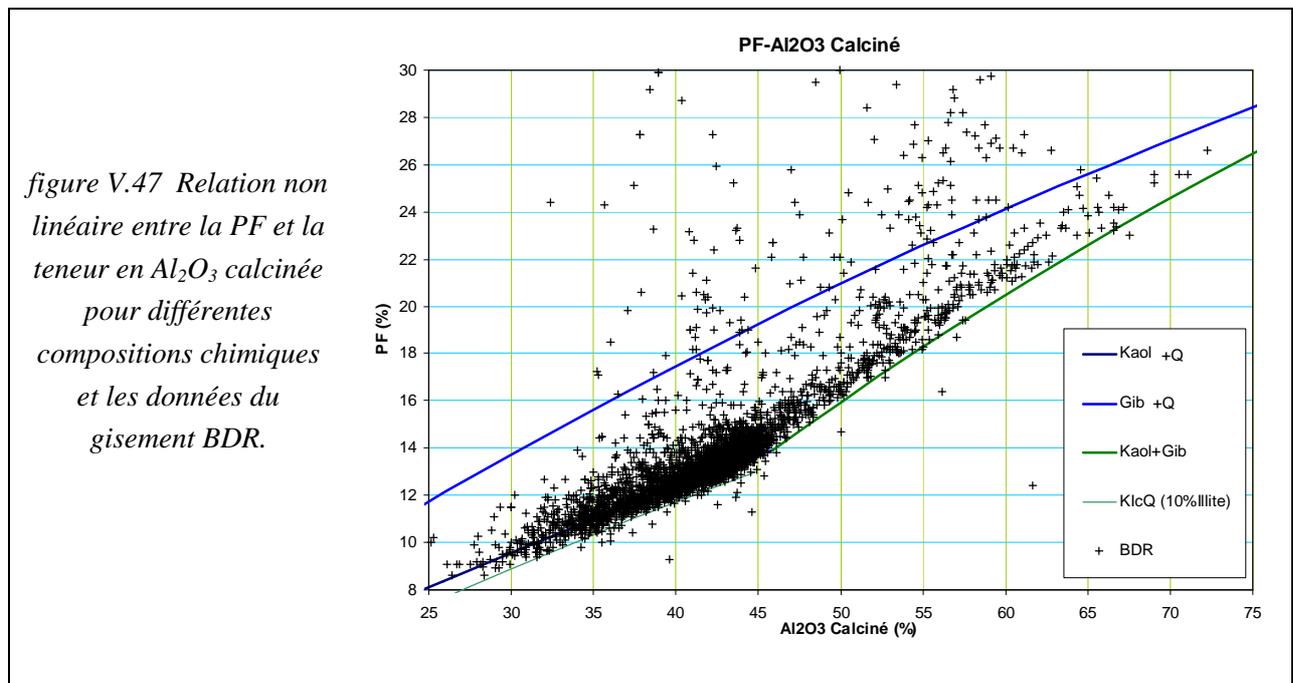


figure V.45 Histogrammes de K<sub>2</sub>O calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.



La figure V.47 montre la relation entre le contenu de la PF des échantillons en fonction de leur teneur mesurée en alumine (alumine calcinée). Les différentes compositions minéralogiques théoriques sont présentées. On constate un nuage de points autour de la ligne caractérisant une composition du kaolin-quartz. En remplaçant 10% de kaolin par 10% d'illite, on aura une composition avec une valeur plus faible de la perte au feu en comparaison avec la composition kaolinite-quartz de même contenu en alumine.



Cela peut être utilisé pour expliquer la présence des points au dessous de la ligne de composition kaolin-quartz. La présence des matières organiques explique en partie, l'écart de la PF des points situés au dessus de la ligne avec la composition théorique.

Dès 45-46% d'alumine (la valeur stœchiométrique de la kaolinite) la pente change et le rapport de PF à  $Al_2O_3$  augmente. Les points qui se situent au dessous de la ligne présentant la composition kaolinite-gibbsite sont très rares. Pour les trois points les plus écartés de la ligne, on suppose qu'il existe une erreur d'analyse ou de saisie des données.

La majorité des points restent au dessus de la ligne. Cela est expliqué, dans plus part des cas, par la présence de traces organiques dans les échantillons.

### V.4.2. Estimation de la puissance et des accumulations

Un cas particulier de régularisation est la montée de la Variable Régionalisée. La montée (d'ordre 1) d'une Variable Régionalisée, dans une direction, consiste à prendre l'intégrale de cette Variable Régionalisée le long de cette direction. On définit de la sorte une nouvelle Variable Régionalisée, dans un espace possédant une dimension de moins. Incidemment, remarquons que cette opération n'a rien ni de mystérieux, ni d'exceptionnel : elle correspond en particulier à l'opération, courante en estimation minière, de calcul d'accumulation.

#### V.4.2.1. Introduction

L'accumulation le long d'un forage vertical est le produit de l'épaisseur de minerai par la moyenne de la teneur du minerai dans le forage, elle représente une quantité de métal par unité de surface (Chilès et Delfiner, 1999).

Dans le domaine minier, pour obtenir des estimations, on utilise l'accumulation des teneurs. Cette méthode permet de se ramener à une étude dans un espace 2D et de réduire considérablement le calcul numérique.

Plusieurs problèmes 3D peuvent être simplifiés en des problèmes 2D. C'est le cas notamment de gisements se présentant sous la forme de veines minces. Habituellement on travaille alors avec l'accumulation de métal (produit épaisseur x teneur) et l'épaisseur de la veine qui sont 2 variables additives (alors que la teneur ne l'est pas dans ce cas). On obtient la teneur estimée par division de l'accumulation estimée par l'épaisseur estimée. Certains praticiens préfèrent toutefois travailler avec la teneur directement même si celle-ci n'est pas additive. Par additif, on entend que la valeur de la variable sur une zone est donnée par la moyenne des valeurs des sondages de la zone. Si l'épaisseur d'une veine varie alors la teneur pour une portion du gisement n'est plus égale à la teneur moyenne des sondages correspondants mais plutôt à une moyenne pondérée par les épaisseurs (Marcotte, Cours en ligne).

Dans certains cas, l'utilisation de la variable accumulation semble préférable, à celle de la variable teneur. Par exemple dans le cas de minéralisations en veines minces, le corps minéralisé est bien défini et la variation verticale de la teneur n'est pas très importante pendant l'exploitation. Normalement le stérile est très pauvre en métal, l'accumulation sera plus stable que la teneur moyenne, parce que pour les volumes ayant une hauteur plus grande que l'épaisseur de la veine, l'accumulation reste constante.

L'accumulation peut être utilisée comme la variable de la quantité de métal. Cette signification est une autre raison de l'utilisation de l'accumulation. Par contre, si on ne connaît pas le volume ou la puissance de la couche, l'accumulation ne peut pas être associée simplement à un critère économique.

Dans le cas où on recoupe seulement une partie de la zone minéralisée, le poids de métal obtenu sera lié à la taille de l'unité exploitée, à son positionnement par rapport au corps minéralisé et à la distribution spatiale du métal. Par ailleurs, si le stérile n'est pas exempt de minerai on aura aussi une relation entre l'accumulation et les paramètres volumiques et géométriques.

Par contre la teneur est généralement associée à un élément de volume, c'est pour cela que les teneurs sont exprimées en % du poids de l'échantillon. Dans l'estimation géostatistique, on utilise des teneurs mesurées ou calculées sur une taille fixe : appelé support d'estimation.

### V.4.2.2. Calcul de la puissance et des accumulations

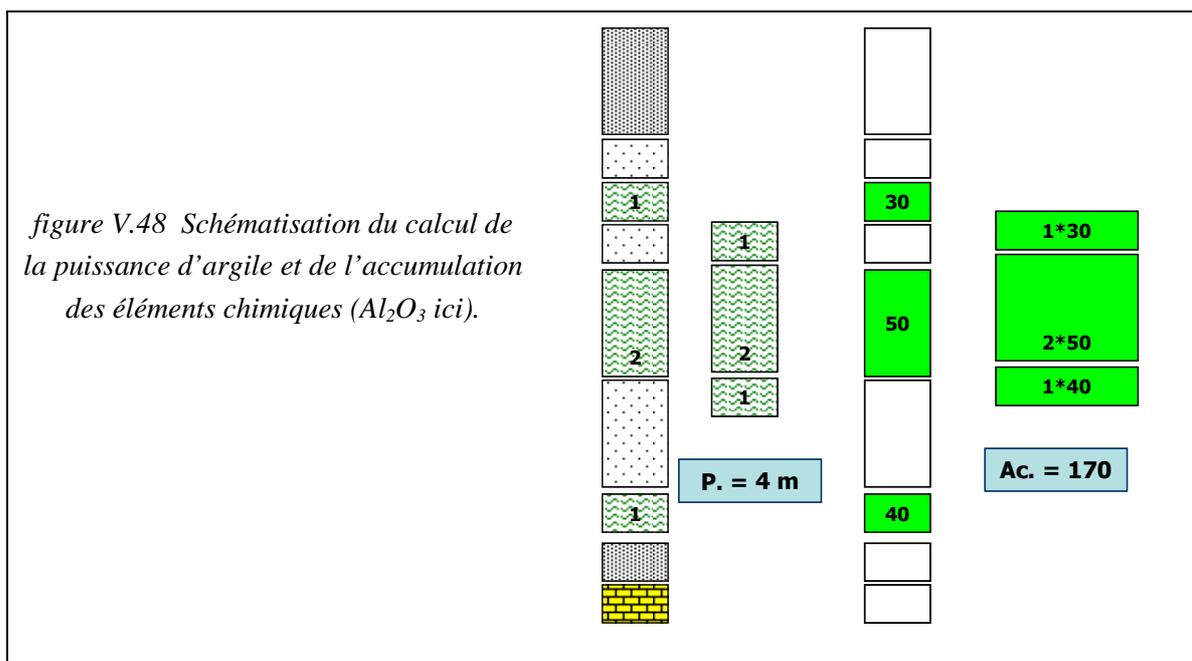
Lors qu'on dispose des données de longueur des échantillons et de leurs teneurs, on calcule l'accumulation par la formule suivante

$$A_j = \sum_{i=1}^{N_j} (Ep_{ij} * T_{ij})$$

Dans laquelle,  $A_j$  représente l'accumulation de teneur dans le j-ième sondage,  $Ep_{ij}$  est l'épaisseur du i-ème échantillon dans le j-ième sondage et  $T_{ij}$  est la teneur de l'échantillon.

Dans cette étude, afin d'éviter le mélange de stérile ou d'argile impure, la somme a été calculée en excluant les échantillons analysés en tant qu'argile AGS. Pour les sondages qui n'ont pas d'échantillon d'argile AGS, la valeur d'accumulation est égale à 0 (figure V.48). Cette façon de calculer nous permet de ne pas prendre en compte les argiles impures et les stériles qui ne sont pas exempts de ces éléments chimiques ; cela donne à l'accumulation une signification d'un point de vue économique.

Comme exposé précédemment, on n'a pas à disposition l'analyse chimique de tous les éléments, surtout dans les sondages anciens. Mais normalement la valeur de PF (Perte au Feu), et celles d' $Al_2O_3$ , de  $Fe_2O_3$  et de  $TiO_2$ , a été bien rapportée, tandis que pour le  $K_2O$ , qui sert de critère pour la classification industrielle, on n'a pas la valeur partout. C'est pour cela que l'étude de ce chapitre porte seulement sur l'accumulation de teneur des ces 4 variables et sur la puissance (la somme des épaisseurs des échantillons argileux).



### V.4.2.3. Analyse statistique des variables

Préalablement à tout calcul géostatistique, il convient de procéder à une critique des données disponibles. Cette critique préliminaire est essentielle pour se familiariser avec les données, pour les relier aux interprétations géologiques ; elle permet de corriger des erreurs à tous les niveaux et fournit souvent des explications simples à des résultats a priori étranges de l'étude ultérieure (Journel 1978, David 1988).

La figure V.49 présente l'épaisseur accumulée des couches d'argile dans les sondages par classe de valeur. La limite approximative du gisement est tracée pour bien délimiter le gisement. Il y a un nombre suffisant de sondages sans échantillon d'argile

Latéralement, on peut distinguer certains passages brutaux marqués par des sondages ayant une puissance d'argile supérieure à 25m entourés de sondages complètement stériles. Ces changements sur une distance de 40m peuvent réduire considérablement la portée du variogramme.

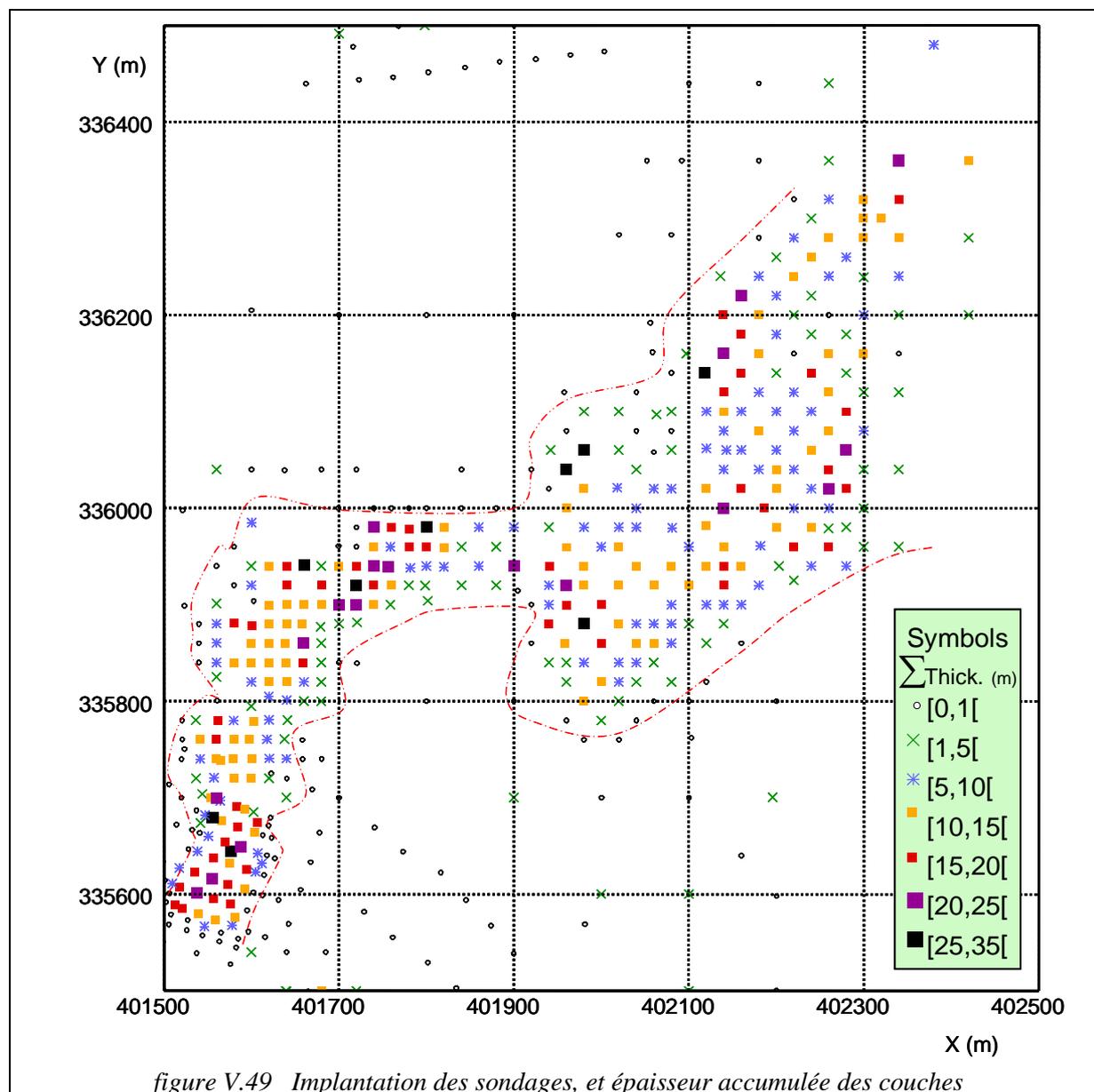
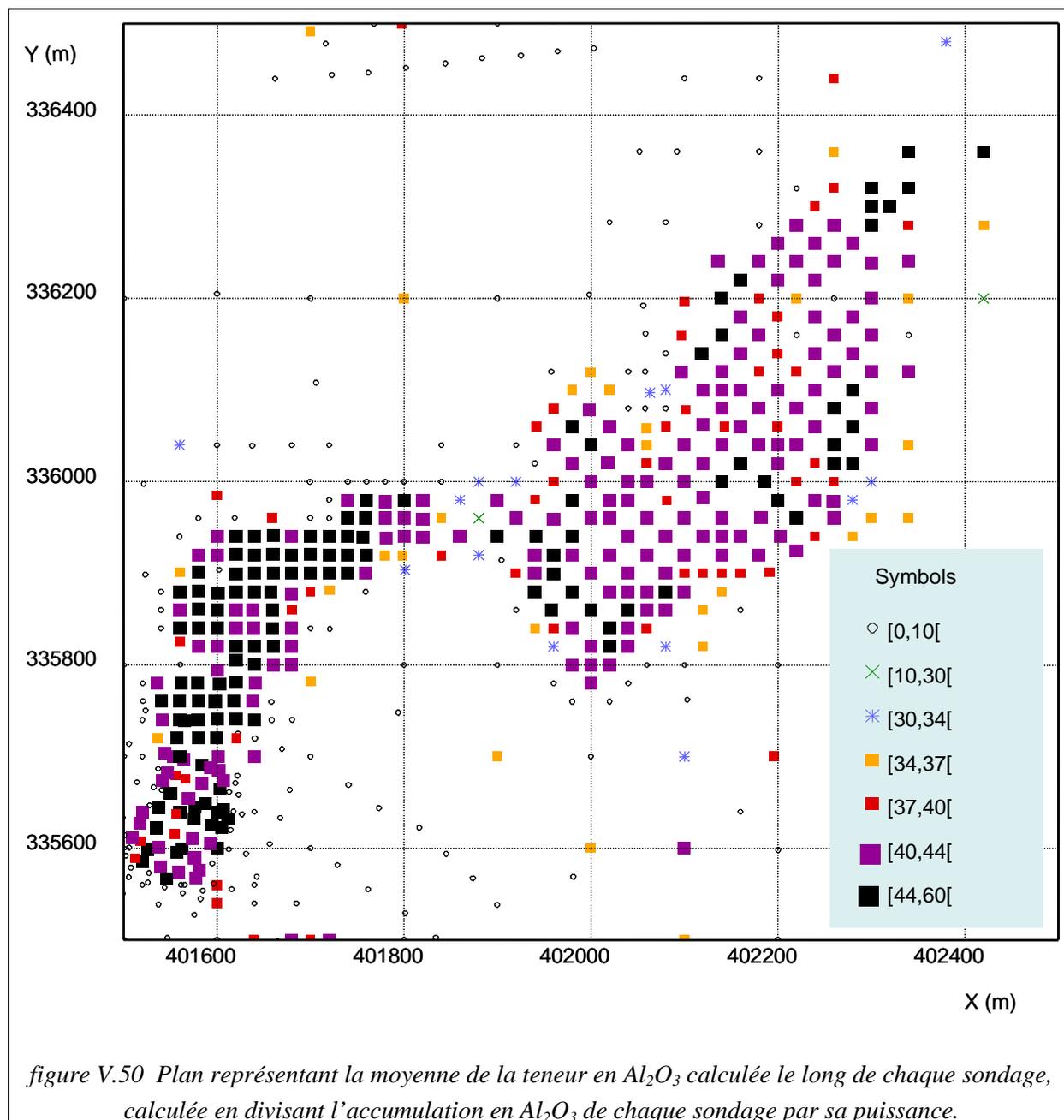


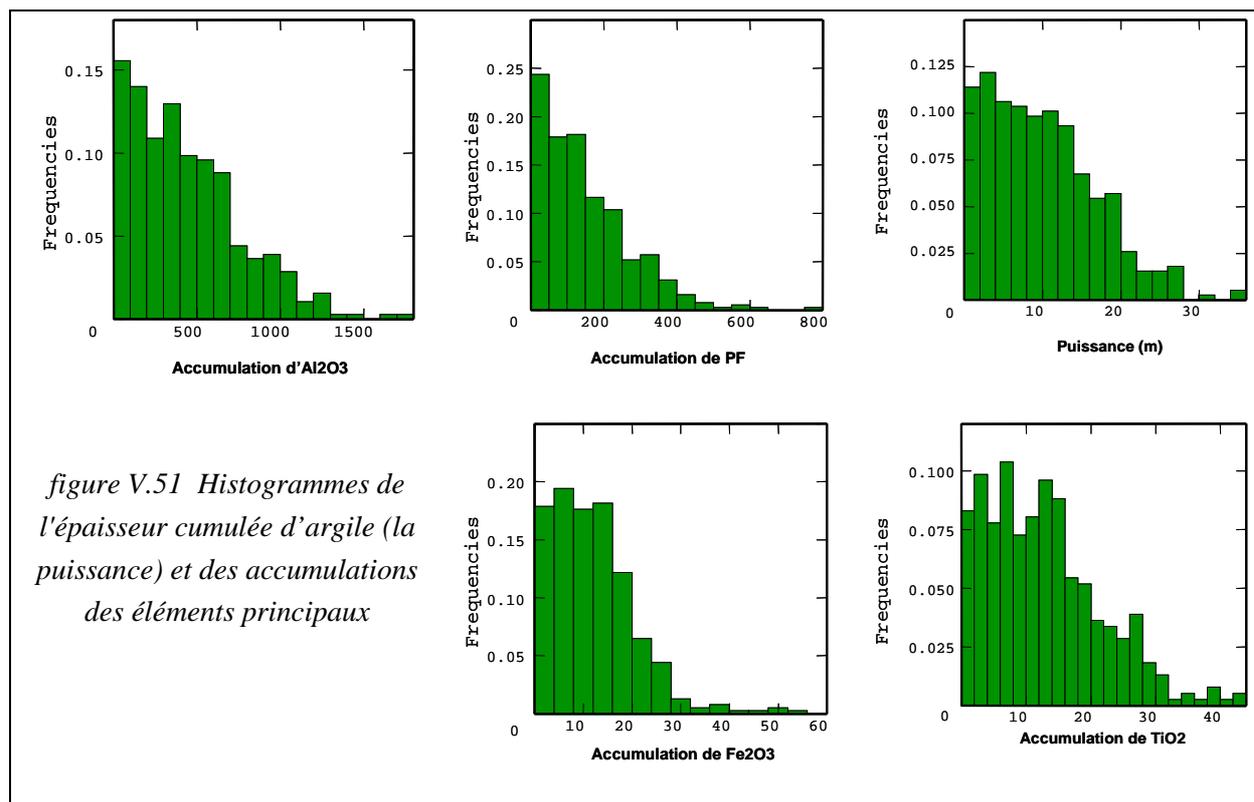
figure V.49 Implantation des sondages, et épaisseur accumulée des couches

La moyenne de la teneur en  $Al_2O_3$  a été calculée en divisant l'accumulation d' $Al_2O_3$  de chaque sondage par sa puissance. Les changements brutaux sont visibles sur ce plan. Le gisement BDR est un gisement très riche en argiles hyperalumineuses. Des teneurs moyennes entre 40 et 44% sont très fréquentes dans la partie Nord-Est du gisement, comme on a vu dans le chapitre précédent. La partie Sud-Ouest se présente plus riche en argiles hyperalumineuses, et les sondages ayant une teneur supérieure à 44% d' $Al_2O_3$  sont assez fréquents.



L'analyse statistique a été faite sur les sondages de puissance non nulle. Les histogrammes des accumulations des éléments principaux, présentés dans la figure V.51, sont un peu différents de celui de la puissance, mais leurs formes générales restent approximativement semblables, sauf pour l'accumulation de l'oxyde de fer. L'histogramme de l'accumulation en  $Al_2O_3$  est le plus semblable à celui de la puissance, une des raisons réside dans la méthode de calcul de l'accumulation.

L'accumulation a été calculée pour les argiles AGS, donc le choix de la taille de carotte a été fait indirectement, sur une catégorie d' $Al_2O_3$ . Cela peut créer un lien plus fort entre l'accumulation d' $Al_2O_3$  et la puissance d'argile dans le sondage.



La matrice de corrélation présentée dans le Tableau V.10, confirme la ressemblance mentionnée, Il ne faut pas confondre la corrélation statistique entre les variables avec celle de leurs accumulations. Les valeurs de corrélation les plus basses concernent l'accumulation en oxyde de fer. Ceci s'expliquerait par le fait que la distribution d'oxyde de fer n'est pas très cadrée par le processus de sédimentation, contrairement aux autres éléments chimiques et est localement plus variable.

Tableau V.10 Matrice de corrélation de la puissance d'argile et des accumulations des éléments principaux.

VARIABLE	Accumulation				Puissance
	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	PF	$TiO_2$	
Accumulation	$Al_2O_3$	1.00	0.86	0.98	0.94
	$Fe_2O_3$	0.86	1.00	0.85	0.88
	PF	0.98	0.85	1.00	0.91
	$TiO_2$	0.94	0.88	0.91	1.00
Puissance	0.99	0.89	0.97	0.96	1.00

Les paramètres statistiques sont présentés dans le Tableau V.11. Dans ce chapitre on va comparer le résultat d'une estimation faite à l'aide d'un modèle géostatistique ajusté sur la totalité du gisement et celui qui est obtenu à partir d'un modèle propre à chaque sous-domaine. On a déjà mis en évidence la différence entre le sous domaine Nord-Est et celui du Sud-ouest. Le Tableau V.11, le Tableau V.12 et le Tableau V.13 permettent de comparer les paramètres statistiques de ces éléments dans ces deux sous-domaines.

Le sous domaine Sud-ouest se distingue par sa variance plus élevée, produite par la forme chenalisée du gisement et la présence plus importante d'argile à hautes teneurs. Les paramètres statistiques correspondants sont donnés par le Tableau V.14 et par le Tableau V.15.

## Estimation de la qualité des kaolins des gisements du bassin des Charentes

**Tableau V.11 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulations des éléments principaux du gisement BDR**

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Accumulation	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	386	16.46	1757.56	431.72	324.12	161.88	361.33	625.38
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	386	0.59	54.12	12.13	8.60	5.68	11.27	16.38
	PF	386	5.45	776.26	148.25	121.10	52.8	118.00	214.50
	TiO <sub>2</sub>	386	0.50	43.68	12.72	8.82	5.74	11.36	17.94
Puissance		386	0.50	35.50	9.78	6.84	4.00	8.50	14.00

**Tableau V.12 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de PF calculés pour les sondages.**

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75	
Moyenne	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BDR	386	27.49	58.10	42.24	4.40	39.82	42.44	44.57
		NE	211	27.49	48.43	40.94	3.84	39.32	41.55	43.29
		SW	169	31.66	58.10	44.06	4.36	41.68	43.99	46.94
	PF	BDR	386	8.83	25.91	14.11	2.34	12.79	13.59	14.9
		NE	211	8.83	18.56	13.24	1.45	41.68	43.99	46.94
		SW	169	10.08	25.91	15.26	2.72	12.52	13.17	13.95

**Tableau V.13 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de TiO<sub>2</sub> calculés pour les sondages.**

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75	
Moyenne	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BDR	386	0.57	5.70	1.38	0.63	1.02	1.21	1.53
		NE	211	0.68	5.41	1.51	0.67	1.11	1.34	1.65
		SW	169	0.57	3.75	1.17	0.40	0.93	1.07	1.25
	TiO <sub>2</sub>	BDR	386	0.64	4.22	1.34	0.29	1.19	1.3	1.42
		NE	211	1.01	4.22	1.41	0.32	1.25	1.35	1.48
		SW	169	0.64	2.19	1.25	0.21	1.11	1.21	1.35

La moyenne de la puissance de kaolin, dans la zone nord-est, est de 8.77m, et dans la zone sud-ouest, atteint 11.34m. L'écart-type de BDR-SW est supérieur à celui de BDR-NE. Comme on l'a observé, il existe entre la puissance et l'accumulation une relation statistique très forte, donc l'écart-type des accumulations des variables dans BDR-SW est supérieur à celui de la zone du nord-est du gisement.

**Tableau V.14 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux sous-domaine Nord-est**

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Accumulation	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	211	16.46	1221.58	375.12	281.41	138.26	318.76	521.01
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	211	0.67	40.08	11.75	7.54	5.89	11.48	16.31
	PF	211	5.45	439.80	122.61	95.31	44.05	104.00	168.30
	TiO <sub>2</sub>	211	0.51	43.68	12.08	8.23	4.89	11.16	17.18
Puissance		211	0.50	27.00	8.77	6.13	3.50	8.00	12.50

Tableau V.15 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux.  
sous-domaine Sud-ouest

VARIABLE	N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75	
Accumulation	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	169	21.15	1757.56	516.09	353.06	210.75	476.32	706.12
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	169	0.59	54.12	12.92	9.70	5.78	11.44	17.02
	PF	169	6.70	776.26	184.98	139.12	72.60	162.05	272.20
	TiO <sub>2</sub>	169	0.50	43.62	13.92	9.31	6.94	12.78	18.99
Puissance	169	0.50	35.50	11.34	7.32	5.00	11.00	16.00	

Les paramètres statistiques ont été calculés sans pondération par le volume, ceci est faisable, en utilisant un facteur de discrétisation.

#### V.4.2.4. Analyse variographique

L'idée fondamentale de la variographie est très simple et logique. La nature n'est pas entièrement "imprévisible", cela est la clé essentielle. Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées. Cette notion est connue par les mineurs et les géologues en tant que la notion de "continuité" de la minéralisation. En géostatistique, on cherche à quantifier cette continuité préalablement à tout calcul effectué sur le gisement (Marcotte).

Dans certains cas, l'étude variographique se fait seulement sur les données situées dans la couche minéralisée pour révéler la structure liée directement au processus de minéralisation.

Si on néglige le premier point, à cause d'un nombre insuffisant de paires, le deuxième point est situé à 70 pour cent de la valeur du palier, cela veut dire que pour une distance pas très grande on atteint quasiment la portée du variogramme au-delà de laquelle deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne. Les variogrammes sont quasiment proportionnels à leurs variogrammes simples. La ressemblance des variogrammes de l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de la puissance est remarquable. La ligne en pointillés dans le variogramme de puissance et d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> montre la forme des modèles qu'on pourrait ajuster à ces variogrammes.

Le premier modèle sera un modèle avec une pente très forte à petite distance et un effet de pépité très faible, tandis que le deuxième modèle peut avoir une portée plus grande mais un effet de pépité plus important, qui arrive à 50% du palier.

Sachant que, l'écart entre les valeurs très faible (puissance nulle) et les autres valeurs expliquera une grande partie de la variation, la structure du variogramme reflétera la géométrie de ce phénomène.

Il y a une similitude entre la forme des variogrammes. Les variogramme d'accumulation d'oxyde de fer (simple et croisés) se distinguent par une forme plus pépitique, dont la raison peut être expliquée par les valeurs aberrantes (par exemple pour la perte au feu les échantillons très riches en matière organique qui sont analysés occasionnellement, ou pour le fer les teneurs très élevées du fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>5%)).

La figure V.52 présente les variogrammes simples et croisés de la puissance et des éléments chimiques en utilisant les valeurs nulles. Cela montre que la variation en totalité est plus structurée que la variation seule de la partie minéralisée.

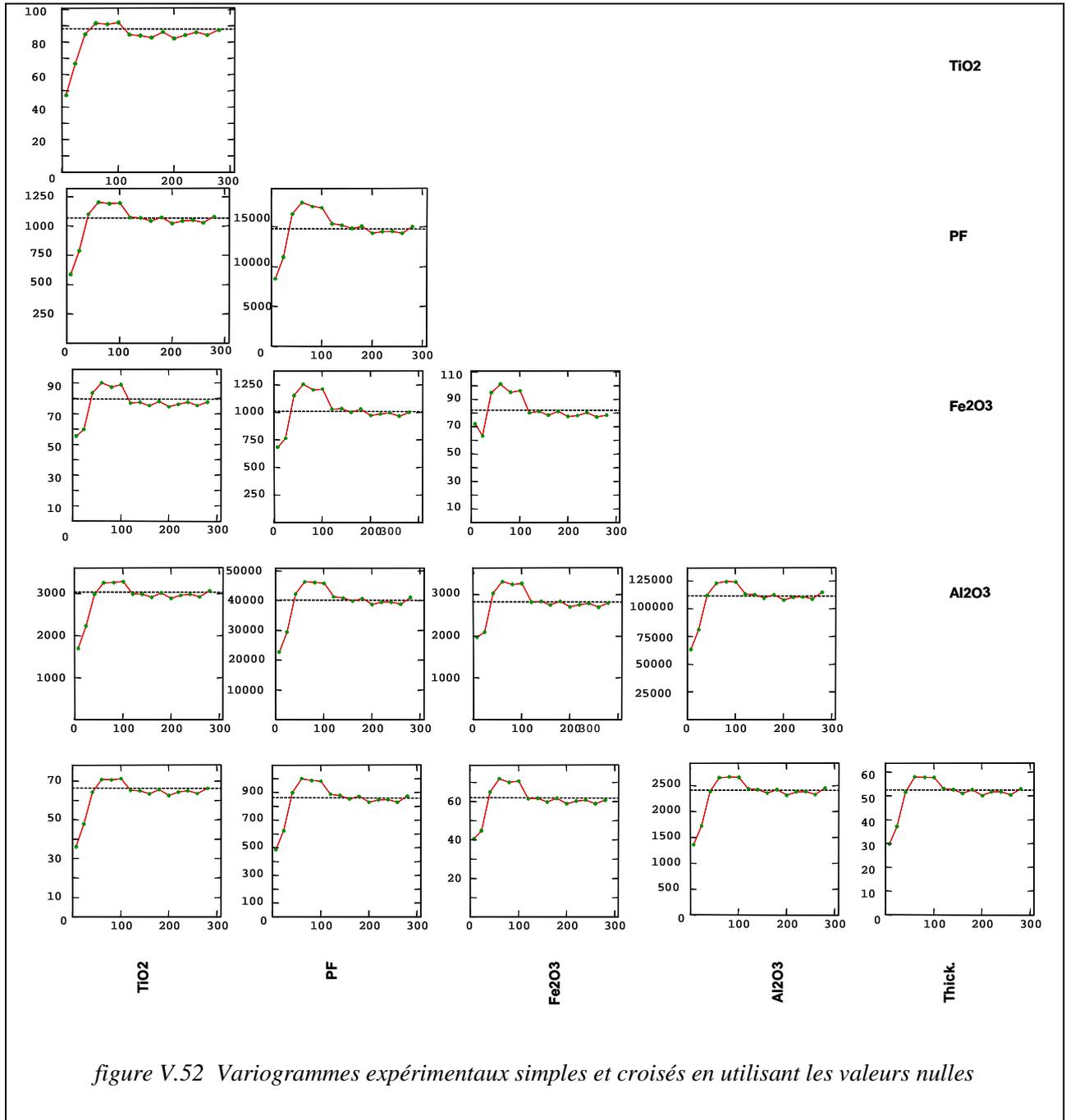
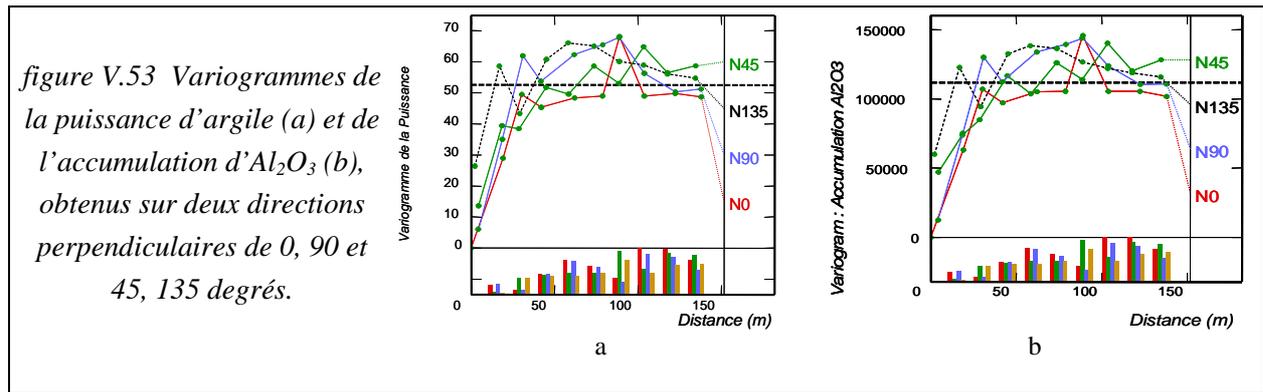
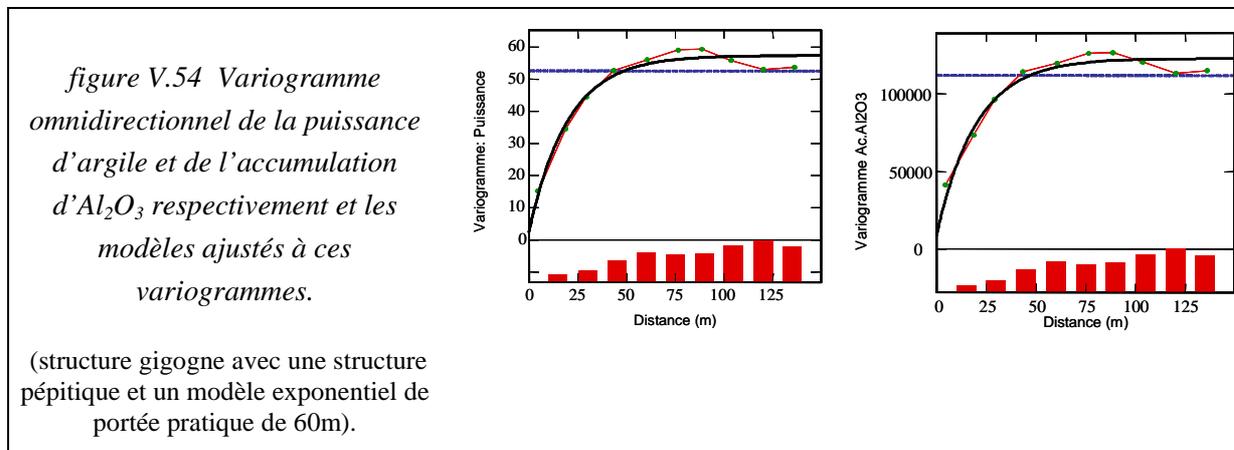


figure V.52 Variogrammes expérimentaux simples et croisés en utilisant les valeurs nulles

Pour étudier l'anisotropie des structures, les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions (Nx, où x mesure l'angle en degrés par rapport au Nord dans le sens des aiguilles d'une montre). Le nombre de paires est présenté sous forme d'histogramme. On ne distingue aucune anisotropie nette. Une partie des différences entre les variogrammes provient sans doute des grandes différences dans le nombre de paires surtout aux petites distances. Du fait de la similarité des variogrammes et de l'importance de la puissance et de l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, seulement les modèles de ces deux variables seront présentés dans ce mémoire. Le pas de calcul est égal à 15m avec une tolérance de 50% et une tolérance angulaire de 22.5 degrés.



L'absence d'anisotropie a été testée en prenant des tolérances angulaires différentes. Par conséquent on a intérêt à utiliser un modèle isotrope. Pour cela le variogramme omnidirectionnel a été calculé, un modèle exponentiel a été ajusté en ajoutant un effet de pépite faible ; le modèle exponentiel peut avoir un effet d'écran dans le processus d'estimation, mais la structure pépitique l'en empêche.



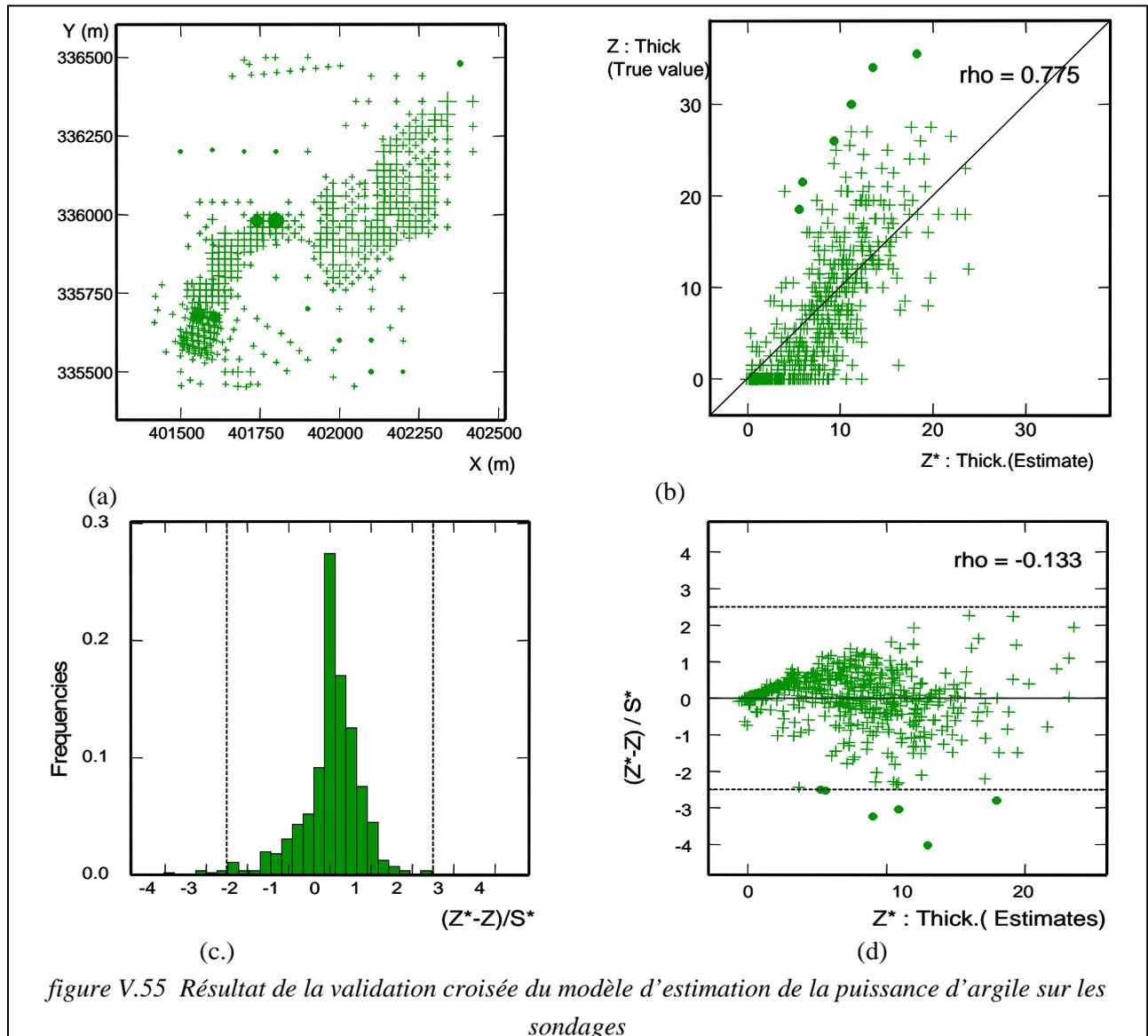
Pour que le modèle suive bien le variogramme expérimental, on a choisi un palier un peu plus grand que la variance des données. Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont respectivement les suivants :

$$\begin{aligned} \cdot \gamma(h) &= 2.55 * \text{pépitique} + 54.4 * \text{Exp. (60)} \\ \cdot \gamma(h) &= 8800 * \text{pépitique} + 1140000 * \text{Exp. (60)} \end{aligned}$$

La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 100m, avec 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.55. Le Tableau V.16 résume le résultat de cette validation.

Dans chaque graphique du résultat de la validation croisée, on aura les informations suivantes ;

- (a) Présentation de l'erreur d'estimation
- (b) Relation entre la puissance estimée et la puissance vraie d'argile dans le sondage
- (c) Histogramme de l'erreur d'estimation normalisée
- (d) Relation entre la puissance d'argile dans le sondage et l'erreur d'estimation normalisée



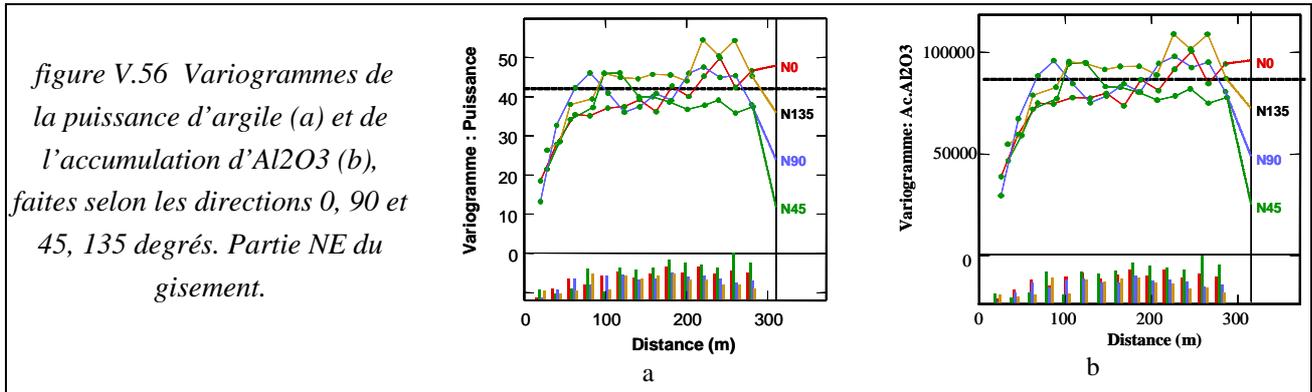
La validation montre une variance forte autour de la valeur estimée. La figure V.55 illustre une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles. Des sondages stériles ont été estimés positifs, car quand on les masque afin de les re-estimer, ce sont les sondages positifs qui sont les plus fréquents dans leur voisinage, et de temps en temps, parmi eux, comme on l'a vu dans la figure V.49, se trouvent les sondages ayant une puissance considérable d'argile.

Tableau V.16 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance

	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-4.03	2.26	0.02	0.74
	basé sur 241 données		basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.18	21.54	0.37	18.37
Std. d'erreur	0.02	0.55	0.05	0.45

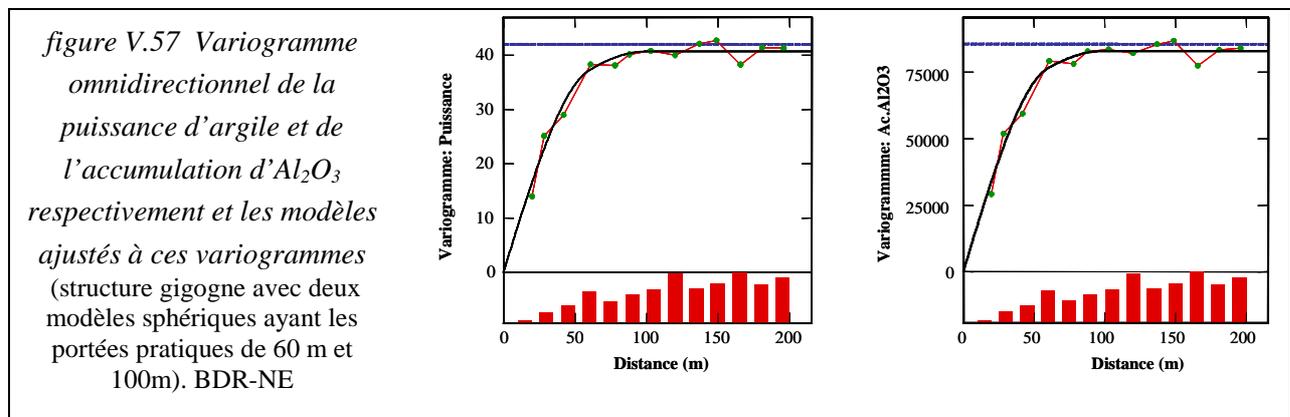
Afin d'améliorer le résultat de l'estimation, on divise le gisement en deux sous-domaines plus homogènes. Ces deux sous-domaines ont été choisis, en tenant compte de la forme de la sédimentation, qui se présente différemment dans la partie Sud-Ouest par rapport à la partie Nord-Est. Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions pour investiguer la présence d'anisotropie. Comme

précédemment, le pas de calcul est égal à 15m avec une tolérance de 50% et la tolérance angulaire est de 22.5 degrés.



Un des problèmes importants est celui de la stationnarité directionnelle. Comparons le variogramme expérimental de direction N0 avec celui de direction N90. Le variogramme de direction N0 croît régulièrement, tandis que celui de N90 montre une bosse vers 80m.

L'absence d'anisotropie a été testée en appliquant des tolérances angulaires différentes ; en plus à cause du faible nombre des données, les variogrammes directionnels sont instables. En conséquence, on a intérêt à utiliser un modèle isotrope. Le variogramme omnidirectionnel a donc été calculé pour les deux variables. Les modèles ressemblent considérablement à celui obtenu pour la totalité du gisement. On n'attend donc pas une amélioration nette des résultats, en considérant un découpage du gisement, en zones supposées plus homogènes.



Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont respectivement, les suivants :

$$\gamma(h) = 24 * \text{Sph.}(60) + 16.5 * \text{Sph.}(100)$$

$$\gamma(h) = 51900 * \text{Sph.}(60) + 31100 * \text{Sph.}(100) \text{ (les modèles sont proportionnels)}$$

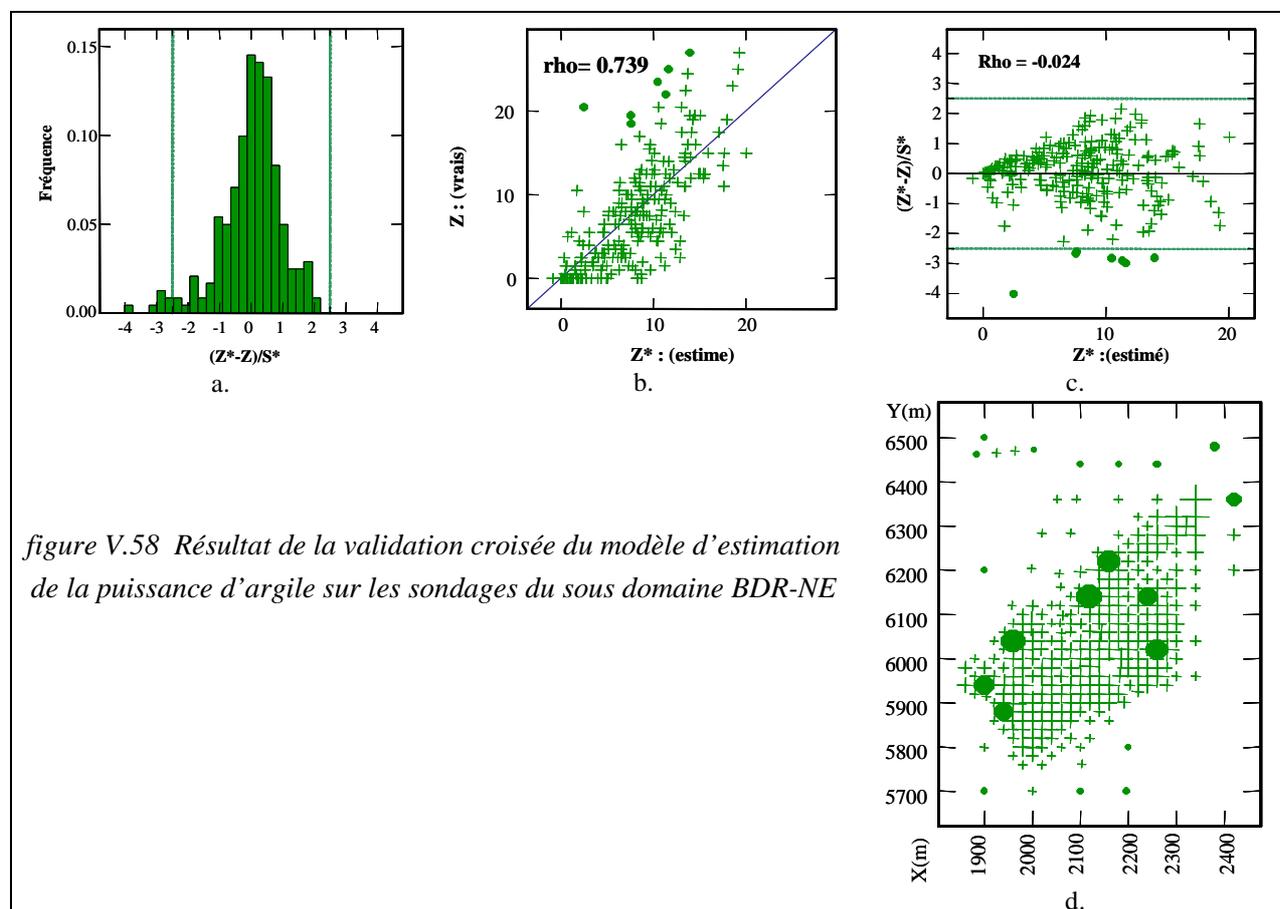
La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 100m, avec 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.58. Le Tableau V.17 résume le résultat de cette validation.

Tableau V.17 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-NE

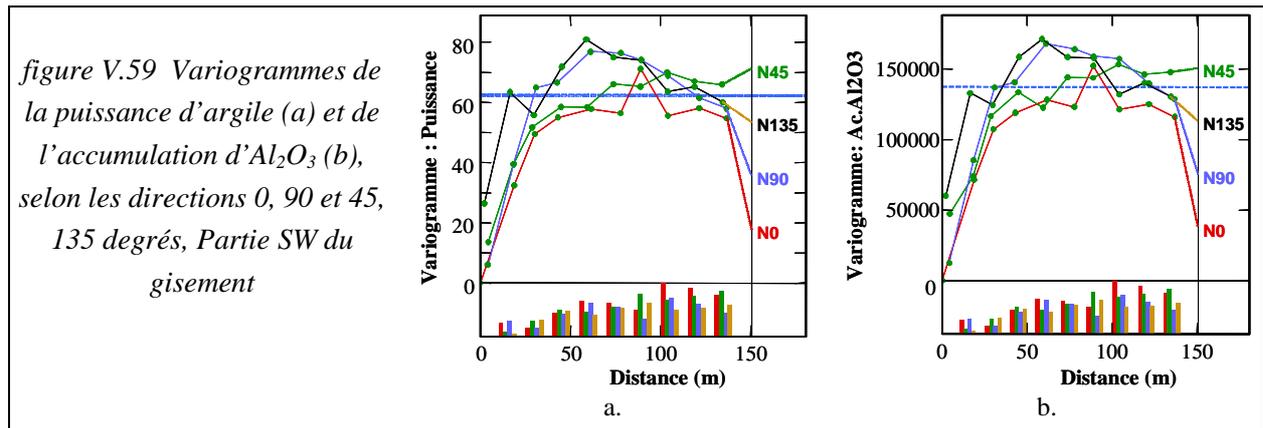
	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-4.00	2.15	0.03	0.96
	basé sur 241 données		basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.18	19.05	0.58	14.12
Std. d'erreur	0.03	0.92	0.12	0.67

La validation montre une variance forte autour de la valeur estimée. La figure V.58.b illustre, une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles. Comme précédemment, les sondages dans le stérile ont été estimés positifs.

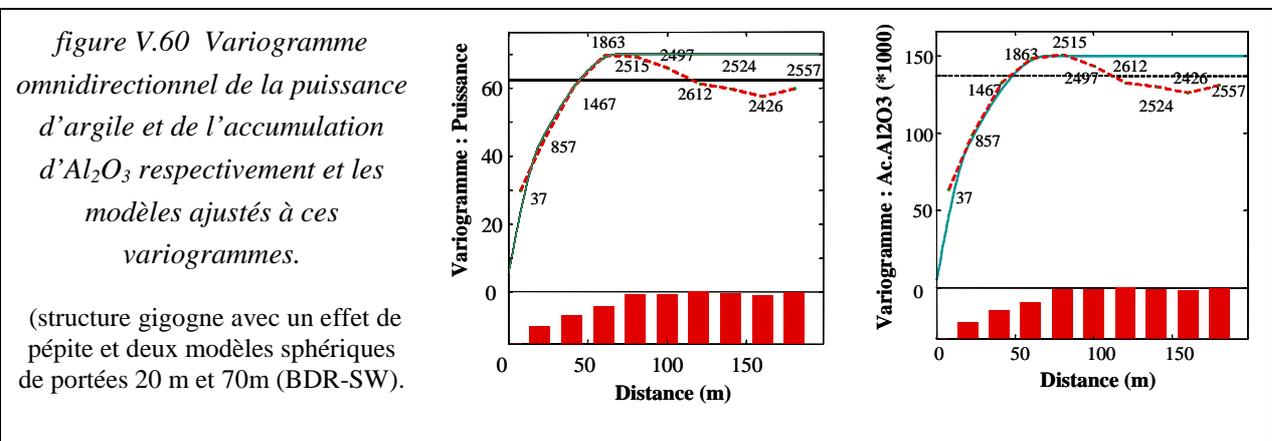
La variance d'estimation a été réduite, cela est lié au choix d'un sous-domaine plus homogène, ce qui a pour conséquence d'obtenir un palier du variogramme plus bas que pour l'ensemble du gisement. Une autre remarque est l'augmentation de l'indépendance entre l'erreur et la valeur vraie dans le cas de l'estimation sur le sous-domaine NE.



Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions dans la partie Sud-ouest. Ce sous-domaine est plus chenalisé. Mais cependant les variogrammes de N0 et N90 se ressemblent plus que les variogrammes calculés dans le sous-domaine Nord-est.



L'absence d'anisotropie a été testée en impliquant des tolérances angulaires différentes, avec une tolérance angulaire de 5 degrés, et un pas de 20m ; les 3 premiers points des variogrammes sont très peu différents. C'est pourquoi un modèle isotrope est préférable.



Le pas de calcul du variogramme expérimental est de 20m. Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont respectivement, les suivants :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 5 * \text{pépitique} + 20 * \text{Sph. (20)} + 45 * \text{Sph. (70)} \\ \gamma(h) &= 5000 * \text{pépitique} + 45000 * \text{Sph. (20)} + 100000 * \text{Sph. (70)} \end{aligned}$$

(Les modèles peuvent être ajustés d'une façon proportionnelle du fait de la ressemblance des variogrammes expérimentaux simples et croisés).

La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 80m, et 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.61. Le Tableau V.18 résume le résultat de cette validation.

La validation montre une variance forte autour des valeurs estimées. La figure V.61.b illustre une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles, liées au lissage des variations brutales, déjà mentionné. Comme dans la partie Nord-est, des sondages du stérile ont été estimés positifs.

Tableau V.18 Résultat de la validation croisée de modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-SW

	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-3.96	2.16	0.01	0.76
	basé sur 241 données		Basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.15	23.51	0.43	18.62
Std. d'erreur	0.01	0.58	0.06	0.45

La puissance dans ce sous domaine est plus variée, d'où une variance d'estimation plus grande, mais la moyenne de l'erreur d'estimation est plus faible.

Le but de l'étude présentée dans ce chapitre est de montrer la variabilité générale des variables principales. La valeur des variogrammes correspondant à une distance de 30m représente plus de 50 pourcent de la variance totale, tandis que, actuellement, la maille de sondage est de 40m dans la partie Nord-Est du gisement et de 20m dans le sous-domaine Sud-Ouest.

Le résultat de cette estimation donne une évaluation très générale des réserves (figure V.62). Afin d'avoir une estimation plus détaillée, le gisement sera estimé par bancs de 2 m d'épaisseur.

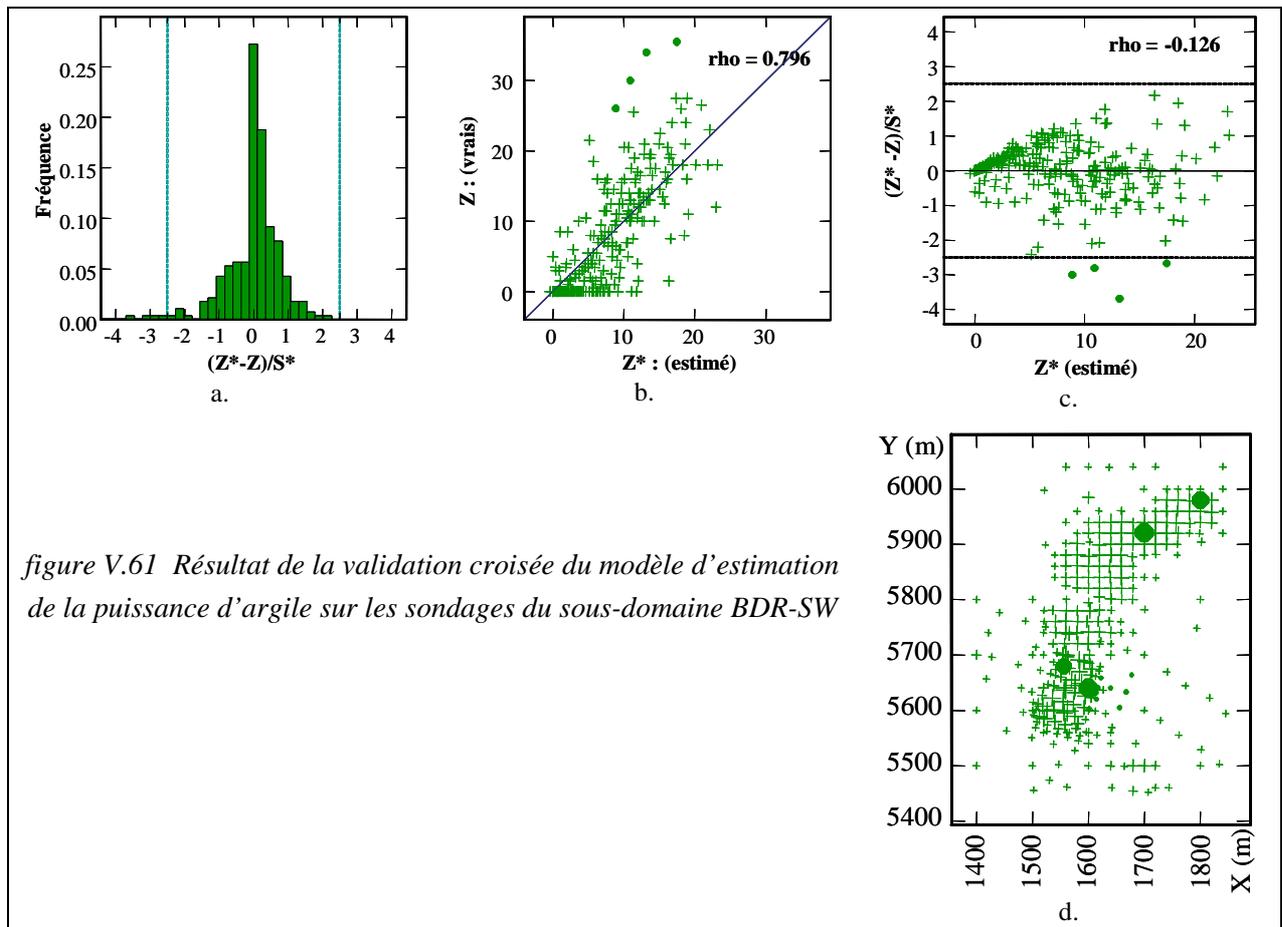


figure V.61 Résultat de la validation croisée du modèle d'estimation de la puissance d'argile sur les sondages du sous-domaine BDR-SW

L'estimation de l'accumulation est une méthode acceptable pour les gisements de type nappe, d'une faible épaisseur et d'une extension latérale importante. Mais dans le cas d'un gisement comme BDR, composé des différentes sous parties et d'une épaisseur d'argile importants, cela ne sera qu'une évaluation générale. Cette méthode ne permet pas d'avoir la classification des réserves par classe d'argile surtout dans la direction verticale.

Le gisement BDR présente des zones très distinctes, chaque sous gisement mérite d'être étudié individuellement. La complexité du gisement est importante même dans le cas de l'accumulation. L'erreur importante de l'estimation est mise en évidence, du fait de la corrélation spatiale faible des variables et la maille de sondage très large utilisée pour l'estimation de la partie NE du gisement BDR.

Une étude de l'estimation de l'accumulation pour chaque séquence du kaolin peut nous aider à améliorer la qualité des résultats, mais cela demanderait des informations supplémentaires afin de distinguer les échantillons des séquences différentes.

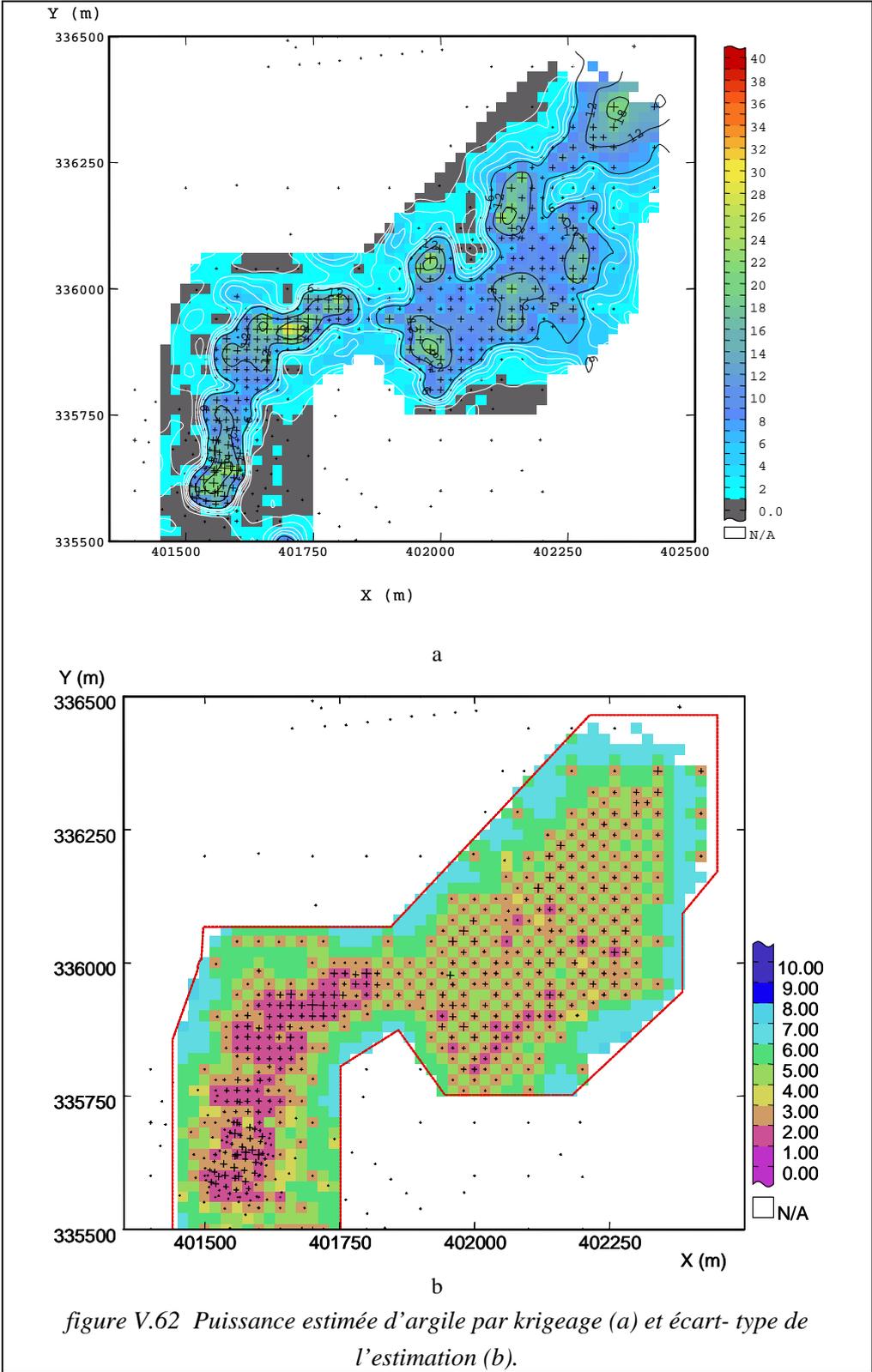


figure V.62 Puissance estimée d'argile par krigeage (a) et écart-type de l'estimation (b).

### V.4.3. Estimation par bancs de 2m d'épaisseur

L'estimation de l'accumulation et de la puissance de minerai est un outil intéressant pour une approximation globale des tonnages dans le gisement. Si la couche de minerai n'est pas très épaisse, en pratique, le résultat de cette estimation peut être utilisé directement. Dans le cas d'un gisement comme BDR où l'épaisseur totale des dépôts d'argile atteint quelques dizaines de mètres, par superposition de séquences différentes, il est plus intéressant d'avoir des informations plus détaillées de la répartition des diverses catégories de minerai.

#### V.4.3.1. Introduction

Le calcul de régularisation est très simple, mais il faut être très prudent quant à la manière de le réaliser. La régularisation des échantillons se fait sur une taille (longueur) fixe. Elle consiste à découper le sondage en segments de longueur fixe. La teneur de chaque segment est obtenue par une moyenne pondérée des échantillons situés dans ce segment. On peut réaliser le découpage, en commençant par la tête de sondage. Une autre manière de procéder est de faire le découpage par des tranches horizontales.

Dans le cas des gisements kaoliniques du bassin des Charentes, la situation est un peu plus compliquée. La récupération de sable dans le carottier est extrêmement faible. L'échantillon pris dans la matière qui sort du forage, n'est pas très représentatif. Le passage du minerai au stérile n'est pas continu comme dans une minéralisation métallique déposée par diffusion d'un flux hydrothermal. Parfois le contact entre les couches de sable et d'argile est observable sur le terrain. En pratique, on peut arrêter l'exploitation lorsqu'on atteint le sable. Normalement on évite la dilution de l'argile par le sable : pour AGS, l'analyse des échantillons dilués par du stérile ne présente aucun intérêt. L'échantillonnage par une longueur constante (le long d'une carotte), revient à accepter la dilution par du stérile. Comme on l'a dit, cela peut être évité lors de l'exploitation du gisement (une petite pelle mécanique permet l'exploitation d'une couche d'épaisseur d'un demi-mètre). En conséquence, la taille des bancs exploités sera finalement imposée par la géométrie des couches.

Actuellement AGS affecte des valeurs par défaut pour remplacer certains échantillons sans analyse, en fonction de leur code lithologique (Tableau V.19).

L'utilisation de valeurs par défaut est une réponse au problème des lacunes d'information. On impose ainsi une certaine limite pour l'estimation, et on applique la valeur par défaut (faible) lors de l'estimation des blocs voisins. Cela aura un effet de dilution sur la valeur estimée.

Par contre une valeur fixe partout, pour une lithologie définie, réduit la variance des données, surtout lorsque les échantillons ont une longueur élevée.

L'histogramme de la taille (longueur) des échantillons par classe lithologique d'argile a été présenté dans la figure V.9. Les échantillons d'une longueur plus grande que 2.5 m sont très rares.

Actuellement on évite d'avoir un échantillon argileux très long, et la carotte est coupée en échantillons ayant une taille plus petite. La taille des échantillons est un multiple d'un demi mètre (0.5m, 1m, 1.5m, 2m ...).

Comme on a vu précédemment la régularisation des données pose certains problèmes dont le choix d'un support plus petit que la longueur de l'échantillon, qui aboutit au découpage d'un échantillon sur supports constants, ayant une valeur identique. Le choix d'une longueur plus grande que la taille de certains échantillons, pose question pour l'utilisation de valeurs sur des supports incomplets. Pour éviter les problèmes mentionnés, on propose de régulariser les données de la manière suivante.

Tableau V.19 Valeurs par défaut assignées par code lithologique et critère de couleur pour le gisement BDR

Code	PF	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
8	10	30	1.7	2	
10	11.2	30	1.4	1.2	1.6
11	11.4	34	1.3	1.2	1
12	12.5	36	1.4	1.9	1
13	12.7	39	1.3	1.7	1.2
14	13.6	41.5	1.3	1	0.7
15	17.5	42	1.2	1.1	0.6
17	16.7	44	1.2	0.5	0.1
84	8	15	2	2	
85	10	25	2	2	
87	10	20	2	15	
93	8	0	2	2	
94	8	5	1.7	2	

#### V.4.3.2. Régularisation par tranche

Dans cette méthode on coupe le gisement par les tranches horizontales. Une épaisseur de 2m a été choisie comme la taille de tranche et pour le calcul de la régularisation. Ce choix a été fait en tenant compte de la figure V.9 et de façon à avoir une taille appropriée et pratique pour l'exploitation. La somme des épaisseurs d'argile, appelée puissance partielle, est calculée dans les tranches horizontales successives. Sa valeur sera comprise entre 0 et 2m. Pour les variables chimiques, on utilisera le produit de l'épaisseur par la teneur moyenne des passées argileuses. Cela peut être appelé une accumulation partielle. La puissance partielle représente la proportion d'argile en volume dans chaque segment. L'accumulation partielle représente la masse d'élément chimique dans l'argile de chaque segment (figure V.63).

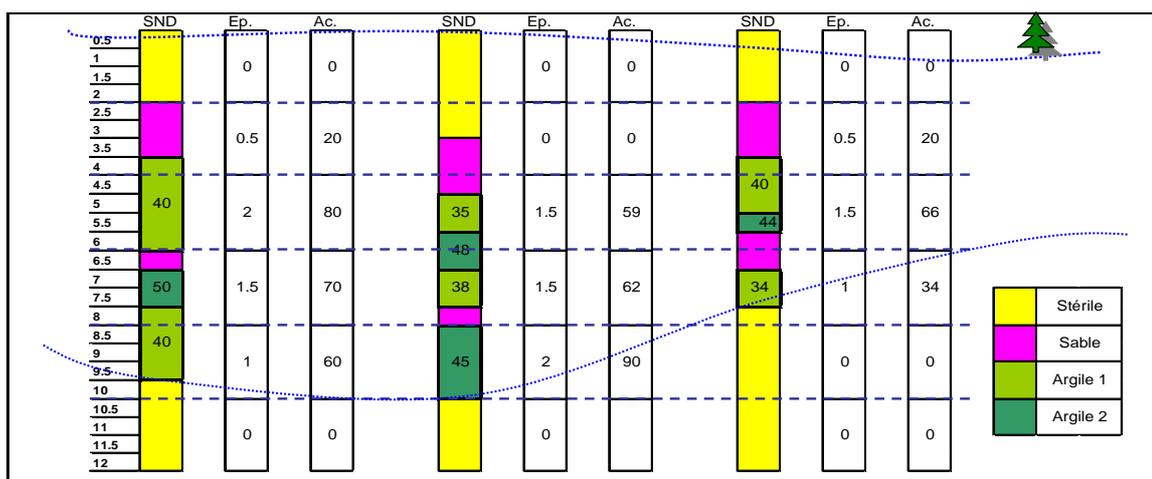


figure V.63 Représentation graphique du calcul de la régularisation par banc de 2 m. d'épaisseur.

Après l'estimation de l'accumulation et de la puissance partielles dans chaque bloc, on en déduira la proportion d'argile et la teneur moyenne de chaque élément chimique.

### V.4.3.3. Analyse statistique

La somme des puissances partielles des sondages calculée banc par banc, sera utilisée comme critère de délimitation de l'espace à estimer. Cette délimitation augmente le niveau de stationnarité des variables. La limite choisie pour cette étude est figurée par deux lignes rouges dans la figure V.64. On travaillera donc sur les bancs ayant une altitude entre 72m et 22m. La figure V.49 peut être utile, pour avoir une image de la puissance d'argile dans le sondage (voir le chapitre sur l'estimation de l'accumulation).

La moyenne des éléments chimique se calcule en divisant la somme de leur accumulation par la somme des puissances partielles pour chaque niveau d'altitude. La variation de cette variable est plus faible dans la limite retenue que dans la totalité du gisement. On note une ressemblance entre les moyennes de PF et d' $Al_2O_3$ . La variation de la moyenne de  $Fe_2O_3$  est très faible. Les statistiques plus détaillées sont présentées dans le Tableau V.20.

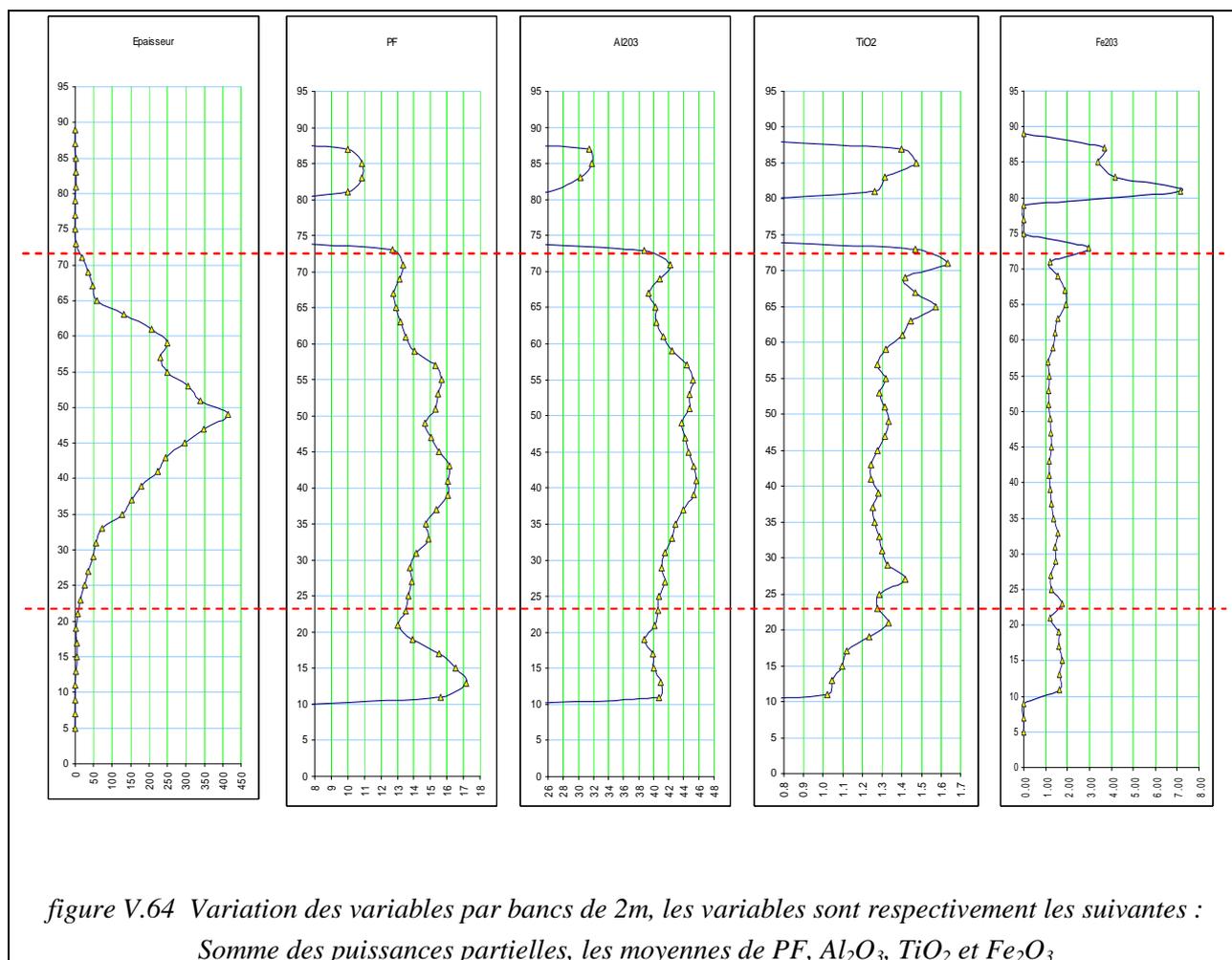


Tableau V.20 Statistique sur l'épaisseur et les éléments chimiques des échantillons kaoliniques par tranche horizontale (cas des bancs de 2 m d'épaisseur)

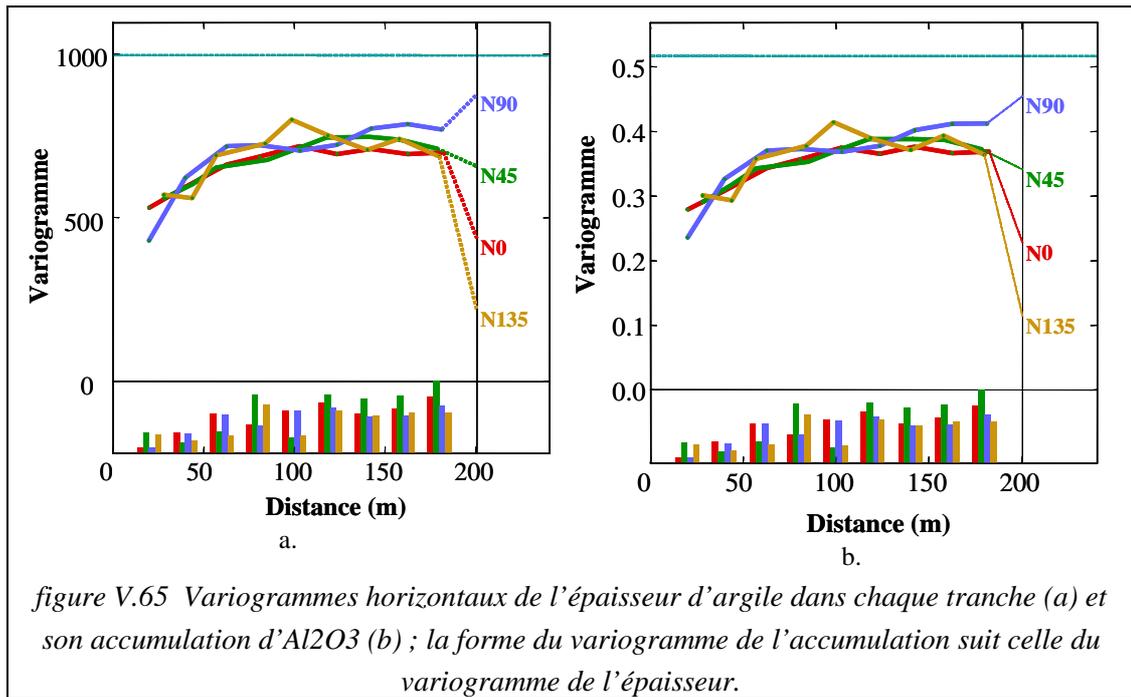
Z	N	Somme					Moyenne				
		Ep	Ac.Pf	Ac.Al	Ac.Ti	Ac.Fe	Ep	PF	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
71	16	19.5	260.0	822.3	31.8	23.9	1.22	13.34	42.17	1.63	1.22
69	29	34.7	455.1	1416.4	49.2	54.6	1.20	13.11	40.80	1.42	1.57
67	34	46.0	587.6	1806.5	67.7	87.4	1.35	12.77	39.27	1.47	1.90
65	49	59.2	765.1	2379.0	93.0	113.5	1.21	12.93	40.20	1.57	1.92
63	108	132.6	1748.0	5345.7	191.4	207.7	1.23	13.18	40.32	1.44	1.57
61	149	207.8	2809.5	8579.8	291.4	297.9	1.39	13.52	41.29	1.40	1.43
59	161	250.3	3514.5	10631.2	330.5	331.1	1.55	14.04	42.48	1.32	1.32
57	150	231.1	3534.4	10264.4	295.2	258.7	1.54	15.29	44.41	1.28	1.12
55	167	250.0	3915.1	11297.3	329.9	290.6	1.50	15.66	45.18	1.32	1.16
53	192	306.6	4748.0	13732.3	394.5	351.2	1.60	15.48	44.78	1.29	1.15
51	231	339.6	5187.0	15203.6	445.5	391.4	1.47	15.28	44.77	1.31	1.15
49	257	414.6	6079.5	18146.4	552.8	495.7	1.61	14.67	43.77	1.33	1.20
47	233	349.7	5259.0	15456.7	458.6	429.7	1.50	15.04	44.20	1.31	1.23
45	190	296.7	4602.7	13242.4	377.9	376.1	1.56	15.51	44.63	1.27	1.27
43	160	244.9	3953.6	11094.2	304.4	284.1	1.53	16.14	45.30	1.24	1.16
41	143	223.2	3580.2	10204.3	277.4	262.0	1.56	16.04	45.71	1.24	1.17
39	118	179.3	2877.2	8121.9	229.9	218.0	1.52	16.05	45.31	1.28	1.22
37	95	152.9	2350.5	6715.4	191.4	196.6	1.61	15.37	43.91	1.25	1.29
35	85	126.8	1867.1	5437.7	160.1	173.6	1.49	14.73	42.90	1.26	1.37
33	53	74.1	1102.7	3147.4	95.2	116.3	1.40	14.87	42.46	1.28	1.57
31	40	57.2	809.0	2378.8	74.4	81.6	1.43	14.14	41.57	1.30	1.43
29	31	49.5	681.0	2032.0	65.8	72.1	1.60	13.76	41.05	1.33	1.46
27	22	36.0	500.4	1496.6	50.9	45.2	1.64	13.90	41.57	1.42	1.26
25	16	25.0	341.8	1018.8	32.1	32.0	1.56	13.67	40.75	1.29	1.28
23	8	13.0	175.7	527.6	16.6	23.0	1.63	13.52	40.58	1.28	1.77

#### V.4.3.4. Analyse variographique

Dans cette étude, la partie nord-est du gisement a été choisie pour juger de l'intérêt de ces nouvelles variables : accumulation et puissance partielles. Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions horizontales. Le pas de calcul du variogramme est de 20m, et la hauteur des tranches verticales est de 1m, afin de guider le calcul du variogramme dans les niveaux complètement horizontaux.

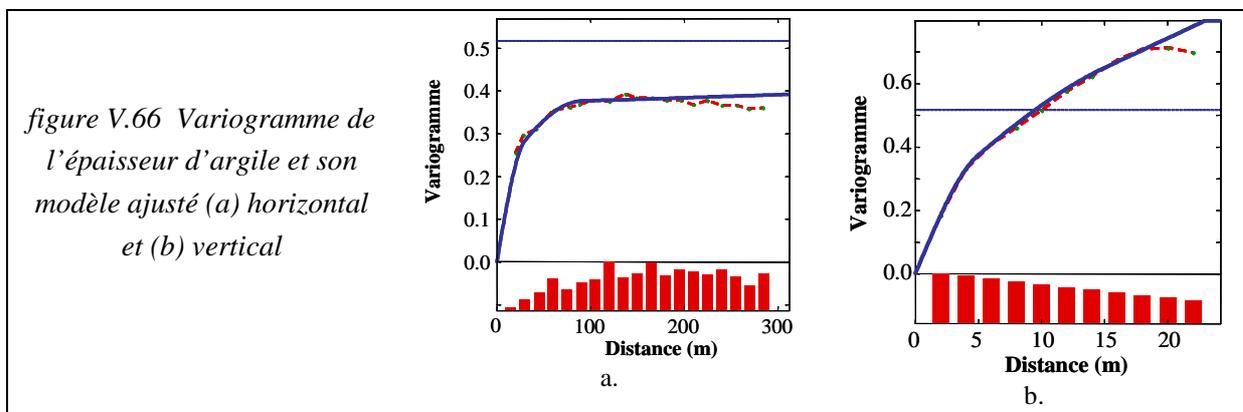
Naturellement, une anisotropie structurale et une anisotropie géométrique existent si on compare la direction verticale et les directions horizontales. On a essayé de modéliser l'isotropie zonale (structurale) à l'aide d'un modèle linéaire.

La structure spatiale n'est pas très forte, car le premier point du variogramme atteint presque 50 pourcent de la variance totale, et 60 pourcent du palier du variogramme horizontal. Compte tenu de la continuité des couches kaoliniques aux petites distances, on évite d'ajuster un modèle ayant un effet de pépite important, et cette partie du modèle sera considérée comme un modèle sphérique de courte portée. La continuité du variogramme vertical, aux petites distances, justifie ce choix. L'anisotropie est modélisée en introduisant un modèle linéaire qui a une anisotropie verticale. La pente du modèle linéaire est considérablement plus faible verticalement qu'horizontalement.



La figure V.67 montre les variogrammes expérimentaux de l'épaisseur et le modèle ajusté. On exprime le modèle par la formule schématique suivante, (le premier chiffre entre parenthèse est la portée horizontale et le deuxième est la portée verticale).

$$\gamma(h) = 0.2 * \text{Sphérique}(30,5) + 0.17 * \text{Sphérique}(90,15) + 0.14 * \text{Linéaire}(2000,7.5)$$

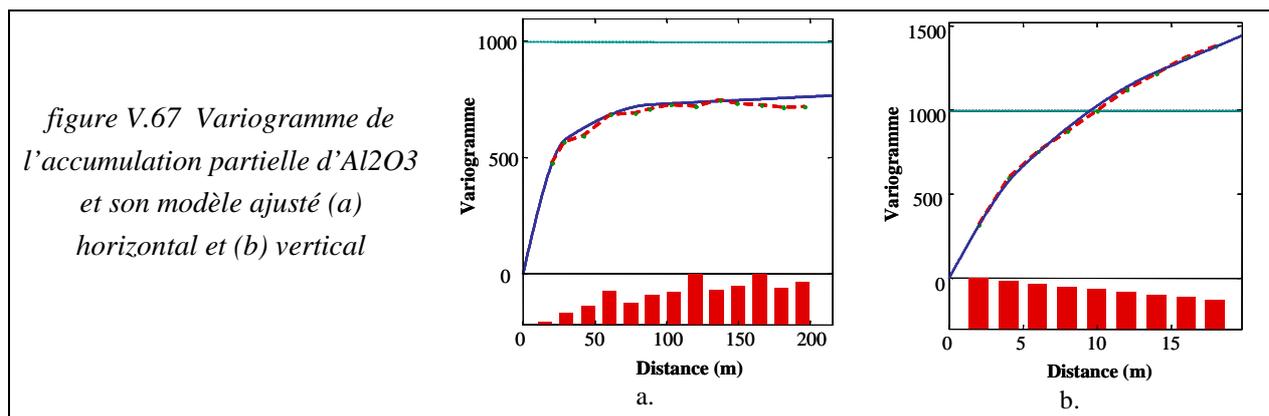


La figure V.68 présente les variogrammes expérimentaux, et le modèle ajusté pour l'accumulation partielle d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ce modèle est similaire à celui de l'épaisseur, sans lui être exactement proportionnel.

Ce variogramme s'exprime sous la forme suivante ;

$$\gamma(h) = 450 * \text{Sphérique}(30,14) + 250 * \text{Sphérique}(90,5) + 300 * \text{Linéaire}(1000, 8)$$

La validation croisée est utilisée pour choisir pour ces variables le modèle et le voisinage glissant de l'estimation les mieux adaptés. Avant effectuer le calcul du krigeage, le test de validation croisée a été fait sur les valeurs régularisées des sondages. L'estimation a été faite par un ellipsoïde ayant un rayon de recherche de 100m dans les directions horizontales et 7m dans la direction verticale. On utilise 4 secteurs pour chercher les données dans le voisinage.



Le résultat de la validation croisée est présenté dans le Tableau V.21 et le tableau V.22. La moyenne d'erreur de l'estimation de l'épaisseur d'argile par tranche reste très faible. La variance de l'erreur d'estimation apparaît faible, mais n'est pas très satisfaisante pour l'exploitant. Sur 4389 points qui ont une erreur d'estimation qui reste dans le niveau de confiance de 95%, la variance d'erreur est 0.11, ce qui correspond à un écart-type de 0.33.

Cette variance importante est due à la nature de la variable, on constate sur les variogrammes que le modèle arrive au palier à une faible distance. La structure la plus importante a une portée de 30m. Un autre fait qui augmente la variance provient de la base du calcul de la méthode de validation croisée, en ne considérant pas le point à estimer on change la géométrie d'estimation (pour plus de détails voir [Isaaks et Sirivastava 1989, Ch.20](#)).

**Tableau V.21 Résultat de la validation croisée du modèle de l'épaisseur d'argile, dans le sous domaine de BDR-NE**

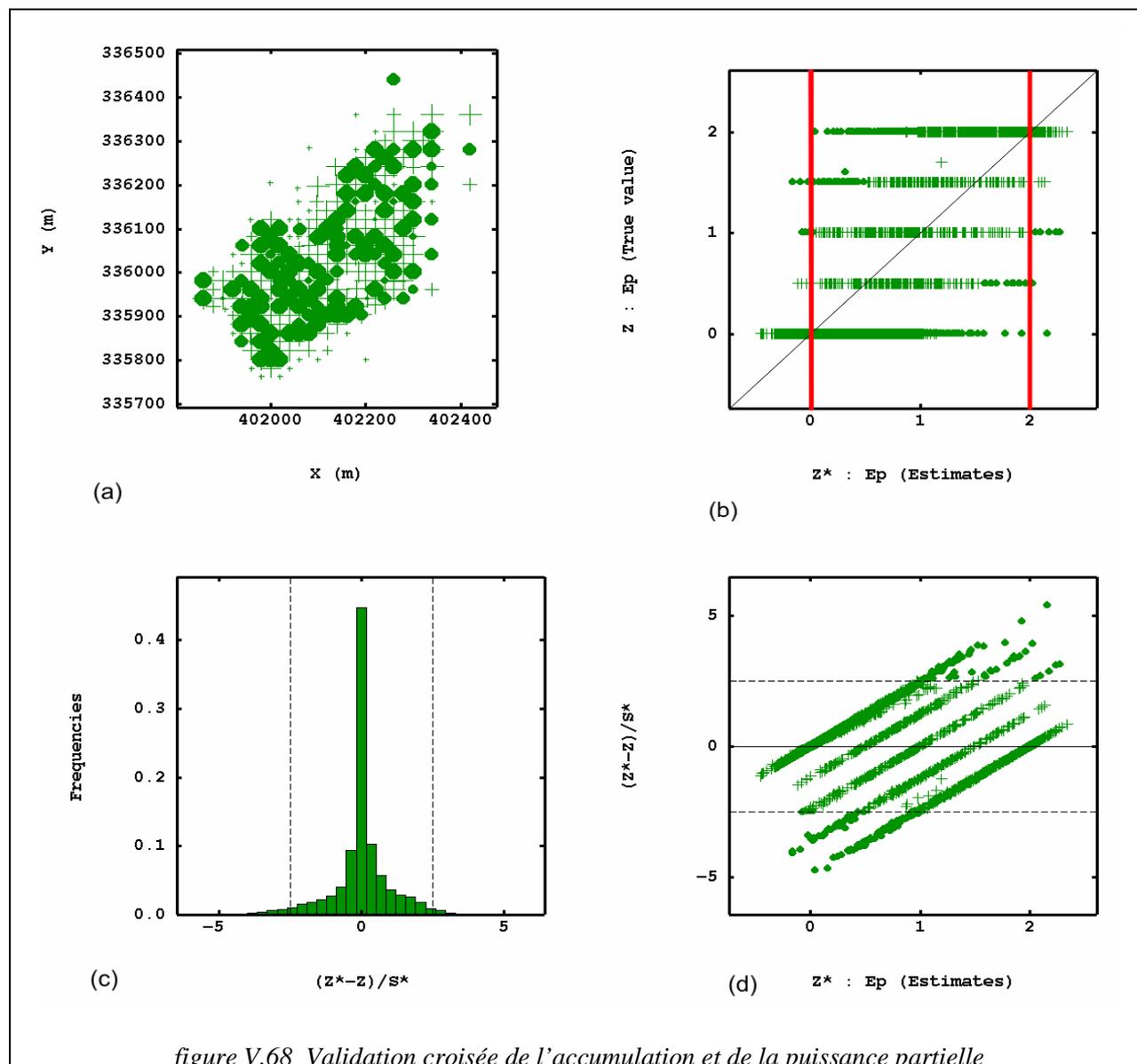
	basé sur 4607 données		basé sur 4389 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.003	0.18	0.02	0.11
Std. d'erreur	0.004	1.09	0.05	0.64

Pour l'accumulation d'alumine par tranche (ou l'accumulation partielle), la moyenne de l'erreur d'estimation est faible, mais la variance de l'erreur qui est 154 (un écart-type d'environ 12.5) apparaît importante comme dans le cas de l'estimation de l'épaisseur par tranche. Ce qui montre l'incertitude non négligeable de l'estimation.

Pour l'accumulation, le résultat n'est pas très différent. La variance reste très importante.

**Tableau V.22 Paramètres statistiques de la validation croisée du modèle de variogramme de l'accumulation d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dans le sous domaine de BDR-NE**

	basé sur 4607 données		basé sur 4268 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.20	346.08	0.61	154.74
Std. d'erreur	0.008	1.47	0.04	0.66



#### V.4.3.5. Krigeage de l'accumulation et de la puissance, calcul de la teneur en éléments principaux

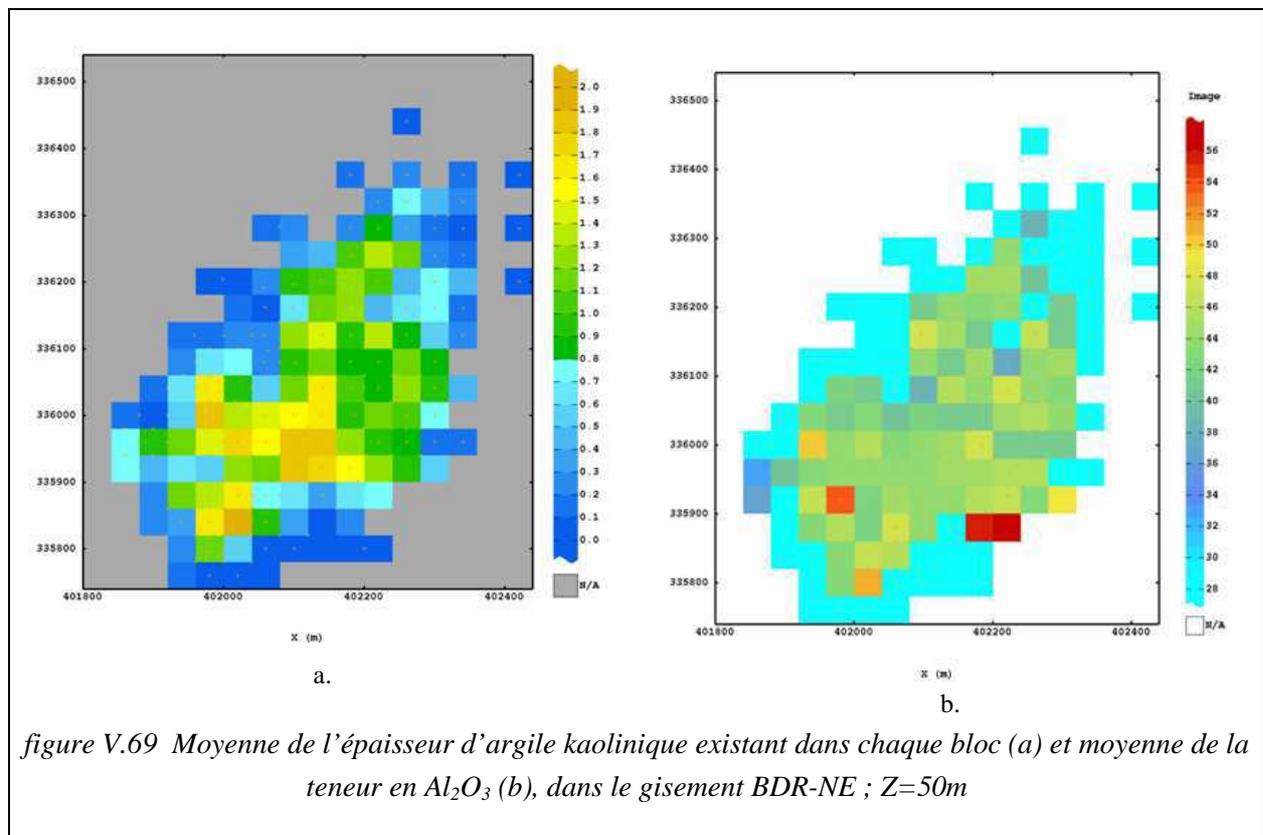
Le premier problème vient des valeurs non justifiables : l'épaisseur ne peut pas être négative et dans le cadre régularisé doit être inférieure ou égale à 2m. La forme particulière de la figure V.68.d vient de ce que l'épaisseur de l'argile dans les échantillons régularisés est un multiple d'un demi-mètre.

On corrigera cette erreur en remplaçant les valeurs négatives de l'estimation de l'épaisseur et de l'accumulation par zéro. Aucun bloc n'a une épaisseur estimée plus grande que la hauteur de banc. On utilisera l'épaisseur et les accumulations krigées pour calculer la teneur moyenne des éléments chimiques (on prendra le rapport de l'accumulation par la puissance).

L'estimation a été faite à une maille régulière de 40m\*40m correspondant à la maille d'échantillonnage dans le sous-domaine du nord-est. La hauteur des blocs à estimer est 2m, ce qui correspond à la longueur des échantillons régularisés, Pour l'estimation de chaque bloc, une discrétisation du bloc par des sous blocs de 8\*8\*1 a été utilisée. Le voisinage de recherche des données est un ellipsoïde de rayons principaux de 100m \*100m \*4 m subdivisé en 4 secteurs.

## Estimation de la qualité des kaolins des gisements du bassin des Charentes

La figure V.69 présente le résultat d'estimation pour la tranche située à Z=50m, la moyenne de l'épaisseur peut être utilisée comme fonction de récupération. Cela doit être pris en compte, lors du calcul de réserves globales.



La méthode d'estimation du gisement par banc horizontal, permet d'utiliser des résultats d'estimation pour l'exploitation du gisement tranche par tranche. Dans cette méthode, l'épaisseur d'argile dans les blocs de chaque banc est estimée et on peut l'utiliser comme une valeur moyenne de l'argile récupérable. Via cette méthode, on minimise l'effet de la géométrie des couches d'argile et du problème de la régularisation et du découpage des échantillons. Au contraire de la méthode d'estimation par l'accumulation totale, cette méthode permet d'avoir une classification des argiles de chaque bloc et d'analyser la variation verticale.

La taille de 2m est choisie pour l'épaisseur des bancs, en tenant compte de la capacité des engins d'exploitation d'AGS. Un des problèmes de cette méthode est le sens de l'épaisseur de l'argile des échantillons dans chaque tranche et la continuité verticale de l'argile. Pour les échantillons d'une épaisseur inférieure à 2m, on ne peut pas prendre en compte le positionnement exact de la partie kaolinique dans la tranche horizontale.

### V.5. Conclusion

Un des buts de cette étude est d'analyser diverses applications des outils géostatistiques dans le cas des gisements kaoliniques des Charentes. La géostatistique étant utilisée depuis longtemps pour l'estimation des gisements miniers, a prouvé sa capacité dans ce domaine. Toutefois, l'application des outils géostatistiques dans le domaine des minéraux industriels n'est pas si fréquente et dans le cas du kaolin on dispose de peu d'études publiées.

Cet état de fait provient probablement de l'homogénéité apparente des dépôts. Dans le cas des gisements des Charentes, l'importance de la précision de l'estimation à l'entrée de l'usine s'est accrue, pour respecter, lors de la production, des spécifications clients de plus en plus exigeantes. L'étude présente analyse les problèmes de mise en application d'outils géostatistiques, pour pouvoir atteindre cet objectif elle fait une critique de la mise en œuvre de l'estimation actuellement utilisée chez le producteur.

Les gisements du kaolin des Charentes malgré une apparence très continue, présentent des complexités au niveau de leurs géométries et des répartitions de teneurs de divers minéraux à l'intérieur du dépôt qui donnent différentes catégories d'argile. Dans les gisements contenant des argiles hyperalumineuses, qui constituent une part croissante des réserves d'AGS, du fait de leurs tailles assez grandes, les modèles de distribution spatiale apparaissent moins continus et plus complexes que précédemment.

La prise des échantillons pose des problèmes pour la régularisation des données qui est un des premiers pas essentiels d'une étude géostatistique. L'impact de la méthode d'échantillonnage en segment de différentes longueurs est présenté dans le chapitre précédent, dans ce chapitre on a essayé d'expliquer son impact sur le modèle du variogramme.

Le changement de la géométrie du milieu à estimer a soulevé, d'une part, de sérieuses questions sur la mise en relation des données d'un point de vu correspondant à la réalité géologique de la formation des dépôts (voir la discussion sur l'anisotropie zonale). D'autre part, il a été nécessaire d'examiner la signification mathématique et physique du support d'observation et de la cible d'estimation. La relation du volume-variance est négligée dans les cas où la variation de taux de compaction ou de décompaction entre les deux surfaces du guidage est importante.

Malgré les ressemblances observés dans le cas du gisement BDR-NE entre des variogrammes calculés sur des géométries cartésiennes et « horizontalisées », de façon générale, les variogrammes cartésiens ne sont pas utilisables directement dans l'estimation dans une nouvelle géométrie dans la quelle la relation spatiale entre les données a été changée.

L'étude variographique sur quelques gisements a mis en évidence une différence sensible entre leurs modèles spatiaux. Malgré une certaine ressemblance dans la structure spatiale des variables entre les gisements ou parties de gisement de même type, en aucun cas on ne peut se dispenser de l'analyse structurale, spécifique à chaque gisement ou à chaque sous-gisement. La différence entre les deux zones du seul gisement de BDR en est une preuve. Une autre étude a porté sur la sensibilité de l'estimation au choix du modèle de variogramme et a été menée sur la zone densément échantillonnée de BDR. La comparaison entre les résultats d'estimation avec le modèle issu d'une étude variographique détaillée et ceux issus du modèle par défaut utilisé par AGS, souligne une fois de plus la nécessité d'une étude statistique et structurale pour chaque cas, considéré individuellement.

Les variables chimiques mesurées ne sont pas des variables additives, l'impact de cette propriété est étudié sur l'accumulation des données et sur un cas d'étude. Cette étude montre que tant que les

valeurs des échantillons restent très proches, l'estimation directe de ces variables conduit à un biais faible par rapport au résultat de l'estimation géostatistique. Par contre, dans le cas de la présence locale et importante de matière organique, ces écarts deviennent importants, d'un point de vue industriel.

L'estimation de l'accumulation et de la puissance d'argile pour les dépôts mono couche et d'une faible épaisseur paraît utile. Dans le cas d'un gisement comme le BDR, où l'épaisseur de dépôt est importante et pour lequel le dépôt se compose des 2 ou 3 séquences différentes, parfois entrecoupées de lentilles de sable, on a besoin d'une méthode d'estimation dans l'espace 3D sur des unités les plus petites possibles (unités de sélectivité minière ou SMU). L'estimation du gisement en tranches horizontales permet de ne pas entrer dans le problème de la régularisation.

L'estimation de la moyenne de l'épaisseur d'argile par tranche et donnant la moyenne de la teneur de la partie argileuse dans chaque tranche horizontale du gisement, est une méthode qui peut convenir à l'exploitant. Elle permet, en effet, de gérer la délimitation sable-argile en respectant le taux de récupération estimé (la moyenne de l'épaisseur d'argile / l'épaisseur de la tranche) en connaissant la teneur moyenne pour la partie exploitable.

L'utilisation des valeurs par défaut pour remplacer les données manquantes, change l'allure du variogramme. On propose d'utiliser le krigeage de l'indicatrice et une méthode telle que l'estimation de l'épaisseur d'argile par tranche pour éviter le remplacement des données manquantes par les données fictives.

La définition des surfaces de guidage peut avoir un impact plus important sur le résultat d'estimation que le choix du modèle de corrélation spatiale. La dissimulation de l'anisotropie zonale dans le variogramme des données décompactées, est une preuve du mélange des différentes séquences du dépôt.

La maille optimale de sondage, pour l'exploitant, dépend de la fonction de corrélation de la variable et de la précision exigée de l'estimation. En se contentant d'une précision de 1.5% sur la teneur en  $Al_2O_3$ , une maille de sondage de 40\*40m sera suffisante pour les gisements les plus continus tels que Chierzac et St Georges, tandis que pour le Bois des Rentes la maille de sondage doit être plus serrée (au moins 20\*20m).

Malgré un contexte qui paraît assez éloigné des conditions idéales d'une estimation géostatistique, les outils mis en œuvre ont permis de résoudre, au moins partiellement, le problème de l'estimation dans les gisements kaoliniques des Charentes. Certains de ces outils, par anticipation comme en temps réel, tels que le calcul de la variance d'estimation et de la variance de dispersion, permettent de mieux gérer la prospection d'un gisement, puis la conduite de son exploitation.

