

Calcul de volumes sédimentaires extraits (ou déposés) à partir de levés bathymétriques successifs

Laurent de Chambure, Unité Géosciences Marines

Dans le cadre du suivi des sites d'exploitation de granulats marins, il est demandé aux concessionnaires de réaliser un levé bathymétrique afin de surveiller l'approfondissement du site et l'évolution de la morphologie du fond.

À partir d'un jeu de données acquis à fréquence régulière, nous avons voulu tester le potentiel des méthodes d'analyse géostatistique pour l'évaluation du volume de matériaux extraits à partir de levés bathymétriques successifs.

La concession du Pilier (Loire-Atlantique), faisant l'objet de telles opérations, se prête à cet exercice (figure 1).

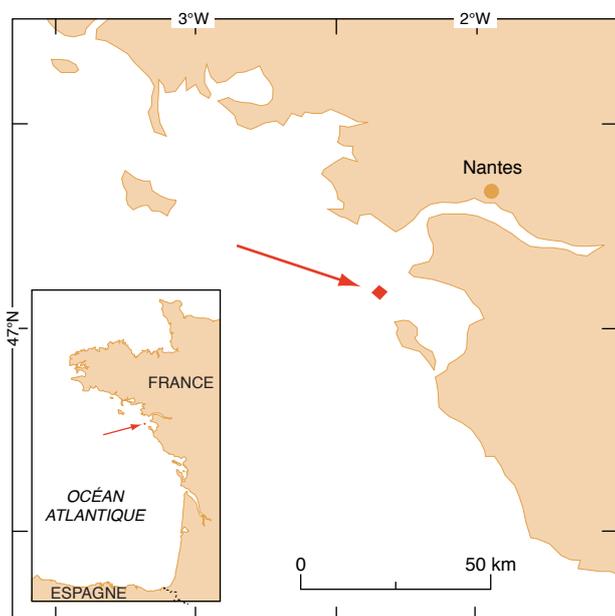


Figure 1 - Situation de la concession du Pilier (Loire-Atlantique).

La méthode proposée a pour but d'estimer le différentiel bathymétrique et son incertitude, pour en déduire un volume. Le résultat sera comparé au volume extrait et déclaré dans la même période.

Une première recommandation porte sur les conditions de base pour réaliser les levés bathymétriques et premiers traitements, à savoir :

- Même opérateur (si possible) ce qui supprime les erreurs inhérentes aux différences d'outils et de méthodologie, mis en œuvre par différents opérateurs ;
- Étalonnage du sondeur avant et après chaque séance de sondage ;
- Mesure de la vitesse de propagation du son dans l'eau de mer (effets de température et de salinité sur toute la tranche d'eau) ;
- Correction de la distance entre la surface de la mer et la base du transducteur (retard à l'émission) ;

- Correction de marée à l'aide de la marée observée ;
- Système de positionnement précis ;
- Profils transverses recommandés (même dans le cas d'acquisition par sondeur multifaisceau), selon un espacement plus lâche, afin de contrôler les mesures au croisement.

L'espacement des profils sera choisi en fonction de l'échelle finale de restitution des plans et du maillage de la grille servant au calcul ultérieur.

Cas d'étude et données disponibles

Le dragage s'effectue sur une zone d'environ 8 km², représentant la surface de la concession (enveloppe polygonale). Il est suivi périodiquement, de fait tous les ans depuis 2004, par des levés au sondeur monofaisceau. Selon les recommandations initiales, le dispositif de reconnaissance est reproduit - au moins approximativement - d'une année à l'autre.

Le levé bathymétrique annuel se réalise au moyen d'un sondeur monofaisceau et déborde autour de la concession d'une frange de 500 m, ce qui donne au final une surface cartographiée d'environ 16,5 km². Il est constitué de 28 profils espacés de 140 mètres (figure 2).

Le cas d'étude sera construit à partir de deux levés réalisés à 8 mois d'intervalle : 21 juin 2006 et 27 février 2007 (figures 2 et 3). Bien que disponibles sur plusieurs années antérieures, ces deux campagnes bathymétriques ont été sélectionnées pour leur caractère le plus homogène possible, en particulier la répétabilité du procédé de sondage.

Le volume extrait, déclaré au cours de ces 8 mois d'exploitation, est 1,441 million de m³.

Déroulement de la méthodologie pour le calcul des volumes

La méthodologie comprend 4 étapes : contrôle des données, interpolation sur un modèle numérique de terrain (MNT) commun, analyse des différences et correction de biais éventuel, comparaison et calcul volumétrique.

Étape 1 : contrôle des données

Le contrôle des données consiste à vérifier les plans de position des levés (données en entrée) ainsi que la cohérence des données par une première validation statistique. En particulier, il peut être intéressant de superposer la position des sondes de la campagne *n* avec celles de la campagne *n*+1 que l'on voudra comparer.

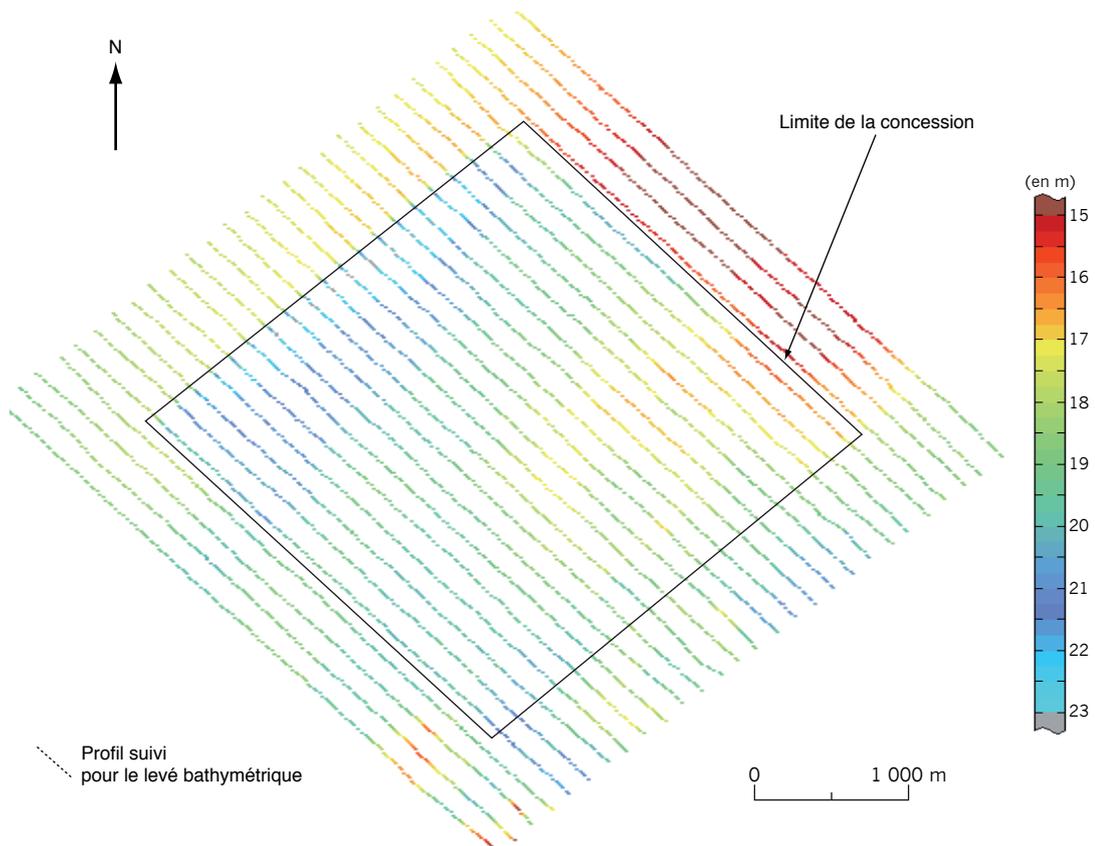


Figure 2 - Levé bathymétrique du 21 juin 2006 (4 967 sondes, profondeur 13,93 m à 23,30 m, distance inter-sonde environ 20 m, interprofil environ 140 m).

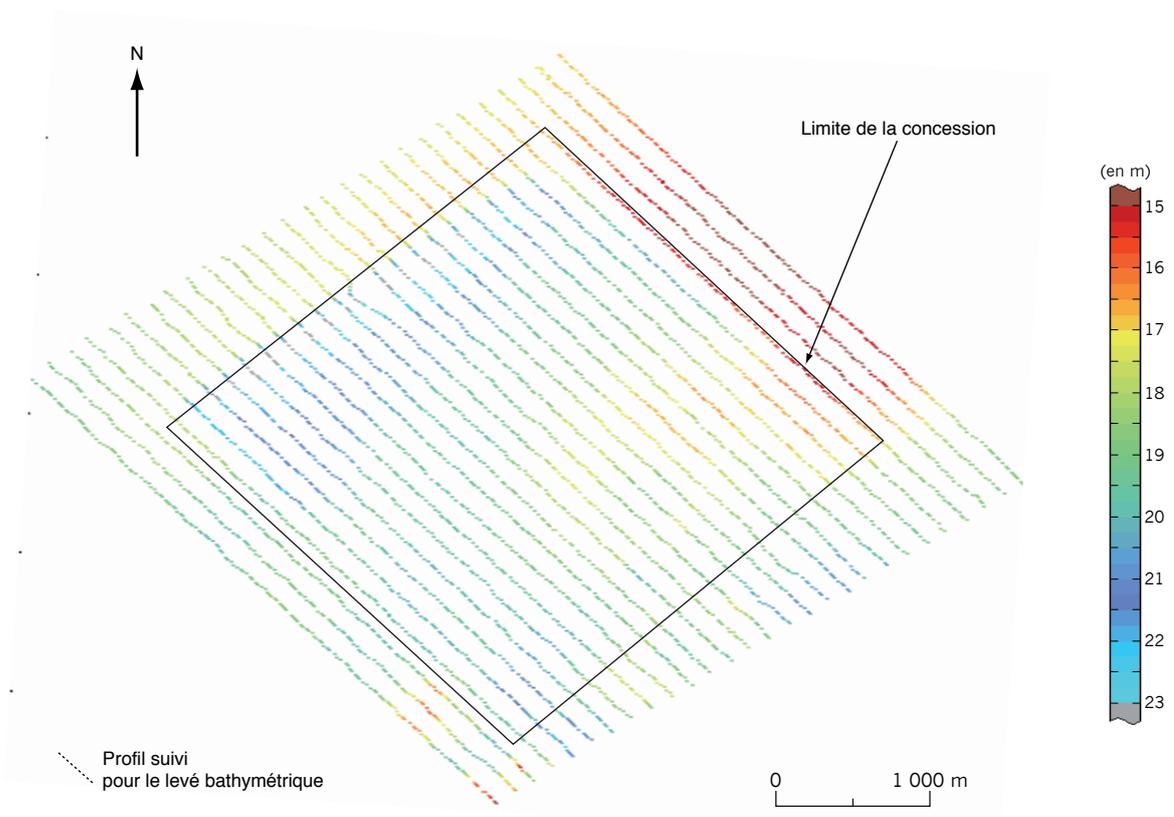


Figure 3 - Levé bathymétrique du 27 février 2007 (4379 sondes, profondeur 13,00 m à 24,90 m, distance inter-sonde environ 20 m, interligne environ 140 m).

Des techniques statistiques ou géostatistiques peuvent être utilisées pour corriger les données de sondes avant leur utilisation dans une interpolation et la réalisation de modèles numériques de terrain (MNT).

Deux étapes sont principalement utiles :

- L'analyse préalable pour éliminer des sondes puis l'application des corrections et des filtrages de la bathymétrie, par exemple les corrections liées aux variations de célérité du son dans l'eau, à l'attitude du bateau (effets du pilonnement, roulis et tangage). Ceci représente tout un volet assez vaste du traitement de données bathymétriques et ne sera pas développé ici. On peut considérer que les données du sondeur monofaisceau utilisées dans le cas présenté ne montraient pas de bruits ou artefacts à filtrer ;

- À l'issue de la correction de marée, qui est à appliquer en amont pour rendre les sondes homogènes et calées à un même référentiel, il peut néanmoins subsister des différences systématiques d'un jeu à l'autre ; c'est alors que peuvent intervenir des méthodes de recalage par surfaces de tendance telle celle présentée plus loin. La méthodologie retenue ici consiste à apporter une correction globale, de type « basse fréquence », qui sera appliquée pour pouvoir comparer les levés de 2 années successives (voir davantage, conceptuellement la méthode reste la même). Ce traitement vise à parfaire les corrections de marée qui ont du être appliquées au préalable, en partant du postulat que, en dehors des zones exploitées, le niveau bathymétrique local moyen doit rester égal (ou à différence inférieure à quelques centimètres) d'une année sur l'autre.

Étape 2 : interpolation sur un modèle numérique de terrain (MNT) commun

L'interpolation de la bathymétrie entre sondes se fait classiquement en vue d'obtenir des grilles bathymétriques dites aussi modèles numériques de terrain (MNT).

Le pas de grille peut être choisi comme la distance moyenne entre sondes fournies le long d'une ligne (par exemple : 20 m dans ce cas d'étude pour un espacement des profils de 140 m). Il est nécessaire de travailler sur une grille commune plutôt que des grilles spécifiques à chaque levé et d'utiliser les mêmes interpolateurs (par exemple un krigeage linéaire) appliqués sur les différents jeux de sondes.

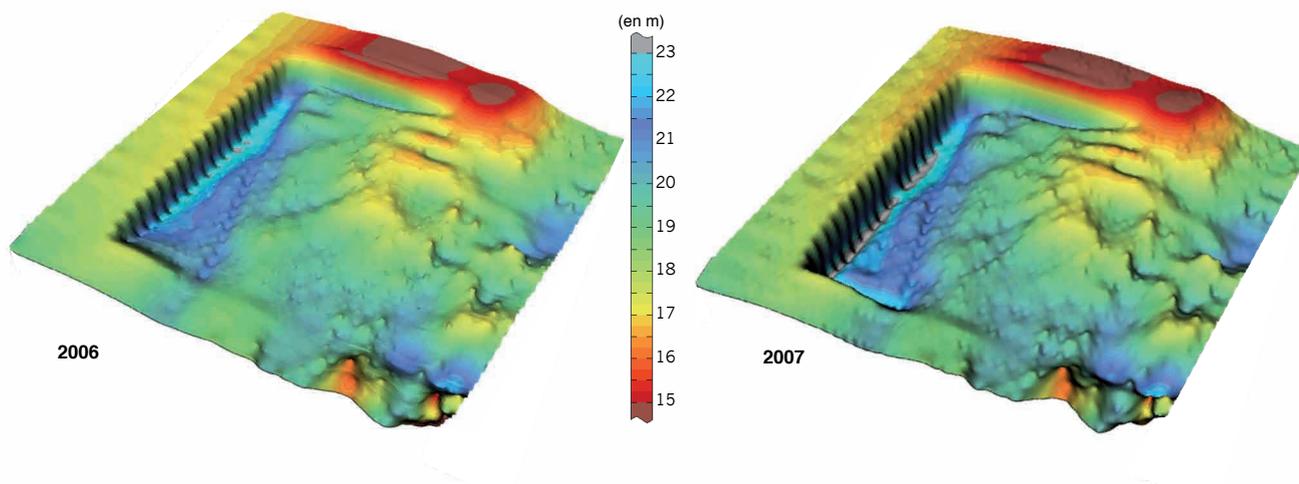
On peut formuler quelques recommandations concernant les interpolateurs à utiliser :

- MNT construit par un « interpolateur exact », tel que le krigeage linéaire utilisé dans le cas présent avec vue en bloc (figures 4 et 5) et vue en cartes (figures 6 et 7) ;

- Une variante calculée par « surface de tendance » : le plus courant étant un ajustement par une surface quadratique (figures 8 et 9).

Il est important de considérer un voisinage intégrant au moins 3 profils. Dans le cas traité, ce voisinage a été choisi elliptique, avec grand axe $R = 500$ m orthogonal aux profils d'acquisition et petit axe $R' = 200$ m parallèle à ceux-ci.

On peut ensuite procéder aux calculs de différence entre ces grilles (étape 3).



Figures 4 et 5 - Vue 3D des cartes de bathymétrie interpolée des levés 2006 et 2007. Version krigeage linéaire (logiciel Isatis 3D Viewer).

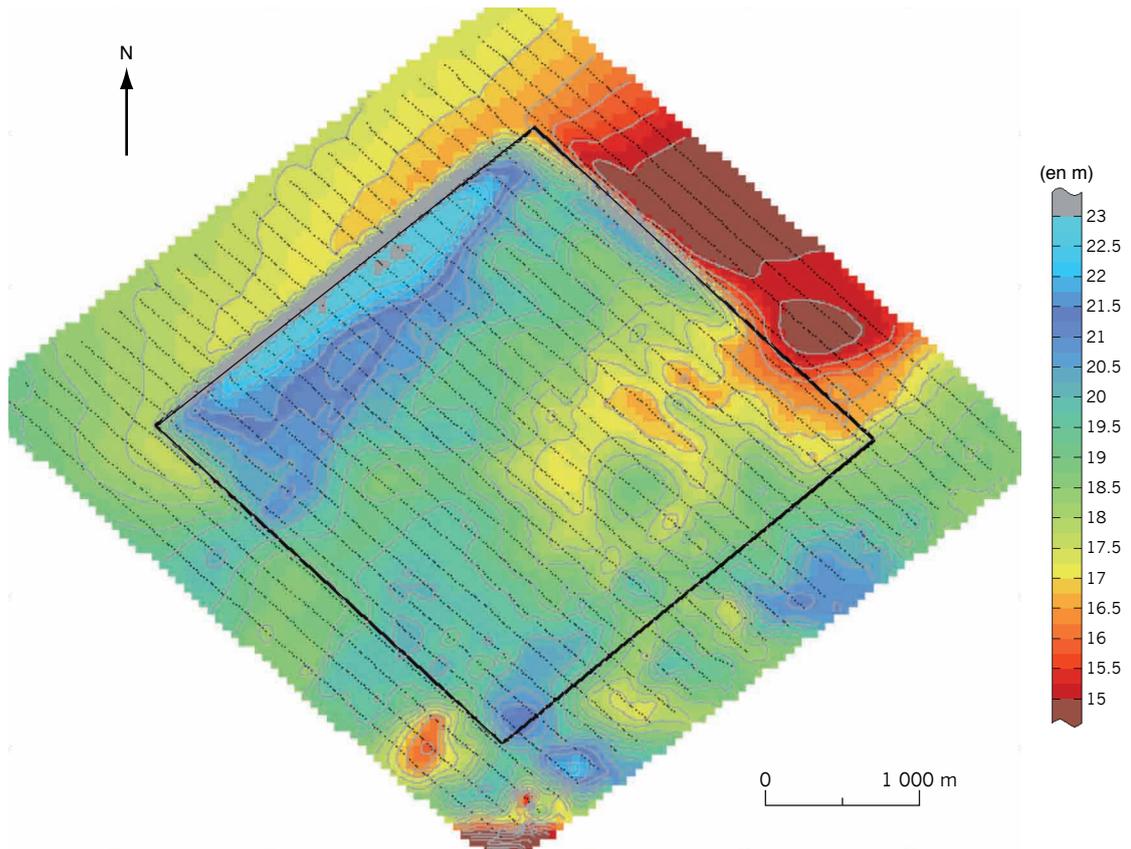


Figure 6 - Position des sondes du levé 2006 et bathymétrie interpolée. Version krigeage linéaire Isatis (intervalle des isobathes : 0,5 m).

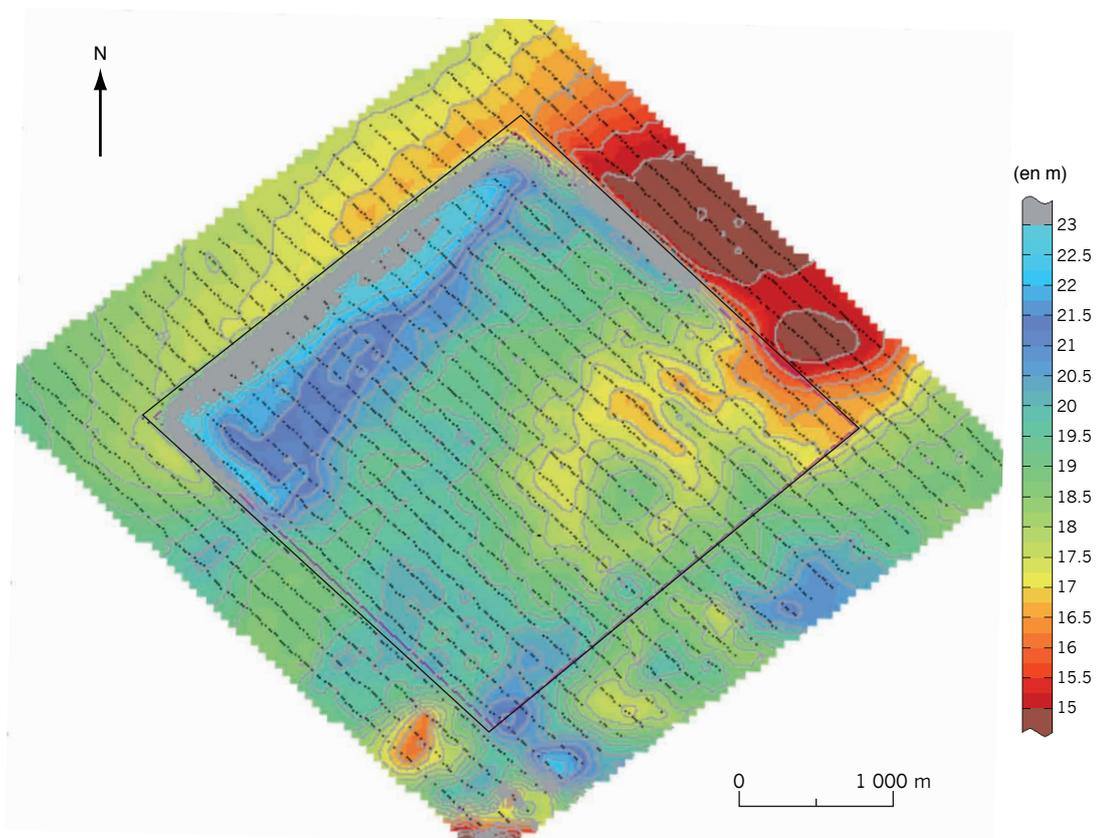
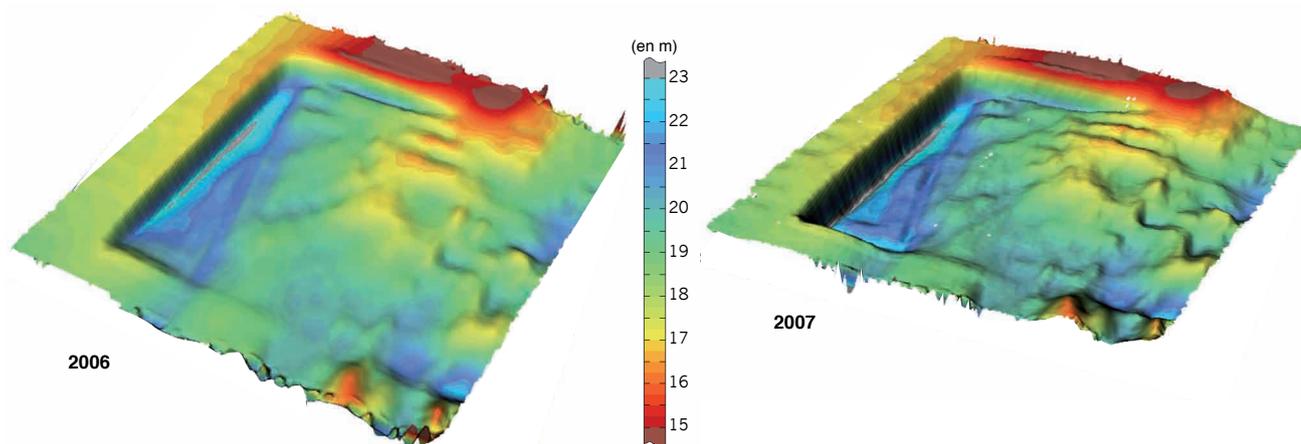


Figure 7 - Position des sondes du levé 2007 et bathymétrie interpolée. Version krigeage linéaire Isatis (intervalle des isobathes : 0,5 m).



Figures 8 et 9 - Surface de tendance pour les sondes des levés 2006 et 2007 (polynôme ordre 2). Ajustement par une surface quadratique à partir d'un voisinage intégrant 3 profils.

Étape 3 : analyse des différences et correction de biais éventuel

On procède au calcul de différences entre bathymétries calculées sur la même grille ou MNT.

On s'intéresse alors à 2 types de différences :

- La **bathymétrie résiduelle** : $Z_{res} = Z_{bathy\ n\ krig} - Z_{bathy\ n\ tendance}$ à calculer pour chaque étape (ici année n) ; $Z_{bathy\ n\ tendance}$ est la surface de tendance polynomiale calculée avec un voisinage large englobant plusieurs profils ;

- L'**écart bathymétrique annuel** (ou temporel) : $Z_{diff} = Z_{bathy\ n\ krig} - Z_{bathy\ n+1\ krig}$ à calculer entre étapes successives ($n+1$ vs n , ...) le calcul étant fait de sorte que les différences positives correspondent aux zones exploitées ou érodées, dont on souhaite calculer le volume.

La première carte dite « des résidus » permet de figurer certaines particularités de la morphologie sous marine et de vérifier si celles-ci sont cohérentes spatialement, ainsi que déterminer le degré de précision relatif de la carte (figures 10 et 11).

NB : ce traitement peut être omis si l'on veut arriver plus directement aux calculs de volumes, mais reste recommandé pour se figurer la qualité et la cohérence des données.

La seconde carte dite « des écarts annuels » permet de figurer les zones en différences et sera directement utile aux calculs de volumes, après correction de biais.

La comparaison des résiduelles (qui mesurent la structuration par rapport à un certain degré de lissage et traduit le degré de détail d'une carte) d'une année sur l'autre permet de voir et de quantifier la part des structures morphologiques qui reflètent des variations de pente ou des petites variations locales. Sur cet

exemple on montre que la plupart de ces résiduelles reste inchangée et cohérente d'une année sur l'autre, ce qui est un indicateur de bonne précision relative de la bathymétrie et d'une absence d'artefacts. C'est ce que l'on constate tant sur les cartes elles mêmes que sur le nuage de corrélation (figure 12), dans lequel les points représentent des classes de valeurs ($Z_{res\ 2007}$, $Z_{res\ 2006}$).

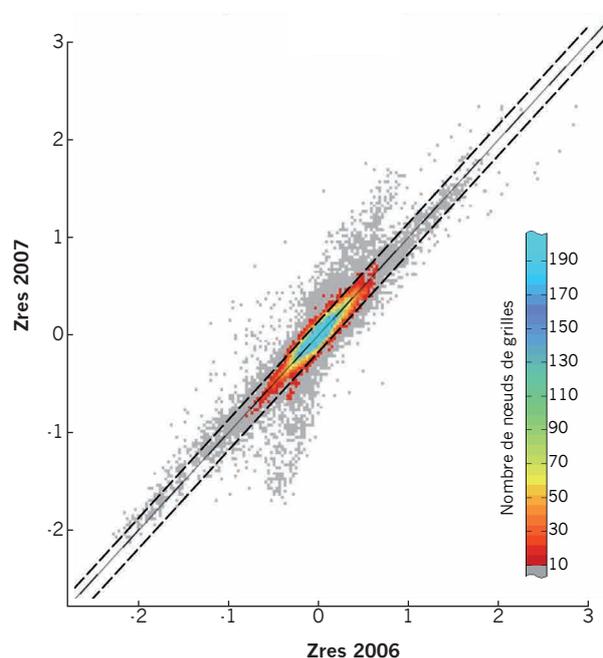


Figure 12 - Corrélation entre bathymétries résiduelles : sondes 2007 et 2006.

La seconde carte dite « des écarts annuels » permet de figurer les zones en différences. Les sondes sont des valeurs algébriques négatives. Une valeur positive de la différence (année n - année $n+1$) signifie que la valeur de l'année $n+1$ est plus profonde : il y a eu extraction ou érosion. De même une valeur négative de cette différence signifie que l'année $n+1$ est moins

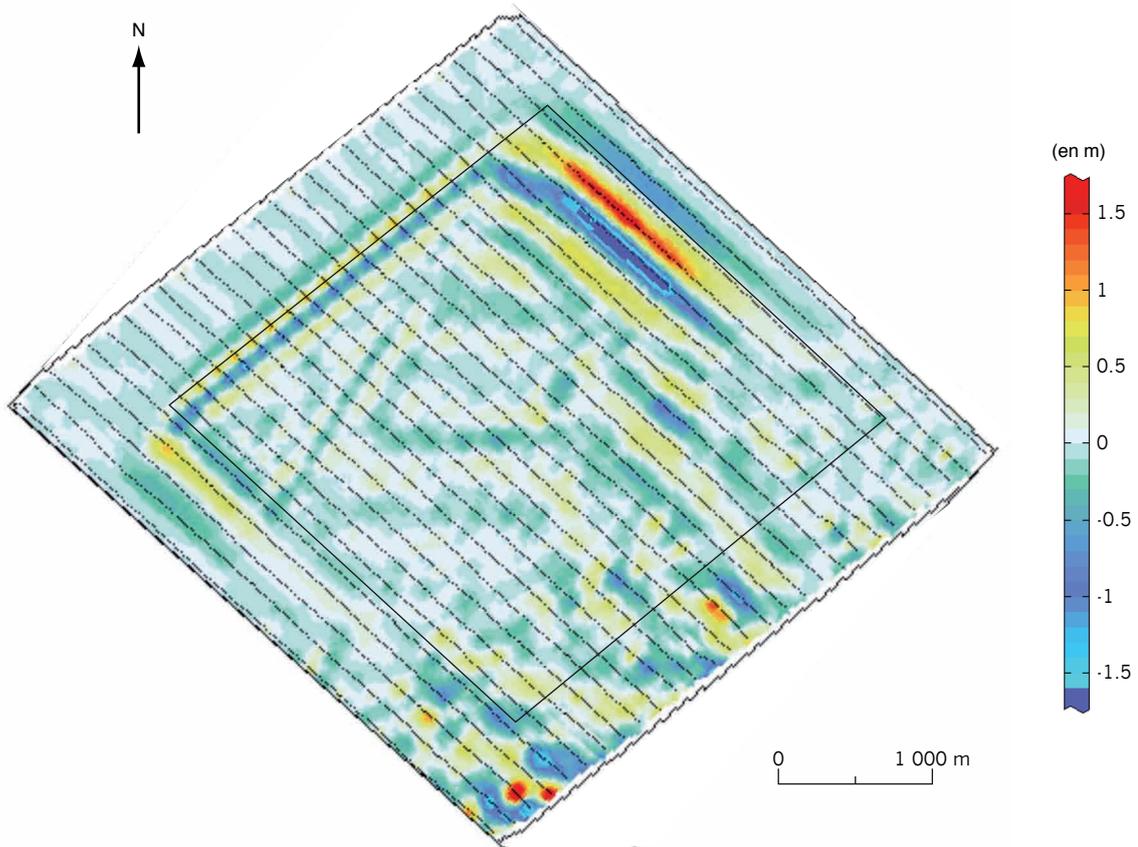


Figure 10 - Carte des bathymétries résiduelles pour les sondes 2006 (krigeage – tendance ordre 2).

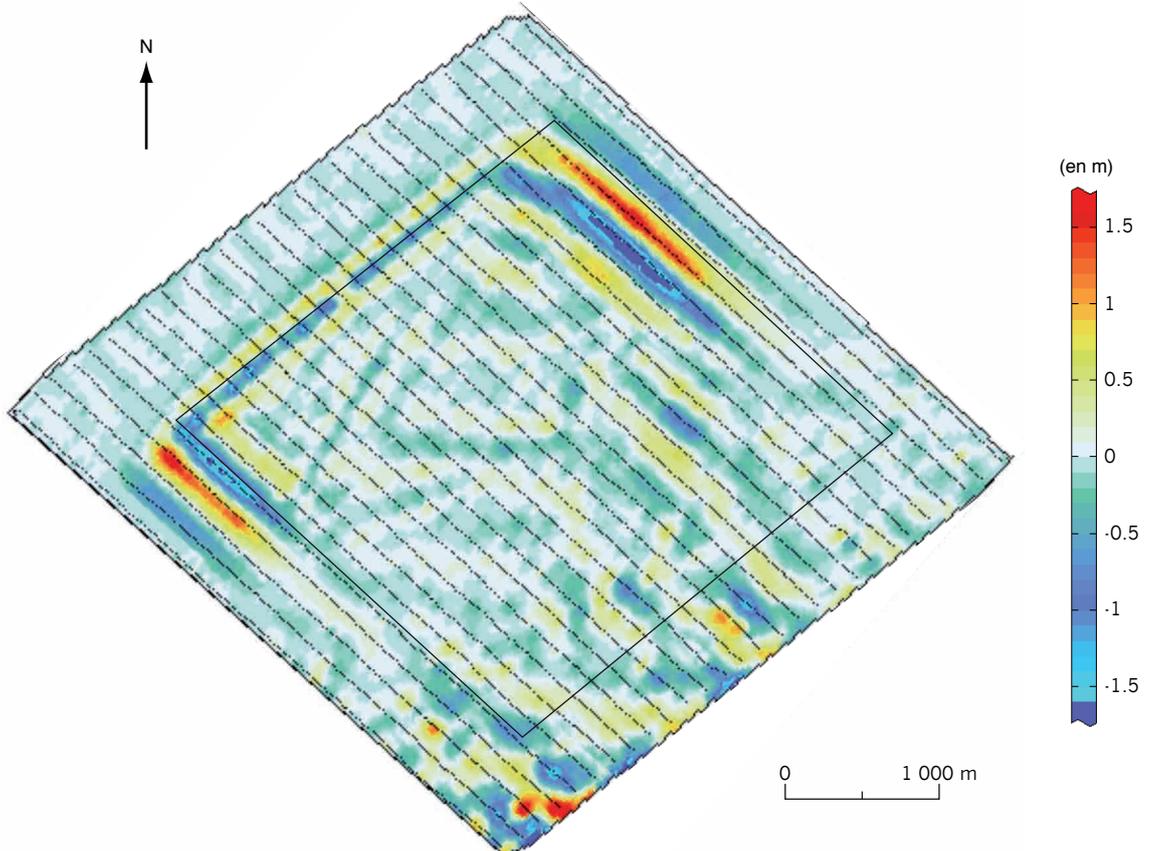


Figure 11 - Carte des bathymétries résiduelles pour les sondes 2007 (krigeage – tendance ordre 2).

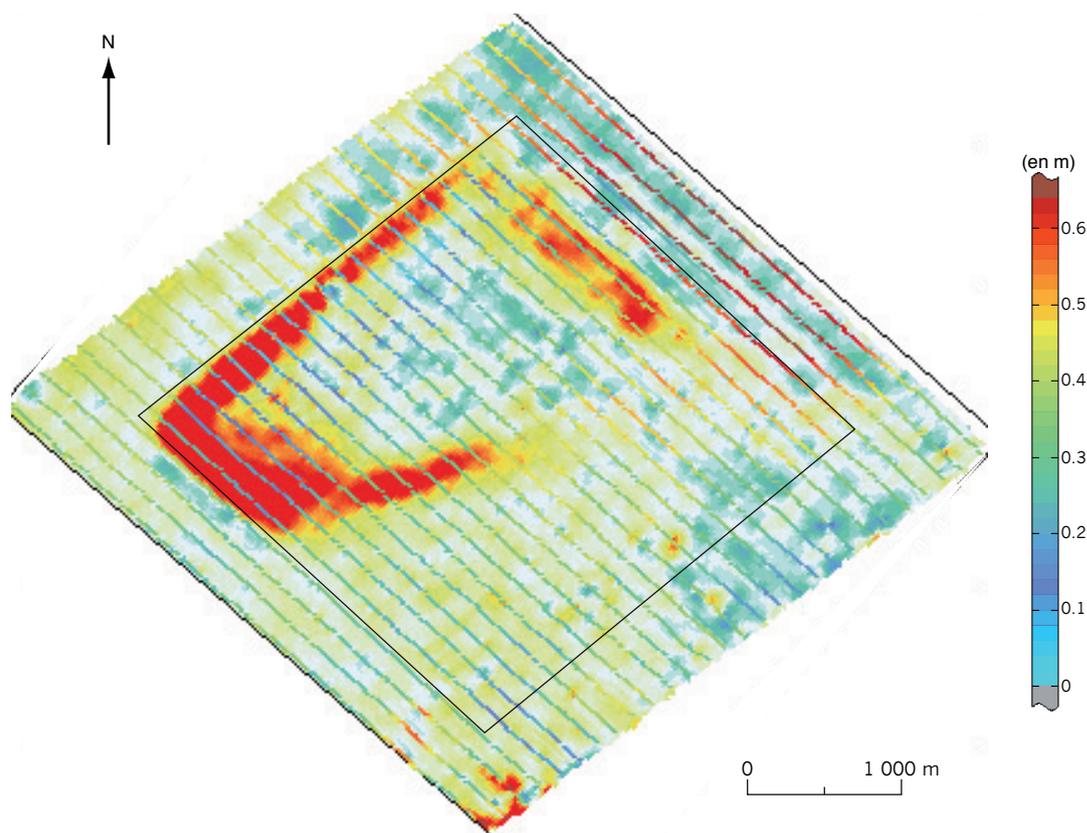


Figure 13 - Carte de différence entre les bathymétries krigées 2006 et 2007 : $Z_{diff} = (Z_{bathy\ n} - Z_{bathy\ n+1})$.

profonde : il y a eu dépôt. On distingue donc les valeurs positives (donc *a priori* touchées par l'exploitation ou éventuellement soumises à érosion), proches de zéro (invariantes – avec un seuil de tolérance à fixer) et négatives (donc *a priori* zones de dépôts ou dites « engraisées ») (figure 13).

Dans le cas traité, cette analyse de la différence entre bathymétries 2006 et 2007 montre une différence systématique, de l'ordre de 10 cm (qui correspondraient à une érosion uniforme, irréaliste en ce laps de temps) pour la surface hors de la zone *a priori* exploitée.

On peut alors parler de bais systématique, que l'on va chercher à corriger.

Pour cela, on construit une nouvelle surface de tendance créée à partir des différences sur grille (carte des *écarts annuels*) hors zone exploitée. Cette surface de tendance polynomiale, est calculée cette fois avec un voisinage très large (ici rayon de 1,25 km et 300 points) et en ayant masqué au préalable les points des zones *a priori* exploitées (ici à différence > 20 cm).

Cette carte, notée $Z_{diff\ tendance}$ (figure 14), est ensuite utilisée pour corriger la bathymétrie $n+1$ c'est-à-dire la rendre cohérente avec l'année n .

$(Z_{bathy\ n+1\ COR} = Z_{bathy\ n+1\ krig} - Z_{diff\ tendance})$.

On peut ensuite calculer directement sur le MNT la différence corrigée qui servira de base aux calculs de volume soit : $(Z_{diff\ COR} = Z_{diff} - Z_{diff\ tendance})$ (figure 15).

Étape 4 : comparaison et calcul volumétrique

À partir de la carte de différence corrigée (équivalente à la différence sur bathymétries corrigées), on calcule par intégration les surfaces et les volumes exploités. Ce calcul est restreint au domaine de différence positive supérieure à un seuil, qui sera défini après tests de sensibilité pour cerner au mieux la zone réellement excavée. De même, on peut éventuellement s'intéresser aussi aux surfaces et volumes concernés par un dépôt.

En pratique, il peut être utile de montrer une sensibilité à cette coupure et de retenir *in fine* un seuil qui, si on le connaît, correspond au mieux à la définition des limites de zones excavées.

Le calcul des volumes extraits suppose idéalement que, pour l'année considérée, le secteur sur lequel l'effort réel d'exploitation a porté soit connu, afin d'éviter la prise en compte de différences non liées à l'exploitation.

Plusieurs valeurs de coupure sur cette différence corrigée ont été testées entre 10 et 20 cm pour délimiter l'enveloppe de la zone exploitée d'après la forme de la composante géométrique résultante. Dans le cas présent, on peut retenir un coupure à 12 cm, comme la plus réaliste pour l'enveloppe de l'excavation.

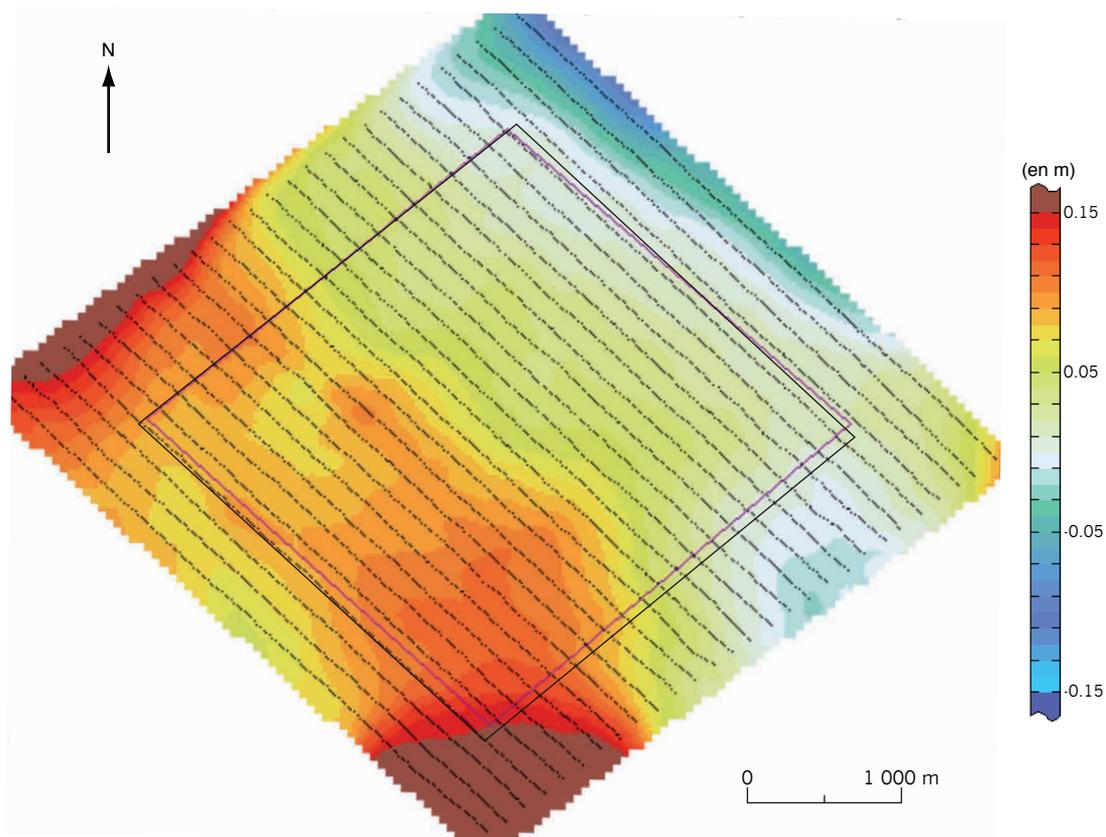


Figure 14 - Carte de correction des bathymétries 2007 : $Z_{diff\ tendance}$ (tendance des différences sur 2006 et 2007, hors zones excavées).

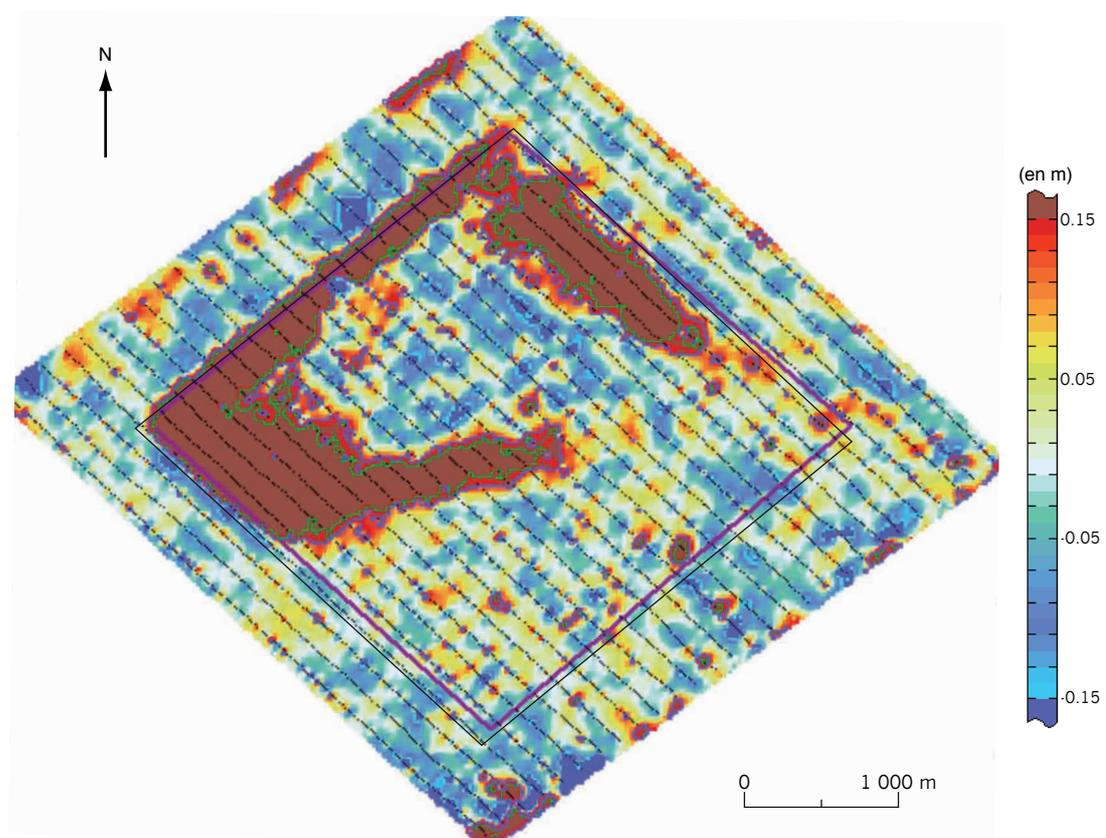


Figure 15 - Carte de différence corrigée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} - Z_{diff\ tendance}$).

Un « raffinement », nécessitant les capacités d'un logiciel permettant le filtrage ou lissage des cartes, peut consister à étudier la sensibilité du calcul de volume à un tel lissage des cartes de différences. En ce sens les possibilités d'un logiciel géostatistique tel qu'Isatis¹, qui permet l'analyse variographique et le filtrage d'une composante spatiale (courte portée) de la carte de différence par krigeage factoriel, sont intéressantes. On obtient ainsi une carte de différence filtrée sur laquelle l'enveloppe à coupure 12 cm est figurée également (figure 16). D'autres « filtrages » ou lissages par moyennes mobiles, moins « sophistiqués », restent possibles aussi (figures 17 et 18). On peut ainsi

constater et mesurer l'effet du lissage qui écrête les valeurs extrêmes.

Le calcul des volumes à l'intérieur de ces géométries, à partir de la carte de différence corrigée, et de la carte de différence corrigée puis filtrée (figure 19), est alors possible (tableau 1).

On voit que le volume calculé avec la coupure 10 cm s'approche du volume déclaré (1,441 millions de m³). Il est possible également d'obtenir les volumes correspondant à des secteurs « en engraissement » (dépôt) ; pour cela il convient alors de raisonner sur les zones de différences négatives.

Seuil sur $Z_{diff\ COR}$	Surface (km ²)	Volume (Mm ³)	Creusement maxi (m)	Creusement moyen (m)
15 cm	2,663	1,356	2,589	0,5094
12 cm	2,937	1,396	2,589	0,4753
10 cm	3,120	1,418	2,589	0,4543
8 cm	3,425	1,450	2,589	0,4233
Variante $Z_{diff\ COR}$ filtrée				
12 cm	3,074	1,386	2,251	0,4509

Tableau 1 - Calcul de volumes excavés basés sur la grille de différence corrigée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} \cdot Z_{diff\ tendance}$) en fonction d'un seuil minimum sur cette différence.

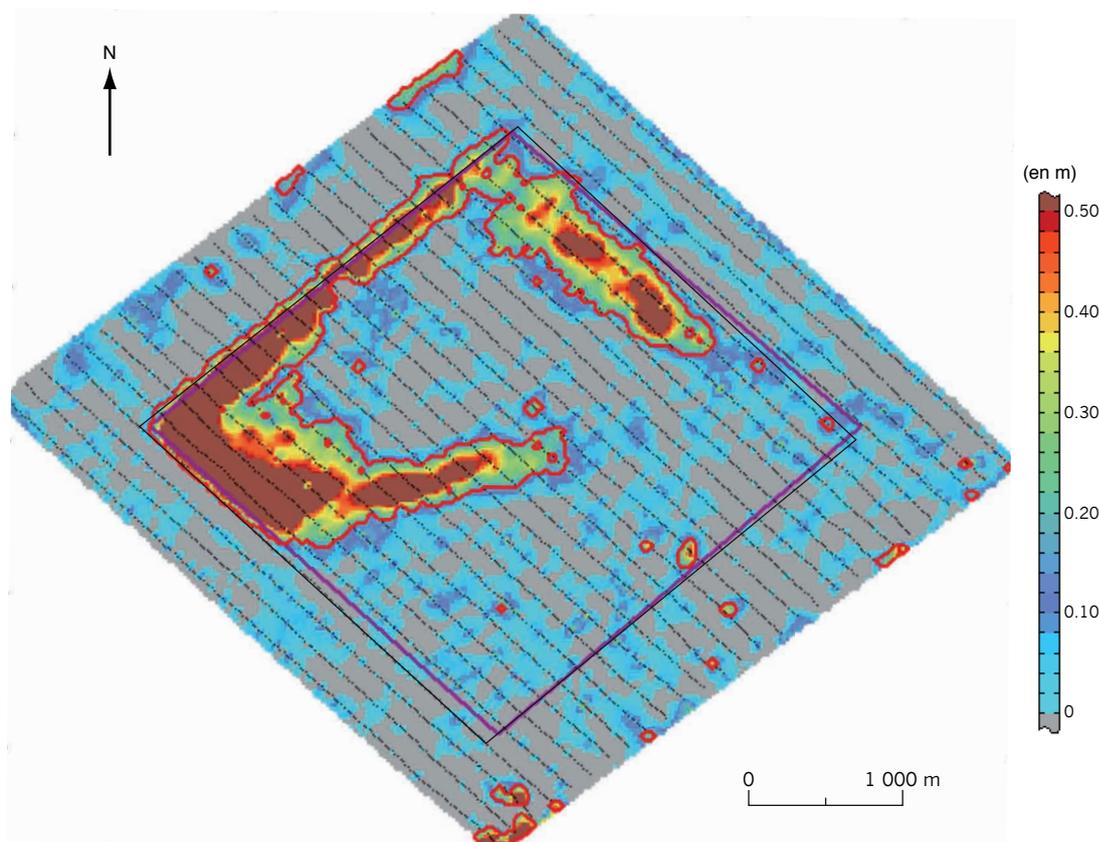


Figure 16 - Carte de différence corrigée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} \cdot Z_{diff\ tendance}$) (sensibilité à la coupure : enveloppe à coupure 15 cm).

¹ Isatis : logiciel de géostatistique distribué par la société Geovariances (www.geovariances.com).

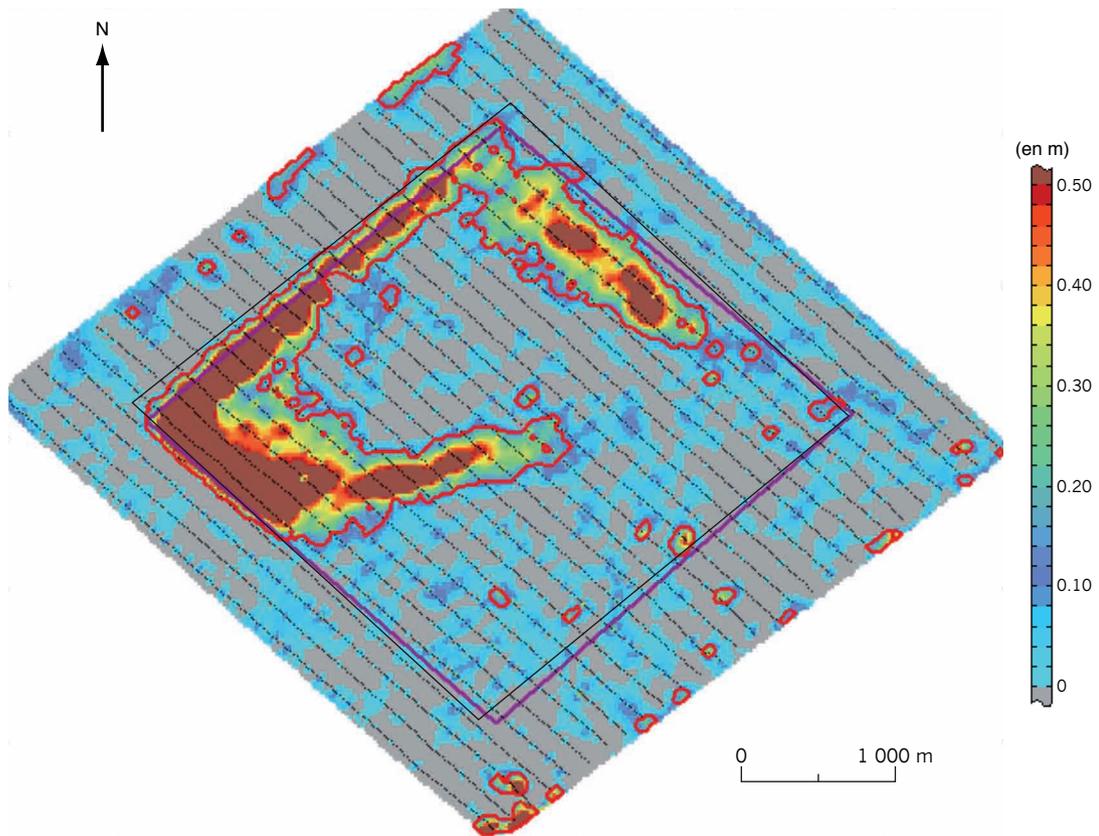


Figure 17 - Carte de différence corrigée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} - Z_{diff\ tendance}$) (sensibilité à la coupure : enveloppe à coupure 12 cm).

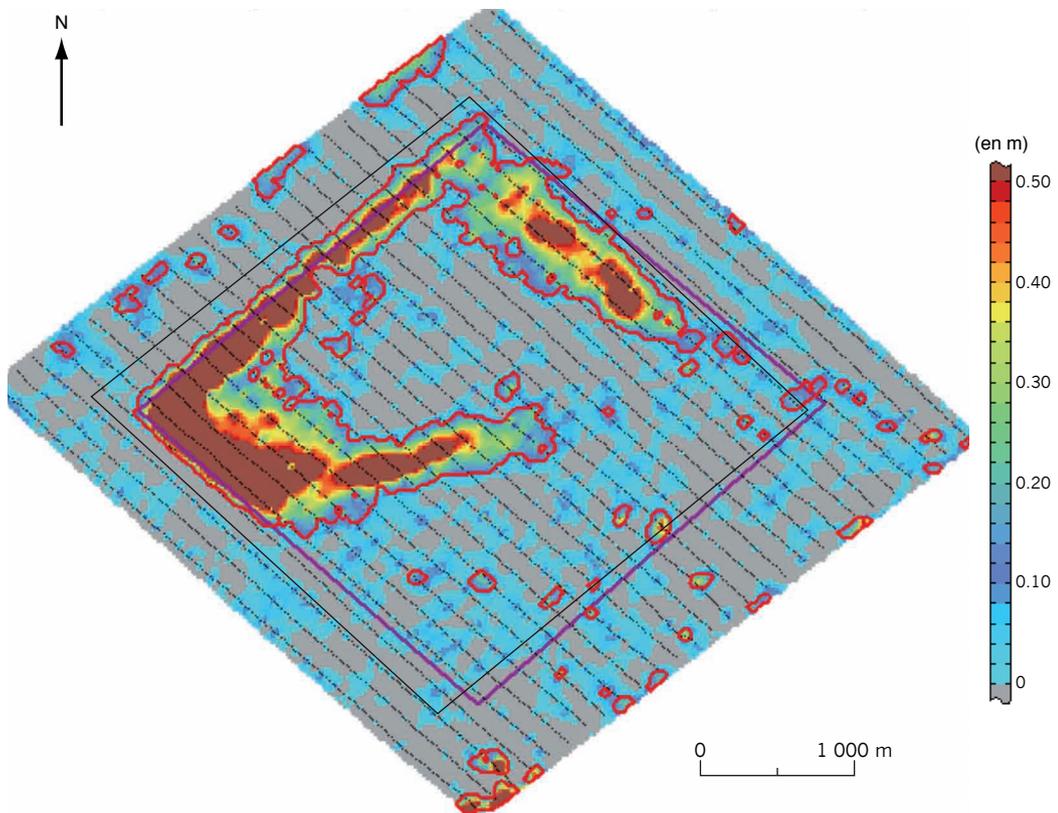


Figure 18 - Carte de différence corrigée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} - Z_{diff\ tendance}$) (sensibilité à la coupure : enveloppe à coupure 10 cm).

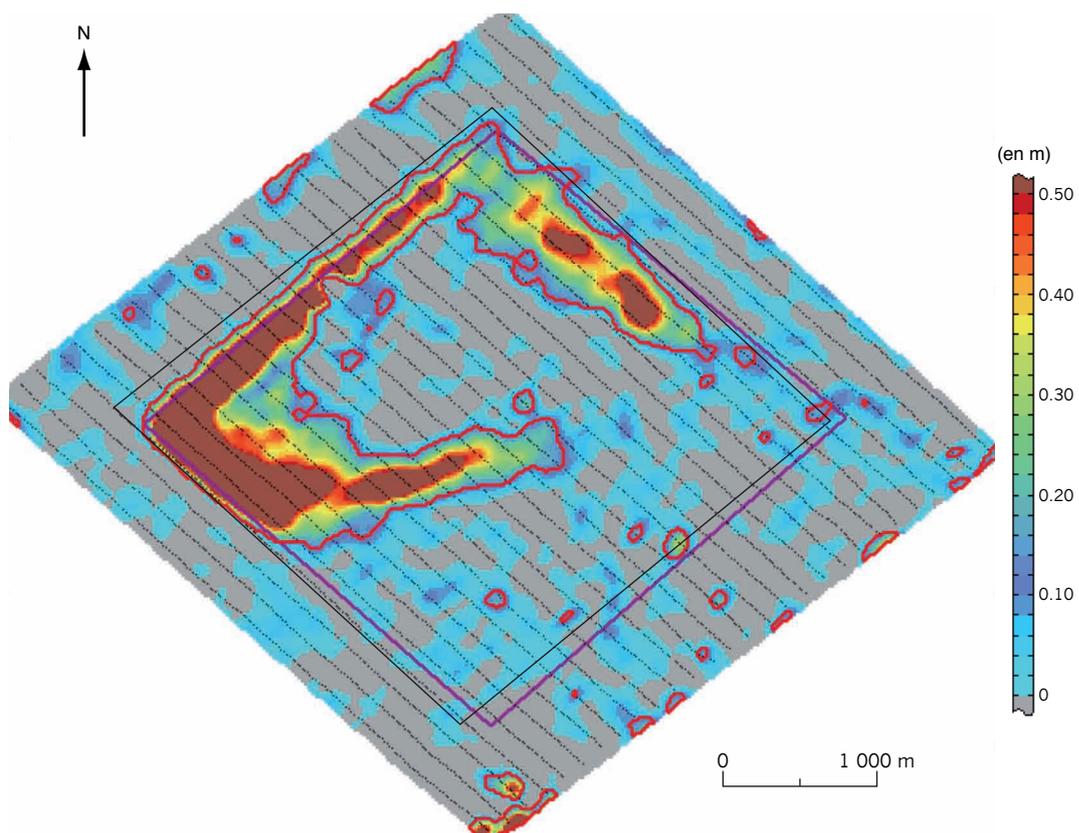


Figure 19 - Carte de différence corrigée et filtrée ($Z_{diff\ COR} = Z_{diff} - Z_{diff\ tendance}$) filt (enveloppe à coupure 12 cm).

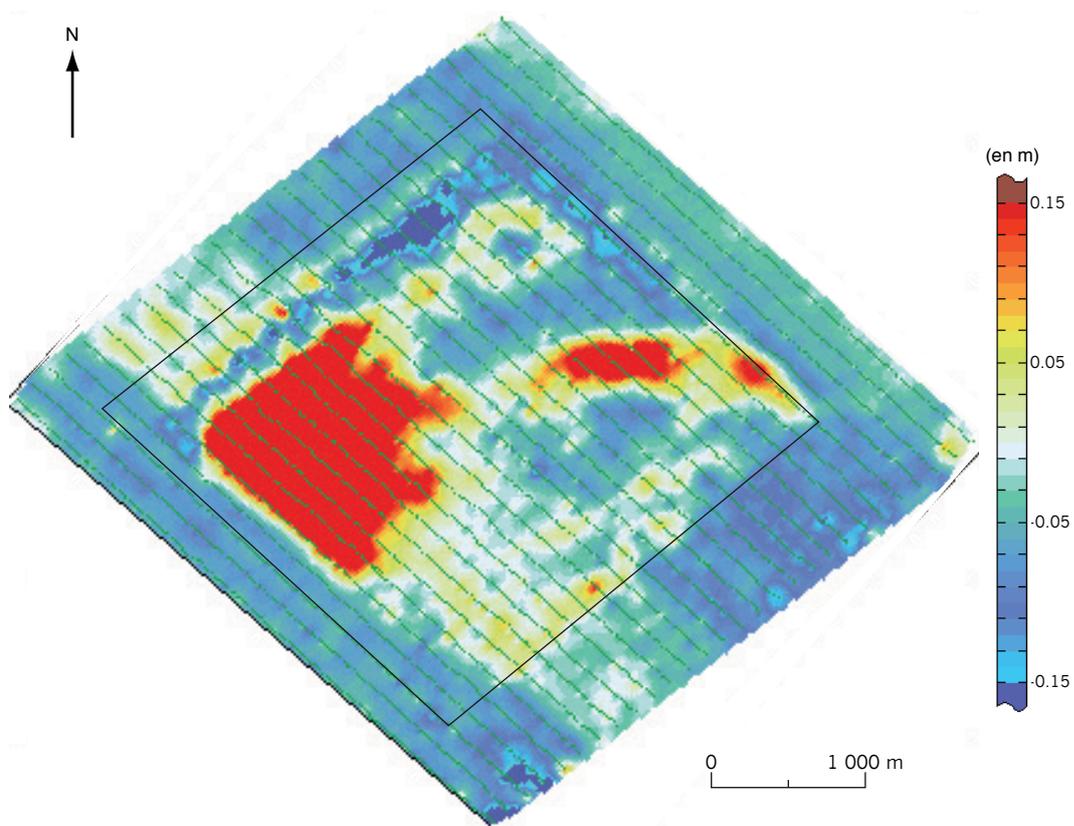


Figure 20 - Carte de différence sur bathymétries krigées avant correction ($Z_{diff} = bathy\ 2009 - bathy\ 2008$).

Conclusion - Recommandation

Cette méthodologie relativement simple à mettre en œuvre s'est avérée robuste lorsqu'on a pratiqué l'exercice sur plusieurs années successives, puisque dans le cas présent des données similaires étaient disponibles également sur les années 2004 puis 2008 et 2009. Le même type de « biais » assimilable à des surfaces de tendance de type plane ou encore simple constante de correction a été constaté et corrigé.

Ainsi si l'on considère la situation comparative 2008 vs 2009 (figure 20), on constate que les lieux d'excavation sont différents et qu'une simple constante de correction (moyenne des différences hors zone excavée) convient bien pour homogénéiser les données soit $Z_{2009} = 0,25 \text{ m} + Z_{2008}$. La même constante s'applique pour obtenir la carte différence corrigée.

Une variante à la méthode peut s'appliquer aussi dans le cas où les profils des deux campagnes sont quasiment en coïncidence. Aussi, plutôt que de travailler par différence entre MNTs établis indépendamment, comme proposé dans la méthode décrite, on peut travailler en interpolant directement les variables « différences bathymétriques ».

Pour ce faire, on migre au préalable les données de l'année n (2007) sur l'année $n-1$ (2006) ce qui peut être fait en testant différents seuils de tolérance pour la « migration », par exemple ici en considérant 5 m puis 10 m. Le même type de « biais » lié à un effet de marée résiduel est évidemment observé aussi sur ces cartes de différences brutes interpolées. De ce fait, la suite et la fin du traitement (étapes 3 et 4) reste identique et l'exercice a conduit à des résultats tout à fait comparables.

Enfin, des approches probabilistes pour le calcul de volume sont possibles également, outre les tests de sensibilités évoqués, les techniques recommandées consistent alors à utiliser des simulations conditionnelles géostatistiques qui fournissent un jeu de cartes (différences par exemple) à partir desquelles on peut, pour chacune, calculer un volume et déterminer une courbe de probabilité.

L'Ifremer remercie le Groupement du Pilier pour avoir mis ses données à disposition.