

CONSTITUTION D'UN MNT INTEGRE TERRE-MER : APPLICATION A LA BAIE DU MONT SAINT-MICHEL

Mircea Juc^{*}, Benoît Deffontaines[†]

Résumé

Le but de cet article consiste en la réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) en milieu littoral combinant des données d'origines différentes en mer, à terre et sur le littoral. Cette approche est relativement novatrice car il y a peu de relations entre les disciplines qui traitent d'informations maritimes et terrestres, alors que les processus sont eux continus. Les difficultés scientifiques et techniques étaient nombreuses de part l'origine composite et la différence de qualité des données initiales, les problèmes de géoréférencement... Ainsi, le MNT final intègre des données (1) d'origine marine acquises dans les années 1950-60 par EdF dans la baie du Mont Saint-Michel; (2) topographiques à terre issue de la BD Alti® réalisée en 1970 sur la zone; (3) de terrain des environs du Mont Saint-Michel issues de nombreuses campagnes de levés de profils topographiques; et (4) enfin de données de l'estran issues des photographies aériennes de la mission IPLI-06 qui ont été acquises à marée basse en 1982. Le MNT résultant est analysé et interprété en terme de processus géologiques et géomorphologiques actuels. Il apparaît ainsi l'importance (1) des processus érosifs à terre et des processus sédimentologique en mer; (2) les processus sous-marins sont particulièrement soulignés (rides érosives parallèles aux courant au large de la pointe du Grouin de Cancale, et dunes carbonatées orientées NW-SE au large de la pointe de Champeaux rattachées au fore-set du prisme sableux mégatidal de la baie du Mont Saint-Michel.

Mots Clés: *MNT, Photogrammétrie numérique, Bathymétrie, BD Alti®, Photographie aérienne IPLI-06, Carte de sondes hydrographiques EdF, Milieu littoral, Estran, Baie du Mont Saint-Michel, France.*

Abstract

The aim of this paper is to realize a Digital Terrain Model in tidal area combining both different topographic, bathymetric and intertidal data. This approach is quite unusual as few papers deal with such integrated onshore-offshore topographic and bathymetric approach, and there is few links between marine and continental geology despite the continuity of the geological and geomorphological processes. Numerous scientific and technical problems arise and we propose herein solutions in order to combine data of various origins, different resolution and precision...

The resulting DTM combines marine data issued from (1) the EdF hydrographic survey which data survey acquired in the 50's; (2) BD Alti® data acquired by IGN in the 70's; (3) field data close to the Mont Saint-Michel issued from numerous surveys and (4) intertidal topographic data coming from IPLI-06 low tide aerial photographs treated by digital photogrammetry under TopAero® and SOCET SET® softwares. Among numerous DTM fusion which had been tested only two gave good geological and geomorphological results and are detailed herein.

Finally the integrated onshore-offshore DTM is interpreted within the lights of the known geological and geomorphological present processes showing the importance of the alongshore drift linked to the submarine processes and the characteristics of the megatidal prism.

Key-words : *DTM, Digital Photogrammetry, Bathymetry, BD Alti®, Aerial Photography, EdF Hydrographic data, coastal environment, intertidal area, Baie du Mont Saint-Michel, France.*

Introduction

De tous temps les géologues et géographes se sont intéressés soit au domaine continental, soit au domaine marin sans relations entre eux. Et pourtant, les processus de formation du relief ne s'arrêtent pas à la côte... Il est aujourd'hui indispensable de

^{*} IGC Eurotopo S.R.L.

[†] Ecole Pratique des Hautes Etudes, Laboratoire de Géomorphologie et Environnement du Littoral

combiner les informations topographiques et bathymétriques autour du littoral pour mieux décrire, caractériser, quantifier et modéliser le milieu physique.

Par ailleurs, les deux-tiers de la population mondiale en 2010 habiteront à moins de cent kilomètres du littoral. Cette surfréquentation potentielle nécessite pour conserver et optimiser un développement durable de mieux connaître la topographie de ce milieu si fragile et si sensible aux agents extérieurs.

En guise d'application la zone choisie : la baie du Mont Saint-Michel (NW France) présente une situation physiographique unique puisqu'elle est affectée par un très important marnage (différence marée basse et haute de vive eaux, de l'ordre de 14 m) dégagant un estran sableux important. Le domaine considéré s'étend, à l'ouest, jusqu'à la Pointe du Grouin ou l'Île des Landes, à l'est, jusqu'à Avranches, au sud jusqu'à Dol-de-Bretagne, et au nord jusqu'à Granville et les Îles Chausey.

Si cette baie est soumise à un comblement long et très probablement inéluctable à l'échelle géologique, un projet ambitieux est de rétablir le caractère maritime du Mont Saint-Michel ce qui nécessite aussi une bonne connaissance de la topographie et de la bathymétrie des environs.

Le but de ce travail était de réaliser par conséquent un MNT intégré terre-mer à partir de données disparates pré-existantes tant en mer (sondages hydrographiques effectués vers la fin des années 1950 par EDF), qu'à terre (BD Alti® de l'IGN, acquisition dans les années 1970) et sur le domaine littoral d'optimiser l'interface correspondant à l'estran en réalisant un MNT à partir de photographies aériennes prises à marée basse (mission Inventaire Permanent du Littoral – IPLI - 06 en 1982). En guise de validation, nous avons utilisé des profils de nivellement précis effectués sur le terrain par les équipes de l'ENSG.

Après avoir établi les caractéristiques techniques de chaque MNT indépendamment, nous les avons intégrés en prenant en considération leurs spécificités et leurs validités respectives. Le MNT intégré terre-mer résultant présente une certaine modularité puisqu'au gré des acquisitions ultérieures, il pourra ainsi être amélioré.

Rappelons qu'il s'agit d'un produit d'origine composite qui ne présente par conséquent pas une précision constante.

Cependant de très nombreuses difficultés sont apparues tant sur les plans scientifique que technique : différence de niveau repère [0 CM et 0 NGF, modification du 0 Lallemand en 0 NGF69 à partir de 1969 (+30 cm), problèmes de conservation des données, de géoréférencement, de scannage, de l'acquisition des données, de compatibilité, concernant les mesures photogrammétriques : les problèmes de réverbération du soleil sur l'estran lié à forte réflectance de plage gorgée d'eau, de chenaux, de mares et flaques; la mauvaise corrélation automatique sur le sable, les manques de points d'appuis sur l'estran,...]. Tous ces différents points sont abordés ci-dessous.

Après une présentation succincte de la méthodologie suivie, nous détaillerons la constitution des différents MNT et leur calibrage et intégration, puis nous discuterons sur le plan géomorphologique et géologique la validité de ce MNT intégré avant de conclure.

Méthodologie générale

Origine et type des données initiales

Les données à terre

La BD Alti® de l'Institut Géographique National pour la Baie du Mont Saint-Michel a été établie par numérisation manuelle des isohypses issues des cartes

topographiques à l'échelle du 1 : 25 000, mise à jour en 1970 et équidistance des courbes de 5 m. Afin de l'intégrer avec les autres MNT, le pas du MNT BD Alti® est de 25 m pour la grille.

Les données de terrain

Les levés topographiques, pour une zone d'environ 2 sur 3 km aux alentours immédiats du Mont Saint-Michel, ont été effectués pendant une dizaine d'années par les équipes de l'ENSG sous la direction de J.-M. Léauthaud, qui nous les a aimablement communiqués. Ces données sont sous la forme de couches de points et de profils au format AutoCad (*.dxf; *.dwg). Le but de ce travail de nivellement répétitif est de suivre les variations de limites d'herbus et d'ensablement du Mont Saint-Michel avant, pendant, et après de gros travaux géotechniques qui seraient susceptibles de ralentir l'ensablement du Mont Saint-Michel (« Rétablissement du caractère maritime du Mont Saint-Michel »).

Les données sur l'estran

La partie couvrant l'estran de la Baie du Mont Saint-Michel est issue de la mission IPLI 06 (1982, échelle 1 : 20 000, recouvrement 80%, noir et blanc). Cette mission n'a pas été équipée de points d'appui (pas de GPS embarqué à l'époque de la prise de vue); c'est pourquoi les points d'appui utilisés ici ont été repris de cinq missions IGN différentes effectuées entre les années 60 et 90 et les altitudes ont été ramenés au système de nivellement NGF 69.

Les données bathymétriques

Les cartes bathymétriques de la Baie du Mont Saint-Michel ont été réalisées par EDF en 1954-1960 en vue de réaliser une gigantesque usine marémotrice entre Granville, les îles Chausey et la pointe du Grouin au Nord de Cancale. Ce barrage de près de 40 km de long aurait permis de réduire la dépendance énergétique de la France (un des grands projets du Général de Gaulle). L'usine marémotrice de la Rance a été construite peu après et permet la production annuelle d'électricité de la ville de Rennes par an (soit environ 200 000 habitants). Les six cartes des sondages hydrographiques (révélant la bathymétrie) sont aux échelles du 1 : 10 000 pour les îles Chausey, et du 1 : 20 000 pour les autres. Les levés ont été exécutés d'après des sondages hydrographiques effectués en 1954-1955 et 1957-1959. Les îles Chausey ont été particulièrement étudiées car le barrage devait s'appuyer et changer de direction a cet emplacement. Toutes les cotes des sondages sont exprimées en mètres et rapportées au zéro du NGF (*Système Lallemand*). Les coordonnées planimétriques sont celles du Système Lambert I de l'Institut Géographique National.

Descriptif général du traitement des données

Toutes les données ont été mises dans le même système de coordonnées Lambert II Carto et le système de Nivellement Général de la France 1969 (NGF 69). Le descriptif du traitement des données est présenté dans le tableau 1.

Données en entrée	Type de traitement	Données en sortie
Fichier d'altitudes en format ASCII	BD Alti® 1. Importation en format ArcInfo; 2. Constitution d'une légende appropriée.	Grille 2161 lignes, 2881 colonnes; pas de 25 m
Couches de points cotés en format AutoCad	Levés topographiques 1. Importation de AutoCad en MapInfo; 2. Transformation de système de coordonnées Non terrestre dans Lambert I; 3. Conversion des objets texte en attribut; 4. Transformation de système de coordonnées dans Lambert II;	Grille 261 lignes, 677 colonnes; pas de 5 m

Données en entrée	Type de traitement	Données en sortie
Films négatifs noir et blanc	5. Exportation de coordonnées de points 3D en format ArcInfo; 6. Création du RIT et du MNT. Mission IPLI 06 de 1982 <u>Numérisation de films</u> 1. Sélection de clichés de la baie du Mont Saint-Michel; 2. Scannage (800 dpi, 8 bits, niveaux de gris); 3. Rotation, recadrage, transformation en positif et ajustement linéaire de couleurs; 4. Sauvegarde sur CD ROM.	Images scannées de taille 7168 x 7168 pixels en format TIFF
Documents papier : registres de points, clichés, cartes	<u>Saisie de points d'appui</u> 5. Recherche et reprise de points d'appui géodésiques et photogrammétriques à partir d'autres missions; 6. Numérisation de points « alti » sur les cartes topographiques; 7. Saisie de coordonnées et redéfinition du statut de points; 8. Importation de points d'appui en SOCET SET. <u>Orientation interne et relative du bloc</u> 9. Définition du projet en SOCET SET; 10. Importation et « minification » des images en SOCET SET; 11. Orientation interne des images; 12. Description de la géométrie du bloc; 13. Génération automatique et édition de points de liaison; 14. Mesure de points d'appui sur les images.	Liste de points « plani » et « alti »
Fichiers d'orientation interne et relative	<u>Orientation absolue du bloc</u> 15. Importation de mesures (de points d'appui, d'orientation interne et relative) en TopAéro; 16. Aérotriangulation; 17. Importation de résultats de l'aérotriangulation dans SOCET SET; 18. Validation de résultats de l'aérotriangulation en SOCET SET. <u>Constitution des MNT par corrélation automatique</u> 19. Le Mont Saint-Michel et l'environ immédiat; 20. La Pointe de Champeaux; 21. Les environs de St-Benoît-des-Ondes; 22. Les Crassiers (Banc d'Hermelles); 23. La Baie du Mont Saint-Michel.	Fichiers d'orientation interne et relative des images
Photocopies papier sur fragments A3 de la carte au 1 : 10 000	<u>Cartes bathymétriques</u> 1. Scannage (254 dpi, niveaux de gris); 2. Assemblage dans Photoshop;	Fichiers d'orientation relative et absolue après compensation
Cartes papier (A0) à l'échelle 1 : 20 000	3. Scannage (254 dpi, niveaux de gris); 4. Géoréférencement; 5. Saisie de points côtes sur le fond carte dans MapInfo; 6. Transformation de système de coordonnées dans Lambert II; 7. Exportation en ArcInfo; 8. Calcul du RIT et du MNT et élimination des artefacts.	RIT et grilles dans le format ASCII, pas de 10, 25 et 50 m
MNT BD Alti®, Bathymétrie et Photogrammétrique	MNT intégré 1. Définition de poids en fonction d'altitude du point; 2. Addition pondérée de trois MNT.	Cartes scannées et géoréférencées
		RIT et grille 1473 lignes, 1321 colonnes, pas de 25 m
		Grille 2460 lignes, 2880 colonnes; pas de 25 m

Tableau 1. Descriptif synthétique des données en entrée et sortie et des traitements effectués.

Constitution de modèles numériques de terrain

Le MNT BD Alti®

La Base de Données Altimétriques est une des grandes bases d'informations géographiques structurées, initiées par l'Institut Géographique National sur le territoire français.

Le MNT BD Alti® pour la Baie du Mont Saint-Michel est calculée à partir de la numérisation manuelle des courbes de niveaux et des points cotés issus des cartes topographiques IGN au 1:25 000 (mises à jour en 1970-71). L'équidistance des courbes de la carte topographique initial est de 5 m. Bien que généralement les pas les mieux adaptés aux données de la base, en termes de qualité et de quantité, sont compris entre 50 et 100 m (cf. Descriptif technique BD Alti®, IGN, 1998), nous avons commandé le MNT au pas de 25 m afin d'une part de l'intégrer avec les autres données (maille compatible sans interpolation) et d'autre part de bénéficier sur cette zone peu accidentée d'une continuité plus fin en altitude.

L'écart moyen de l'altitude en un point donné est de l'ordre de la demi-équidistance des courbes de niveaux et l'écart maximal de l'ordre de l'équidistance. Concrètement la précision moyenne du MNT BD Alti® pour la région du Mont Saint-Michel est de 2.5 m.

Système de coordonnées de référence :

- système géodésique :	NTF
- ellipsoïde :	Clarke 1880 IGN
- méridien origine :	Paris
- projection associée :	Lambert II Carto
- système altimétrique :	IGN 1969

Le MNT estompé BD Alti® (Figure 1.) souligne plusieurs particularités géologiques et géomorphologiques sur la zone d'étude :

- Au centre et au sud de la zone, les grands massifs en formes « patatoïdes » qui apparaissent en relief par rapport à leur environnement correspondent à des granites intrusifs hercyniens (300 millions d'années). Lors de leur mise en place, ils ont métamorphosés les roches encaissantes engendrant un métamorphisme de contact visible par les enveloppes de roches dures (les cornéennes) formant une couronne en relief entourant les massifs granitiques. L'encaissant correspond à des schistes briovériens faiblement métamorphosés et plissés. Quelques filons de lave (dolérite) ou de quartz orientés généralement N-S les affectent.

- A l'ouest, le massif cristallin de St Malo est entaillé par la ria de la Rance. De nombreuses directions de failles ou de roches dures sont visibles dans la topographie et sont soulignés par les caps et les rentrants de la ria.

- A l'est le massif granitique de Champeaux constitue un promontoire de roche dure granitique intrusive difficilement érodable bien visible sur la côte Ouest de Normandie.

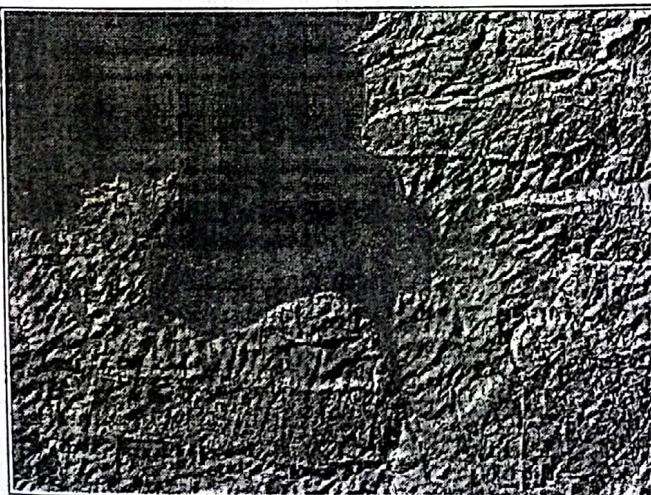


Figure 1. Le MNT estompé de la BD Alti® pour la baie du Mont Saint-Michel (l'éclairage est au Nord-Ouest avec une élévation de 45°).

Levés topographiques

Focalisé sur les environs immédiats du Mont Saint-Michel des levés topographiques sont effectués depuis 1991 par l'ENSG dans le cadre des travaux pratiques de terrains réalisés par les élèves géomètres de première année (assistant J.-M. Léauthaud) afin de suivre l'évolution à court terme de l'ensablement du mont. Les travaux réalisés sont sensiblement identiques d'une année sur l'autre: il s'agit d'effectuer le levé topométrique de la limite des herbues aux alentours du Mont, ainsi que tous les détails altimétriques susceptibles d'aider à la compréhension du phénomène hydro-sédimentaire (criches ou réseade drainage, micro-falaises, micro-sommets soulevés). Des profils sont ainsi régulièrement observés sur des positions rigoureusement identiques chaque année (cf. www.ensg.ign.fr, CPRT, Travaux sur le Terrain: La mission au Mont Saint-Michel).

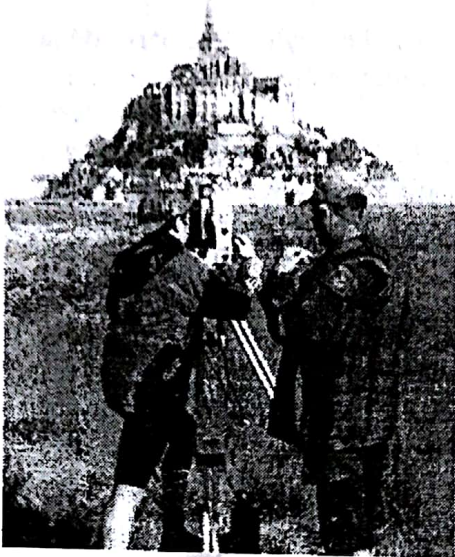


Figure 2. Levé topométrique aux alentours immédiats du Mont Saint-Michel (M. J.-M. Léauthaud à droite).

Outre la détermination planimétrique des limites d'herbus, dont on cherche à mesurer les modifications, ce lever est aussi « altimétrique » devant permettre de dresser un bilan sédimentaire, ou au moins souligner l'évolution altimétrique. Ainsi les points levés sont-ils tous caractéristiques de la morphologie du terrain (talwegs, ruptures de pente, sommets). A cet effet on utilise pour définir ces points une symbolique particulière définissant la nature de chaque point levé.

Le lever des points, des limites, et des profils localisés au voisinage du Mont Saint-Michel s'étend approximativement à 1.7 km à l'est et à l'ouest du Mont, couvrant ainsi une surface d'environ 300 hectares.

L'ensemble de ces données existantes sous la forme d'un fichier au format *.dwg, est importé sous MapInfo®. Le but étant d'extraire uniquement un fichier de coordonnées de points en trois dimensions afin d'établir un MNT issu de données topographiques terrain. 2 690 côtes (levé topométrique de l'année 2002) se trouvant après importation dans une table MapInfo® ne sont pas en système de projection cartographique. La mise en projection correcte Lambert I, la détermination de coordonnées de points, et le transfère des objets textuels en valeurs de l'attribut altitude ne demandent que quelques lignes de code Map Basic.

Après la mise en système cartographique Lambert II et l'exportation de la couche de point 3D dans le format export de ArcInfo, nous avons créé un MNT au pas de 5 m à partir de ces données.

Figure 3. Le MNT aux environs du Mont St-Michel obtenus par interpolation de levé topographique.



Ce MNT terrain (Figure 3) souligne la digue route au sud du Mont bordée à l'ouest par le Couesnon et à l'est par une criche. Les deux zones gris clair à l'ouest où le schorre se développe sont situées à des altitudes supérieures à 5 m NGF 69. La quantité de points sur l'estran au nord du Mont est plus faible ce qui explique la moins bonne qualité du MNT. Le Mont lui-même n'a pas été levé lors de cette mission de terrain ce qui explique l'absence de données terrain et la forme cartographique obtenue lors de l'interpolation.

Calcul du MNT par corrélation automatique

Mission IPLI 6, 1982

Pour établir le MNT de l'estran partiellement couvert par la BD Alti® et les données bathymétriques, nous avons choisi la mission IPLI - 06 Inventaire Permanent du Littoral de 1982 car elle est la plus complète sur l'estran à marée basse, sans couverture nuageuse, et à une échelle convenable.

Les paramètres techniques de la mission sont :

- Année de prise de vue : 1982
- Nom : IPLI-06
- Echelle : 1 : 20 000
- Caméras : UAG I 6044, UAG II 3100, UAG 417
- Emulsion : Panchromatique
- Recouvrement :
- - longitudinal : 80%
- - transversal : 15%
- Couverture : 100%

Tous les documents sont disponibles à la Photothèque de l'Institut Géographique National.

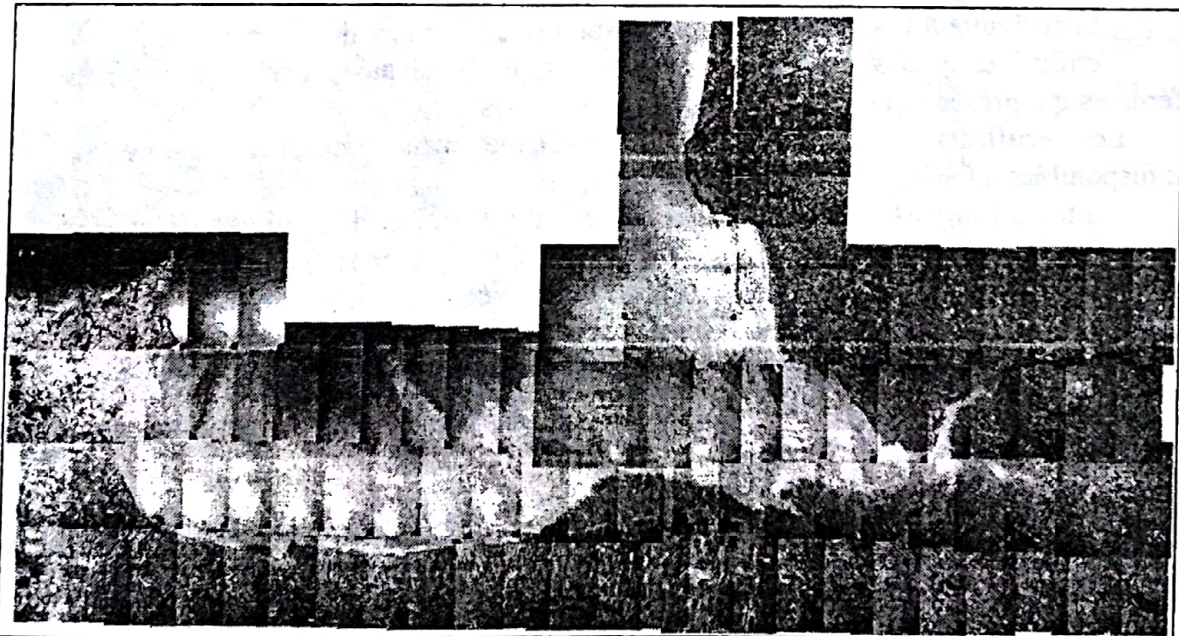


Figure 4. Tableau d'assemblage de la mission IPLI 06 de 1982 couvrant l'estran de la Baie du Mont Saint-Michel.

L'absence de points d'appuis sur le bas estran nous a obligé de traiter l'estran dans sa totalité (un seul bloc englobant l'estran de toute la baie de Champeaux à Cancale). Dans un but de simplification, nous avons décidé d'utiliser uniquement un

recouvrement de 60% des clichés, car le nombre de clichés était trop important (de l'ordre de quatre cents). Nous avons donc globalement choisi les numéros de clichés pairs. Finalement, un nombre de 104 clichés disposés sur 9 bandes ont été sélectionnés pour réaliser ce projet.

La numérisation (par scannage) des films a été effectuée en utilisant le scanneur à plat Epson GT-12000 de l'ENSG-IGN. Les paramètres de scannage choisis (résolution 800 dpi et 8 bits en niveaux de gris pour la radiométrie) sont largement suffisants pour la constitution du modèle numérique de terrain par corrélation automatique et la production d'orthophotos à l'échelle du 1 : 10 000. Rappelons que pour une échelle de prise de vue de 1 : 20 000, et à cette résolution de scannage un pixel terrain présente une taille de 63.5 cm.

Après un traitement sur Adobe Photoshop®, qui consistait en rotation, orientation, recadrage, transformation en positif et ajustement (linéaire) de niveaux, les images dont la taille unitaire est de 7168 x 7168 pixels ont été enregistrées en format TIFF.

Le tableau d'assemblage du bloc, réalisé sous Adobe Photoshop® par mosaïquage (Figure 4), a été indispensable à toutes les phases suivantes d'aérotriangulation et de création des MNT par corrélation automatique.

L'Aérotriangulation

L'aérotriangulation de ce bloc a soulevé les problèmes suivants liés à :

- la géométrie du bloc qui est assez complexe (7 bandes horizontales qui se chevauchent, et 2 bandes verticales à l'est);
- les deux bandes verticales ne se recouvrent pas dans la partie nord;
- la mission n'a pas été équipée avec des points d'appui, absence de mesures GPS embarquées;
- inexistence de points d'appui sur l'estran dans les zones sableuses et vaseuses;
- la difficulté de saisie de points de liaison liée à la texture de l'estran;
- enfin, les prises de vue de la baie ont été effectuées par trois caméras différentes qui présentent des caractéristiques différentes.

Les certificats de calibrage des caméras valable au moment de la prise de vue sont disponibles à CREIL (IGN).

Un travail important de recherche et de reprise de points d'appui géodésiques et photogrammétriques à partir d'autres missions était alors indispensable. Ce travail a été réalisé au SPCN de l'IGN. Cinq missions ont été analysées minutieusement :

- 1) FR 1046-1346 / 150 de 1998
- 2) FR 5141 / 150 de 1996
- 3) FD 22 / 300 de 1993
- 4) F 1216-1316 / 300 de 1974
- 5) F 1115/1315 / 400 de 1966.

Une liste synthétique de 88 points d'appuis représentatifs avec la description détaillée et le type redéfini de point a été établie. Afin de mieux contraindre le bloc à l'aide de points d'appuis, nous avons saisi sur les cartes topographiques IGN au 1 : 25 000 environ 200 points bien identifiables. Ces points sont utilisés en tant que points « alti » (points Z). Pour la même raison, une douzaine de points est saisie sur les mêmes cartes topographiques dans la zone de basse mer. Tous ces points sont importés dans SOCET SET® suivant la procédure et la description demandée.

Seuls les grandes étapes et surtout les problèmes rencontrés lors de la production seront développés ci-dessous. Le lecteur intéressé est renvoyé au manuel d'utilisateur de SOCET SET pour des détails plus techniques.

Après avoir effectué l'orientation interne et relative du bloc, et marqué les points d'appui sur les images, les données nécessaires sont rassemblées pour trianguler le bloc.

L'aérotriangulation a été effectuée en utilisant le logiciel TopAéro®. Ce logiciel est développé et utilisé à l'IGN. En effet nous l'avons préféré au logiciel de SOCET SET pour les raisons suivantes : (i) dans TopAéro la compensation s'effectue selon la méthode des faisceaux, résolue par itérations successives de moindres carrés, et, par contre, la méthode de compensation utilisée dans SOCET SET est inconnue pour nous; (ii) le calcul est interactif : dans TopAéro à tout instant il est possible de changer les paramètres de calcul, l'activité de certains points,... ce que n'est pas le cas dans SOCET SET; (iii) en effet, le module de triangulation ORIMA désigné pour les stations LH Systems est fourni séparément.

Le programme TopAéro présente une flexibilité appréciable, de nombreuses possibilités pour l'utilisateur de détecter et de corriger les fautes au moment de la mise en place approchée; pour travailler sur des sous-blocs, puis de récupérer les paramètres déjà calculés pour la mise en place approchée de l'ensemble; pour le contrôle total du processus de compensation (activations / désactivations de mesures et dédoublement des points, et décision du moment où le calcul a convergé). Dix sept clichés ont été éliminés au cours des calculs d'aérotriangulation surtout dans la partie basse-mer du chantier principalement suite à l'absence de points photogrammétriques.

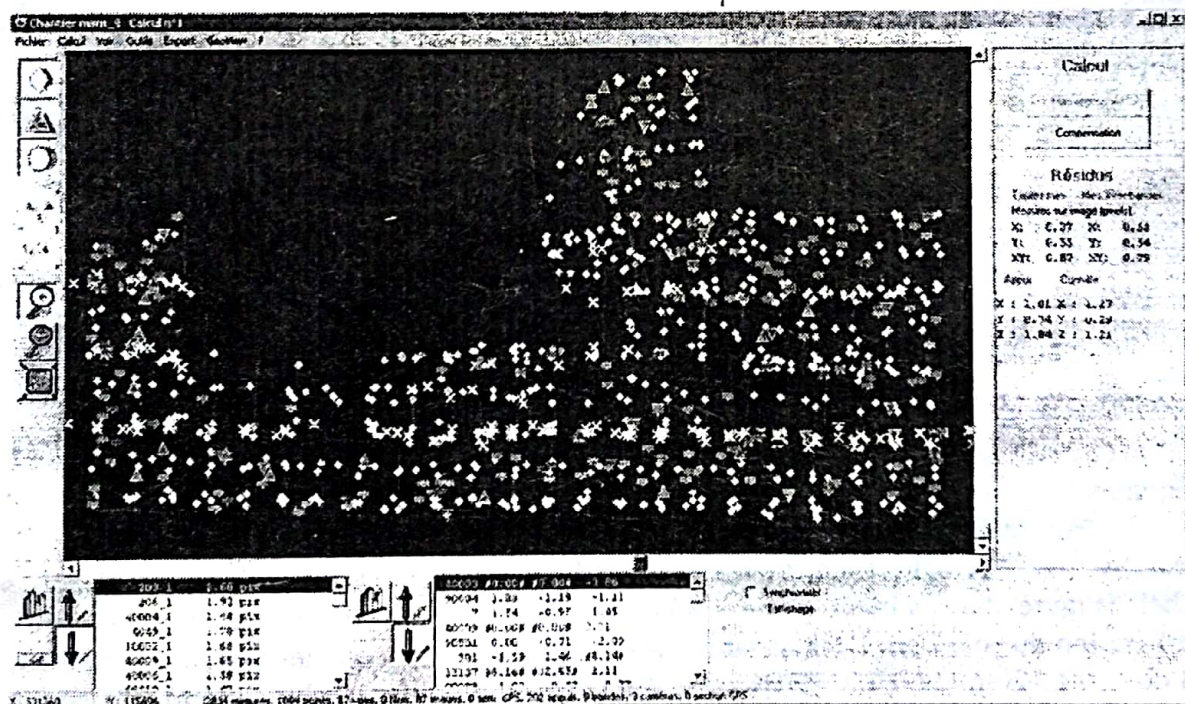


Figure 5. Les points utilisés dans l'aérotriangulation

Les caractéristiques principales du modèle d'aérotriangulation sont les suivantes : 3 caméras; 9 bandes; 87 clichés; 202 points d'appui; 1094 points; 2834 mesures. Graphiquement les résultats des calculs sont présentés dans la Figure 5.

Les résidus après compensation sont les suivants :

– pour les points d'appui :

$\sigma_x = 1,01$; $\sigma_y = 0,74$; $\sigma_z = 1,04$;
 - pour les points de control :
 $\sigma_x = 1,27$; $\sigma_y = 0,29$; $\sigma_z = 1,21$.

Les résultats de compensation du bloc nous paraissent conformes et explicables. On observe, que les résidus aux points d'appui sont comparables avec les écarts aux points de contrôle. L'explication est liée à la même provenance des points : tous ont été repris d'autres missions et la plupart par « repiquage » ou des cartes au 1 : 25 000. Pour la même raison (le repiquage de points), leur répartition est non uniforme sur le chantier. De plus, l'échelle de prise de vue 1 : 20 000 permet la réalisation de produits cartographiques à l'échelle comprise entre 1 : 5 000 et 1 : 10 000 avec une précision de positionnement de 1 à 2 m.

Les résultats d'aérotriangulation sont exportés en format PATB. Pour achever l'aérotriangulation dans SOCET SET, il reste, après l'importation de fichiers, à refaire formellement la procédure *Simultaneous Solve*, ce que nous avons effectuée bande par bande.

Une fois la photogrammétrie résolue, nous avons abordé les phases suivantes.

Calcul du MNT par corrélation automatique

La procédure *Automatic Terrain Extraction (ATE)* de SOCET SET couvre entièrement le processus d'extraction du modèle numérique de terrain. Cette application est très importante, car le MNT est le fondement de la plupart des produits photogrammétriques numériques : plus le MNT est précis, plus les produits finaux seront conformes.

Dans SOCET SET existent deux méthodes de calcul des élévations : adaptative ATE et non-adaptative ATE. La méthode adaptative utilise un moteur d'inférence (ressemblance) pour générer la stratégie de corrélation en fonction du terrain; la stratégie non-adaptative demande que celle-ci soit spécifiée par l'utilisateur. Une douzaine de stratégies non-adaptative sont proposées au choix. De plus, l'utilisateur peut développer ses propres stratégies.

De toute façon une correction interactive est obligatoire, et a pour conséquence que, si l'opérateur ne voit pas le relief en vision stéréoscopique, il y a très peu de chances, que le corrélateur automatique soit capable de corrélérer proprement à cet endroit.

Nous avons fabriqué plusieurs MNT pour la région d'étude en RIT et sur une grille avec un pas de 10, 25 et 50 m, pour toute la région en appliquant des stratégies différentes.

La Figure 6 présente le MNT de l'estran. Un travail interactif de correction est nécessaire : par exemple, les altitudes dans le MNT calculé de la baie du Mont Saint-Michel (Figure 6.a) varient entre -500 et +350 m (imprécision liée à la forte réverbération du soleil sur l'estran sablo-vaseux réessuyé) alors que les altitudes réelles sont de -10 à 120 m. SOCET SET® offre des larges possibilités d'édition du MNT, qui sont concentrées dans la procédure *Interactive Terrain Edit (ITE)*, et qui sont organisées en trois groupes : édition par poste, surfacique, et géomorphique.

A titre d'exemple, le MNT du Mont Saint-Michel a été entièrement édité en utilisant la procédure d'édition point par point.

Il est bien connu, que la corrélation automatique fonctionne correctement sur des zones ayant une forte texture, par contre, dans les zones homogènes (sable, couvertures herbues, etc.) ou avec une réflexion importante, le coefficient de corrélation est faible.

Afin de lancer et aider l'extraction automatique du terrain (ATE), nous avons utilisé les levés topographiques, le MNT corrigé du Mont Saint-Michel, et les données bathymétriques, même si ces dernières ont été acquises 25 années plus tard au cours desquelles la topographie a évolué (sédimentation et érosion). Avec ce « prédicateur » la corrélation marche mieux, mais de toute façon, dans les endroits « difficiles » on obtient des valeurs généralement fausses. Le MNT de la Baie du Mont Saint-Michel au pas de 25 m a été soumis à une édition plus rigoureuse dans la partie estran, puisque nous souhaitons l'intégrer avec les MNT BD Alti® et bathymétrique.

Les MNT produits sous SOCET SET® ont été créés dans le système de coordonnées Lambert I puisque les coordonnées de points d'appui étaient dans ce système. Nous les avons ensuite transformés dans la projection cartographique Lambert II Carto (commune aux autres données).

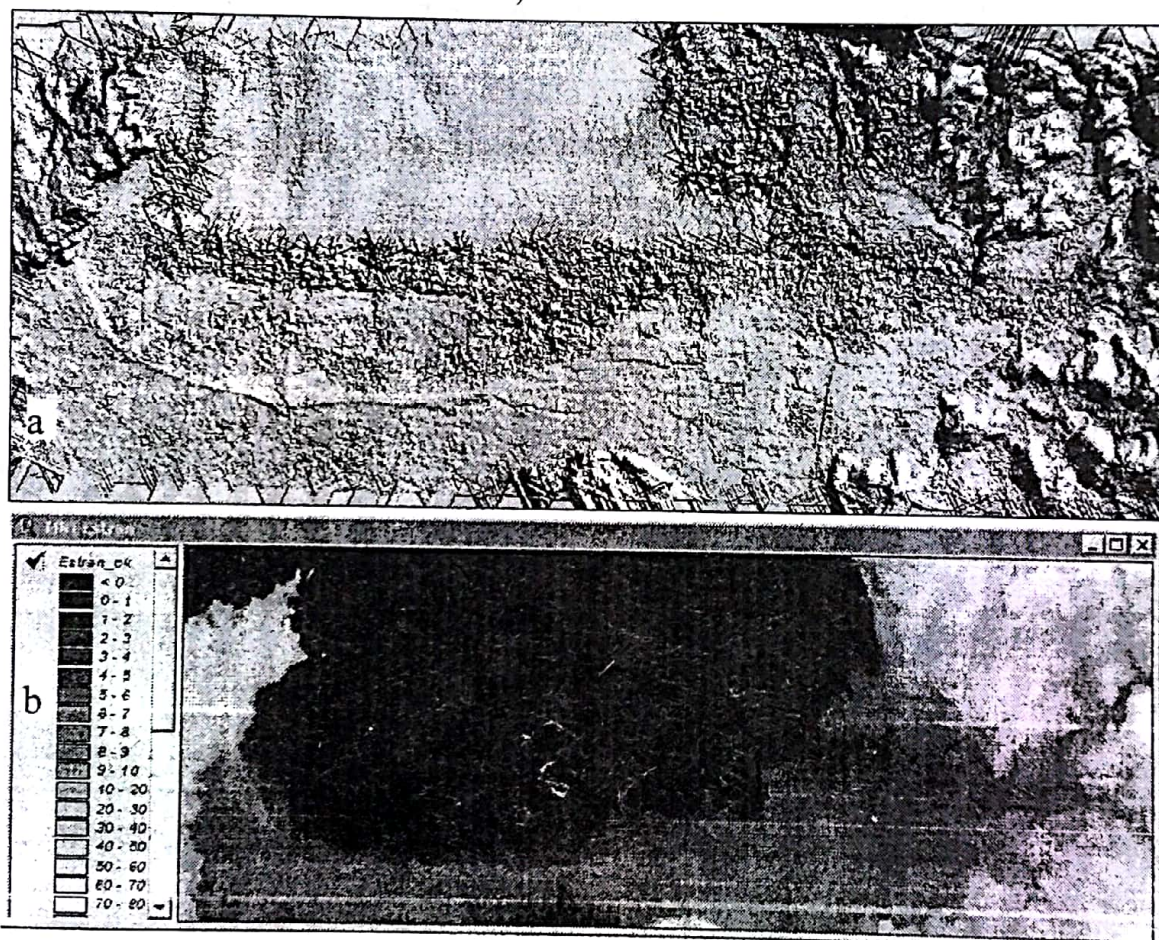


Figure 6. Modèle numérique de terrain de la Baie du Mont Saint-Michel (partie estran) obtenu par corrélation automatique (pas 25 m, stratégie adaptative) : (a) sans correction et (b) après correction ; unité en mètre.

MNT Bathymétrique

Afin de constituer le modèle numérique de terrain bathymétrique (interface sub-tidal terre-eau de la baie du Mont Saint-Michel), nous disposons de six cartes de sondes bathymétriques, dont cinq au 1 : 20 000 et une (les îles Chausey) au 1 : 10 000 (scannée par fragments de format A3), couvrant l'étendue de la Baie du Mont Saint-Michel (Cancale, îles Chausey – Granville, Figure 7). Ces cartes ont été produites par Electricité de France à Saint Malo en 1958-60 d'après des sondages hydrographiques effectués dans les années 50 (Tableau 2). Toutes les cotes sont exprimées en mètres et

rapportées au zéro du Nivellement Général de la France (qui était le Système Lallemand à cette époque – N.A.). Les coordonnées planimétriques sont celles du Système Lambert I de l'Institut Géographique National.

Les cartes ont été scannées en niveaux de gris avec une résolution de 254 dpi (pixel de 1 m pour le 1 : 10 000 et de 2 m pour le 1 : 20 000). La saisie de plus des 24 000 points (dont les îles Chausey représentent la moitié des sondes) a été effectuée manuellement dans MapInfo® sur le fond des cartes géoréférencés dans le système de coordonnées Lambert I. Les altitudes des îles Chausey supérieures à 0 NGF 69 sont extraites de la carte IGN 1214 Ouest îles Chausey - Granville.

Nom et année d'édition	Date des sondages hydrographiques
De la Pointe du Grouin à la Chapelle St Anne, 1959	Octobre - Novembre 1957 et Juin - Juillet 1958
De la Chapelle St Anne à la Pte de Champeaux, 1958	Juillet et Août 1958
De la Pointe de Champeaux à Granville, 1959	Août - Septembre 1957
De Granville à Brehal, 1960	Août - Septembre 1955, Juillet 1958 et Mai 1959
Îles Chausey, 1957	1954 et 1955
De la Pointe du Grouin à Chausey, 1958	Juin et Septembre 1957, et Septembre 1958

Tableau 2. Les cartes des sondes hydrographiques de la baie du Mont Saint-Michel (données EDF).

Avant d'exporter la couche de points dans ArcInfo, nous l'avons passé dans le système Lambert II Carto. Le périmètre de la zone d'étude a également été numérisé permettant de limiter la zone d'interpolation.

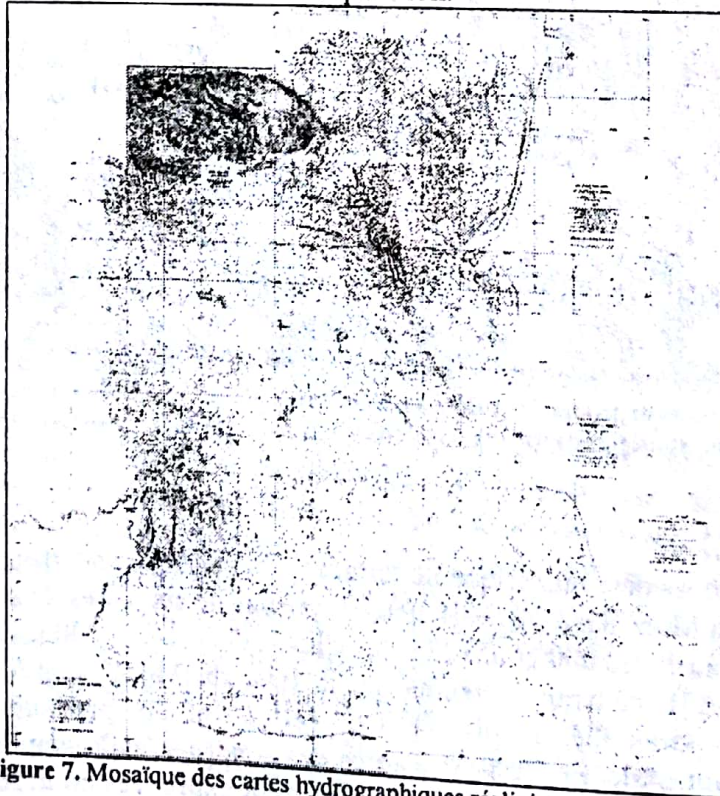


Figure 7. Mosaïque des cartes hydrographiques réalisées par EDF à la fin des années 1950.

La création du MNT sous ArcInfo® a consisté en l'importation automatique des couches, la création de RIT et le calcul du MNT sur une grille carrée avec un pas de 25 m suivi d'une élimination des artéfacts.

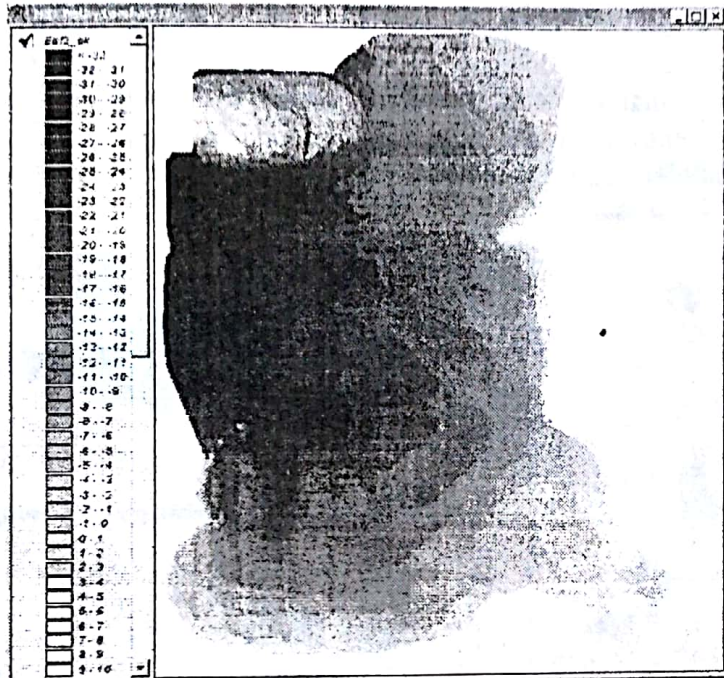


Figure 8. Bathymétrie hypsométrique de la baie du mont Saint-Michel

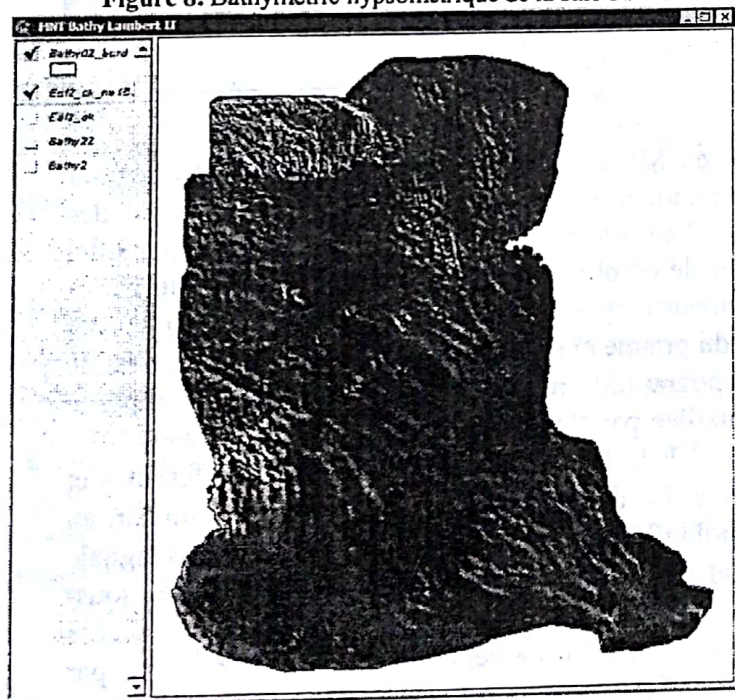


Figure 9. Estompage du MNT bathymétrique issu des sondes EDF de la baie du Mont Saint-Michel.

Remarquons (Figure 8) les variations des isobathes entre 0 et 10 m régulièrement espacées au sud, elles se resserrent au droit du prisme mégatidal (liée à une forte amplitude de marée) à l'embouchure des rivières Sée et Sélune puis vers le nord, à l'Ouest du massif granitique de Champeaux, les premières dunes carbonatées (d'après

Erhold, 1999) orientées NW-SE bien visible dans la bathymétrie soulignent le démantèlement sous-marin du prisme et le lent et inéluctable transit littoral vers le nord longeant le Cotentin. Ainsi trois dunes sont bien visibles dans l'hypsométrie.

L'estompage de la bathymétrie (Figure 9) suivant des directions choisies perpendiculairement aux structures majeures les soulignent fortement. Remarquons au nord le batholite des îles Chausey correspondant à 12 000 sondes numérisées manuellement, entaillées par des filons de dolérite (filon de lave) nord-sud et affecté par une fracturation NW-SE prédominante. Cet estompage souligne tout particulièrement l'ennoisement de sédiments au centre et au sud de la baie. La côte rocheuse et les îlots rocheux au NE de Cancale sont bien soulignés par cet ensoleillement virtuel.



Figure 10. Carte d'orientation du MNT Bathymétrique issue des données EDF.

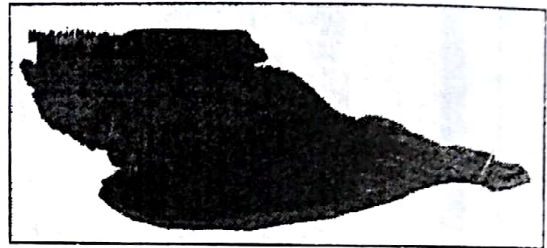


Figure 11. Vue 3D (vue du SW) du MNT Bathymétrique.

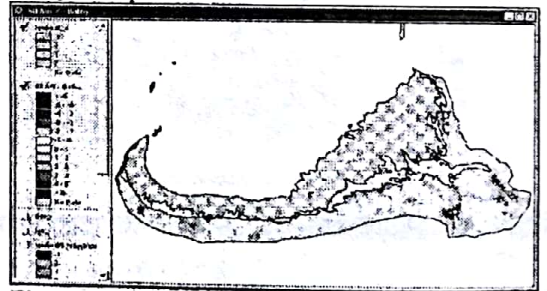


Figure 12. Carte de la différence BD Alti - bathy EDF.

La carte d'orientation dérivée du MNT constitué (Figure 10), permet d'affiner l'analyse et l'interprétation morphologique. Cette carte souligne la variabilité des expositions du domaine sub-tidal : (1) au sud-est le prisme sédimentaire mégatidal (balayé par les marées) est entaillé par de nombreux chenaux soulignés par l'alternance de couleur orange et bleu clair. La couleur magenta (versant orienté vers le NW) permet de délimiter l'extension sous-marine du prisme et son volume. (2) au SW la pente est de couleur bleue soulignant une topographie régulière vers le nord composée principalement de vase seulement entaillée par l'exutoire sous marin de la rivière « Le Guyoult » (Le Vivier-sur-Mer); (3) au NE le fin mosaïquage de couleurs différentes et les languettes de couleur orange révèle des dunes orientées NW-SE correspondant au transit sub-tidal. Les travaux d'A. Erhold (Thèse université de Caen, 1999) nous signale qu'il s'agit probablement de dunes carbonatées (nombreux dragages). Ces dunes sous-marines participent activement au transit littoral du sud vers le nord de la côte les nombreux travaux de Levoy (Levoy F., 1994 et Levoy et al., 1994). Ces deux articles démontrent la présence d'un fort transit littoral solide S-N visible sur le haut et le moyen estran estimé à environ 30 000 m³/an au oranges et bleues matérialisent soit des chenaux soit des rides sous-marines dues à de forts courants marins au large de la pointe du Grouin de Cancale. Au NW, le batholite des îles Chausey s'individualise clairement avec un escarpement sud souligné par les couleurs rouges et le sommet du

batholite est matérialisé par un micro-mosaïquage de toutes les couleurs. La vue 3D prise du SW souligne (Figure 11) le prisme mégatidal au SE, la pente régulière du prisme, le fond rocheux au large de Cancale et les rides ou dunes au centre de la baie.

Comparaison et intégration des MNT

Comparaison de MNT Bathymétrique et BD Alti®

Si l'on fait la différence entre la BD Alti® et la Bathy EDF sur la zone commune entre ces deux MNT (Figure 12), lorsque la BD Alti est au dessus de la Bathy EDF les valeurs sont positives (rouge); lorsque la bathy est située au dessus de la BD Alti les valeurs sont en bleu.

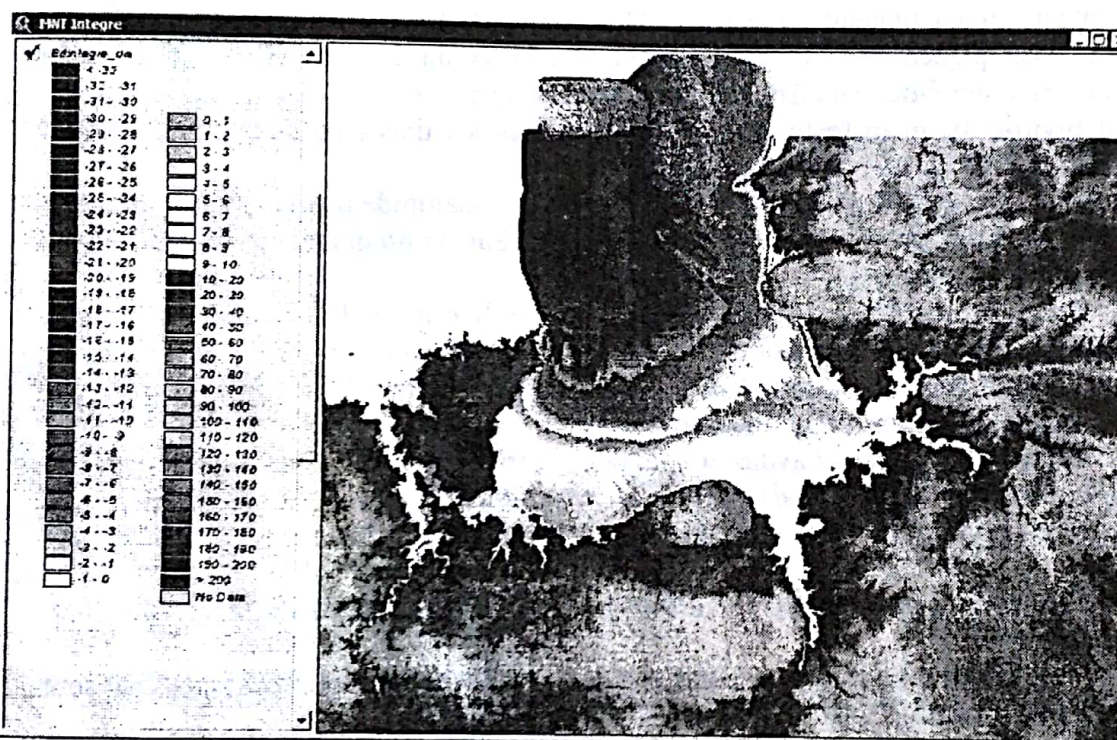


Figure 13. Le MNT intégré de trois MNT (BD Alti®, Bathymétrique, et Photogramétrique) en teinte hypsométrique calculé en utilisant le modèle quadratique de poids.

Remarquons tout d'abord les faibles écarts entre les deux surfaces (moyenne de 75 cm, maximum ± 3 m), la proximité des deux traits de côte ce qui est réellement une surprise puisque personne n'avait osé travailler avec cette Bathymétrie EDF. Puis surtout notons la dissymétrie W-E entre les valeurs positives et négatives respectivement. Une explication possible des valeurs positives à l'ouest réside dans l'envasement lié à l'occupation humaine (conchyli-culture et mytiliculture) à proximité du Vivier-sur-Mer. Les fortes valeurs négatives à l'est sont probablement liées à l'érosion des rivières Sée et Sélune et à proximité du Mont Saint-Michel et de Tombelaine. La grande extension du polygone tramé rose au nord souligne la faible pente du prisme mégatidal.

Intégration des MNT

Nous disposons donc de quatre MNT : la BD Alti® qui couvre la partie émergée à terre jusqu'au 0 NGF 69 (acquisition en 1970), le MNT terrain issu de lever précis aux alentours du Mont Saint-Michel (acquisition en 2002), le MNT photogramétrique issu de la mission IPLI-06 (acquisition en 1982) et enfin le MNT bathymétrique EDF issu des données de sondes bathymétriques (acquisition 1954-1959).

Le MNT terrain a été utilisé pour contraindre le MNT photogramétrique. Par conséquent nous allons intégrer uniquement la BD Alti®, la Bathy-EDF et le MNT

photogrammétrique. Le domaine continental évolue très peu sous climat tempéré, la BD Alti® en 50 ans va conserver les mêmes altitudes. Par contre l'estran (interface domaine public maritime et continental) et la bathymétrie sont susceptibles de se modifier rapidement en fonction des phénomènes d'érosion et surtout de sédimentation liés aux tempêtes, grandes marées, et l'occupation humaine...

Ainsi d'après les travaux de J.Lerhun, 1982, la limite slikke/schorre (limite basse de la végétation halophite) avance relativement rapidement sur la baie. La comparaison des limites slikke/schorre entre 1947 et 1979 révèle une vitesse moyenne de progradation de 25 m/an immédiatement à l'ouest du Mont Saint-Michel (estimation déduite d'après Lerhun, 1982, planche HT N°11). A l'ouest pour la région du Vivier-sur-Mer la vitesse moyenne est inférieure. En effet, la progradation moyenne sur l'estran est au Vivier-sur-Mer d'environ 10 m/an (estimation déduite d'après les tracés du schorre en 1947 et 1980, Lerhun, 1982. fig N°IID1, page 131).

Cette limite slikke/schorre est ainsi une bonne isoaltitude plus ou moins constante (hormis les problèmes de micro-exposition...). Par conséquent le milieu évolue rapidement sur l'estran.

Pour des facilités techniques, nous avons négligé le déplacement de ce trait de côte entre 1955 et 1982, partant du principe que sa progradation en 27 ans (de l'ordre de 675 m) engendre un faible dénivelé théorique de l'ordre de 70 cm pour la faible pente du haut estran (pente environ égale à un pour mille).

L'approche que nous avons adopté pour obtenir le MNT intégré consiste en une addition pondérée de trois modèles (BD Alti®, bathymétrie, et photogram-métrique) en fonction de l'altitude du point (altitude en NGF 69) et est basée sur le raisonnement suivant :

- 1) pour les altitudes à terre supérieures à +10 m, seules les valeurs du MNT BD Alti® sont retenus;
- 2) pour les altitudes en mer inférieures à -5 m, les valeurs du MNT bathymétrie sont seules prises en compte;
- 3) une somme pondérée avec normalisation des poids des MNT BD Alti®, Bathymétrie et Photogrammétrique pour les altitudes comprises entre -5 et +10 m.

Le choix des limites (-5 et +10 m NGF 69) est issu de nombreux tests effectués et optimise la densité des cotes des altitudes des trois MNT. Nous avons retenu deux modèles de pondération différents : linéaire et quadratique (Figure 14), satisfaisants les conditions évoquées. Les fonctions qui réalisent ces modèles sont les suivantes :

I. Pour le modèle linéaire de pondérations :

$$P_g = \begin{cases} 0.1 \cdot z, & \text{pour } 0 < z \leq 10, \text{ et} \\ 0, & \text{pour } z \leq 0, \end{cases}$$

$$P_h = \begin{cases} 0.1 \cdot (5 - z), & \text{pour } -5 < z \leq 5, \text{ et} \\ 0, & \text{pour } z > 5, \end{cases}$$

$$P_f = 1 - (P_g - P_h) = \begin{cases} 0.1 \cdot (5 + z), & \text{pour } -5 < z \leq 0, \\ 0.5, & \text{pour } 0 < z \leq 5, \text{ et} \\ 0.1 \cdot (10 - z), & \text{pour } 5 < z \leq 10. \end{cases}$$

II. Pour le modèle quadratique de pondérations :

$$P_g = a \cdot (5 + z)^2,$$

$$P_h = a \cdot (10 - z)^2,$$

$$P_f = 1 - (P_g - P_h) = a \cdot (-2 \cdot z^2 + 10 \cdot z + 100)^2,$$

où $a = 1/225$ et z est l'altitude du point.

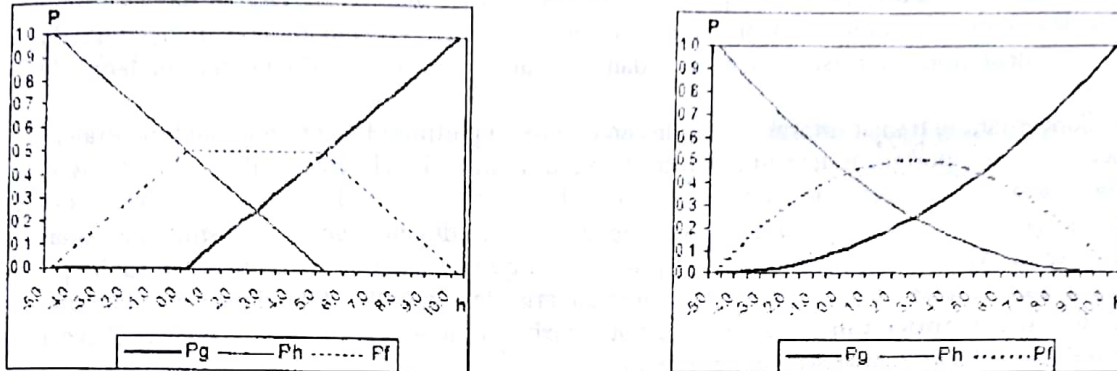


Figure 14. Le modèle linéaire (à gauche) et quadratique (à droite) de pondérations utilisés.

Le MNT résultant de la fusion de ces MNT BD Alti®, Bathymétrie et Photogrammétrique diffère légèrement selon l'approche, linéaire ou quadratique. Cette dernière est préférée sous l'angle de la validité géomorphologique et il serait intéressant de valider ce MNT en le comparant avec de données terrain ou LIDAR.

La Figure 13 représente le produit final obtenu : le MNT intégré de la baie du Mont Saint-Michel qui utilise le modèle quadratique de poids, représenté en teinte hypsométrique.

Conclusion et discussion

En guise de conclusion méthodologique :

Le MNT Bathymétrique issue des données EDF est globalement très satisfaisant si l'on se remet dans le contexte d'acquisition des données des sondes hydrographiques (bathymétrie) dans les années 1950-60 et en prenant en considération tout particulièrement l'important marnage de la baie. Cette variation permanente du niveau relatif d'acquisition des sondes était susceptible de fausser totalement les mesures, ce qui n'est pas le cas. Il est étonnant de disposer d'une différence moyenne en Z de seulement 75 cm entre les 0 NGF 69 Bathy EDF et BD Alti® (même si localement les différences sont plus importantes et peuvent tendre jusqu'à 5 m). La bathymétrie produite est directement lisible par le géologue-géomorphologue et permet de comprendre les processus qui agissent. Il ne faut jamais délaissier les travaux des Anciens en géodésie. Des données anciennes retravaillées peuvent apporter beaucoup.

Le MNT photogrammétrique extrait des missions IPLI-06 (1982) est relativement brute. Il est très difficile de faire mieux que le résultat présenté suite à la faible corrélation des points homologues sur la zone, au manque de point d'appuis sur la partie basse de l'estran, l'importante réverbération du soleil sur les zones humides justes dégagées par l'eau de mer... Par contre le MNT photogrammétrique à terre présente une bien meilleure précision que la BD Alti® soulignant la micro-morphologie de la zone poldérisée.

Le MNT terrain (issu de levé topographique) présente une fréquence (nombre par unité de surface) de mesure suffisante permettant de révéler les micro-reliefs. S'il est difficile de le combiner directement avec les MNT Bathy et la BD Alti® en partie suite à la grande différence de l'échelle des mesures, nous l'avons utilisé pleinement pour contraindre le MNT estran photogrammétrique.

Concernant les données, l'approche suivie permet d'optimiser en permanence le MNT en intégrant de nouvelles données bathymétriques (multifaisceaux) et topographique (Lidar) en cours

d'acquisition (IFREMER, en cours). Ce qui permettra d'obtenir une référence fiable pour intégrer les données terrain et en assurer une bonne continuité terre-mer.

En guise de conclusion thématique :

D'ores et déjà une interprétation géologico-géomorphologique préliminaire permet de différencier des processus érosifs importants et d'accrétion aussi bien à terre qu'en mer : 1- à terre : érosion des batholites granitiques, sédimentation des marais de Dol et poldérisation anthropique et naturelle autour du Mont Saint-Michel ; 2- en mer : érosion au large de la pointe du Grouin, sédimentation du prisme mégatidal dans la baie et dispersion du prisme au large de Granville.

Concernant le transit littoral, les études antérieures à partir de l'estran normand montraient la présence d'un important transit littoral vers le Nord à Granville (Levoy et al., 1994). Nous le confirmons aux vues de cette nouvelle bathymétrie. En effet trois grandes dunes se différencient clairement dans le domaine subtidal dont une en liaison directe avec le prisme mégatidal sédimentaire du Mont Saint-Michel. Ce qui prouve bien qu'une quantité déterminée de sable qui s'accumule dans la baie s'évacue bien vers le nord au large de Granville. Rappelons cependant que le long du littoral normand plusieurs inversions du transit littoral ont été mises en évidence (liées à la morphologie de la côte, à proximité des estuaires...).

Ce travail est un premier pas dans l'analyse des processus qui inter-agissent à terre et en mer. Ils peuvent être extraits par exemple à partir de réseau d'entailles, de crêtes, d'estompage et d'autres traitements plus complexes. De même un travail de quantification et de modélisation des processus est en cours.

Pour conclure, si la bathymétrie-topographie de la baie du Mont Saint-Michel est délicate à étudier tant sur le plan photogrammétrique (lié notamment au domaine sablo-vaseux humide de l'estran), que sur le plan cartographique car elle nécessite la combinaison de données topographiques et bathymétriques de sources différentes. Ces données cartographiques issues de la terre et de la mer sont très riches et leur étude détaillée est désormais incontournable.

RÉFÉRENCES

- BD Alti®, Janvier 1998 : Descriptif Technique IGN, 44 p.
- Dupéret A., 1998. Evolution technique en cours pour la saisie photogrammétrique de la base de données topographiques (BD TOPO®) démarches et résultats, SFPT, 1 : pp. 51-61.
- Dupéret A. et Jamet O., 2000. Extraction des lignes caractéristiques du relief, in Cours de photogrammétrie numérique de M. Kasser et Y. Egels, Hermes, pp : 269-299.
- Dupéret A., et al., soumis. Modèles Numériques de Terrain, Principes et Applications, Hermes.
- Dufour H.M., 1988. Quelques idées générales concernant l'établissement et l'amélioration des Modèles Numériques de Terrain, Bull. Information de l'IGN, N°58, pp : 3-18.
- EDF, 1957-1960 : Cartes des sondes hydrographiques de la baie du mont Saint-Michel, EdF.
- Julien Patrick, Traitements altimétriques (Modèles numériques de terrain), 1994, 111 p.
- Kasser M., Egels Y., 2000. Cours de photogrammétrie numérique, Hermes, Paris, 379 p.
- Lerhun J., 1982. Etude physique de la baie du Mont Saint-Michel, thèse de 3^{ème} cycle. Université de Paris 1, 243 p
- Levoy F., 1994. Modélisation de la circulation sédimentaire longshore résiduelle le long de la côte ouest du Cotentin (Manche), Colloque génie civile - génie côtier, Sète, 2-4 mars 1994, 12 p.
- Levoy F. et al., 1994, Quantification of longshore transport in the surf zone on macrotidal beaches, 24th International Conference Coastal Engineering Research Council / ASCE, October 23-28, 1994, Kobe, Japan, pp. 2282-2296.
- SOCET SET®, User's manual : version 4.3.1. March 2001, BAIE Systems. 861 p.
- TopAéro-PC, Manuel utilisateur : version 1.6, 2002, IGN®, 45 p.

Remerciements

Les auteurs remercient tout particulièrement Jean-Marc Léauthaud, Alain Dupéret, Jean Denègre, Yves Egels, Pascal Barbier, Joël Chan, Patricia Pellardi, Raphaële Héno, Denis Cottin. Les données EDF ont été aimablement communiquées par EDF et transmises par Chantal Bonnot-Courtois (CNRS). Les altitudes de la baie du Mont Saint-Michel ont été tout particulièrement étudiées qualitativement par Jeannine Le Rhun (EPHE) en 1982. Enfin, nous remercions l'ENSG, et l'IGN pour les nombreuses facilités accordées