

Photogrammétrie en zone littorale

par A. FOURGASSIE,
Ingénieur principal de l'armement EPSHOM

INTRODUCTION

L'hydrographie des zones côtières est un travail long et coûteux que l'utilisation des photographies aériennes permet depuis longtemps de préparer et d'alléger. Les techniques et méthodes mises en œuvre découlent de celles utilisées pour la cartographie terrestre. Cependant des difficultés liées à la spécificité des zones littorales ont longtemps freiné le développement de la photogrammétrie des régions côtières. Ces difficultés proviennent de la transition air-eau, milieux d'indices différents ; les principales sont :

- Réfraction des rayons lumineux pour le calcul des profondeurs.
- Enchaînement de clichés dont la partie commune est uniquement maritime.
- Manque de points de calage émergés.
- Réflexion spéculaire du soleil se traduisant par des reflets sur les photographies.
- Marée, etc...

Pour résoudre ces problèmes, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) a entrepris plusieurs actions (acquisition en 1983 d'un stéréorestituteur analytique Traster, préparation de levés photogramétriques spécifiques, étude des conditions d'application et de la fiabilité des techniques photobathymétriques...). Nous pouvons à présent tirer des enseignements provenant d'une expérience de cinq années de restitution photogramétrique de zones littorales très variées du territoire métropolitain et des Départements et Territoires d'Outre-Mer.

1 - NECESSITE DE PRISES DE VUES SPECIFIQUES

La couverture photographique régulière de l'Institut Géographique National (IGN) bien que couramment utilisée par le SHOM, n'est pas bien adaptée aux restitutions photogramétriques des régions côtières. Les principales raisons de cette inadéquation et les solutions pouvant y être apportées sont données ci-dessous :

1.1. ALTITUDE DU PLAN D'EAU - NECESSITE D'OBSERVER LA MAREE PENDANT LES VOLS

Lorsque l'amplitude de la marée est forte, il est très important de disposer de photographies prises lors d'une marée basse de vive-eau. De plus, la cote du plan d'eau aux instants de prise de vues doit être connue avec précision, ce qui, dans la plupart des cas, impose une observation de la marée pendant la durée des vols.

1.2. HAUTEUR DU SOLEIL

De nombreuses photographies aériennes sont inexploitable pour la bathymétrie à cause des reflets. Pour minimiser la surface qu'ils occupent sur les clichés, il est nécessaire d'opérer avec une hauteur de soleil pas trop importante (fonction de la distance focale, de la taille des clichés et de l'orientation des axes de prise de vues) pour éviter la réflexion spéculaire, mais néanmoins suffisante pour assurer un éclairage satisfaisant des fonds. De plus, il est important de prévoir un recouvrement longitudinal de 80 % et latéral de 20 % pour s'affranchir au mieux lors de la restitution des reflets résiduels sur les clichés.

1.3. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

En plus de contraintes évidentes de nébulosité, il faut s'assurer d'un vent faible non seulement pour assurer une bonne stabilité au vol de l'avion mais surtout parce qu'un état de la mer, trop agité peut interdire la restitution des fonds faiblement immergés ou en réduire la précision en provoquant des erreurs pouvant atteindre 13 % de la profondeur (cf référence 1).

1.4. CONFIGURATION DES ZONES COTIERES - NECESSITE DE LA LOCALISATION DE L'AVION

Dans certains cas, les levés photoaériens de l'IGN ne couvrent pas la totalité de l'estran ou n'englobent pas certains îlots et récifs situés à proximité de la côte. Ces régions littorales, présentant souvent des fonds faibles et accidentés, sont difficilement accessibles et conduisent avec les méthodes classiques (vedettes, sondeurs acoustiques) à des levés hydrographiques longs et délicats. La réalisation d'une couverture photographique plus étendue se heurte aux difficultés du suivi de profils au-dessus des zones essentiellement maritimes offrant peu de points de repère pour les pilotes. De plus, le manque de points d'appui émergés rend difficile et parfois impossible la mise en place des couples stéréoscopiques provenant d'un tel levé.

La solution d'une grande partie de ces difficultés se trouve dans la localisation de l'aéronef. Le système adopté doit permettre, avec une précision permettant de garantir les normes de recouvrement entre bandes adjacentes, le guidage sur des profils préétablis. Pour ceci, une précision de 10 mètres est amplement suffisante ; elle doit être obtenue en temps réel. Des performances supérieures, accessibles après des calculs en temps différé, seront indispensables si l'on veut pouvoir réduire significativement le nombre de points d'appui au sol nécessaire à la mise en place des clichés. A la limite il sera possible de s'affranchir complètement des points d'appui dans les calculs d'aérotriangu-

lation si la position des sommets de prise de vues est connue avec une précision submétrique en planimétrie comme en altimétrie. Le fait de disposer du plan d'eau comme référence d'horizontalité (surface équipotentielle) et d'altitude (marée connue, cf alinéa 1.1) est un atout supplémentaire lorsque l'infrastructure géodésique est peu dense.

1.5. CHOIX DE L'ÉMULSION

L'une des spécificités de la photogrammétrie des régions littorales se situe dans la restitution des zones immergées.

La société Kodak a développé, il y a quelques années, une émulsion photographique spécialement adaptée à la prise de vues sous-marines. La commercialisation de ce produit a dû être arrêtée à cause d'une demande trop faible. Le choix reste donc à faire parmi les émulsions classiques couramment utilisées pour les photographies aériennes.

Les émulsions panchromatiques sont d'un coût moins élevé et d'un emploi plus facile que les émulsions couleur et permettent à grain égal des pointés légèrement plus précis. Cependant leur contenu informatif est plus faible car elles ne permettent de séparer que 200 niveaux de gris qui sont à comparer aux 20 000 nuances que l'on peut distinguer sur certains clichés couleur. Les émulsions panchromatiques sont donc peu intéressantes pour la photobathymétrie pour laquelle il est indispensable de pouvoir effectuer une bonne interprétation dans des zones de dynamique très faible. Grâce à leurs bonnes qualités de pénétration sous l'eau, les émulsions en couleurs naturelles se prêtent bien à la photobathymétrie. Cependant, elles ne permettent pas toujours, surtout si l'eau est claire, de déterminer avec précision la limite du plan d'eau. Cette difficulté se trouve résolue par l'utilisation d'émulsions en fausses couleurs dont le spectre s'étend dans l'infrarouge jusqu'à 900 nm mais qui n'assurent pas une aussi bonne pénétration sous l'eau.

La solution la plus satisfaisante, adoptée par le National Ocean Survey (NOS) aux Etats-Unis (cf référence 6) consiste à effectuer simultanément à la prise de vues en couleurs naturelles une prise de vues avec une émulsion infrarouge en noir et blanc qui permet de déterminer facilement le plan d'eau. Cette technique nécessite l'installation de deux caméras sur l'avion et augmente le prix des levés.

Nous avons eu l'occasion d'exploiter des photographies panchromatiques, en couleurs naturelles (Aerocolour 2445 et Aerochrome 2448) et infrarouges en fausses couleurs (Aerochrome 2443). Les observations concernant les qualités de ces émulsions pour la restitution photobathymétrique sont données dans le paragraphe 3.2. D'autres essais mettant en œuvre des films noir et blanc de très haut contraste et des films couleurs de sensibilité spectrale centrée autour de 550 nm seront conduits dans l'avenir.

2 - MISSIONS PHOTOAERIENNES REALISEES PAR LE SHOM

Pour tirer le maximum d'avantages d'un levé photogramétrique spécifique, nous nous sommes orientés jusqu'à présent pour ces levés vers des

zones littorales présentant des marées de fortes amplitudes (côtes nord de Bretagne et Baie de Seine). Quatre missions photographiques ont été réalisées :

Septembre 1983 : De Roscoff à Trégastel (planche 1).

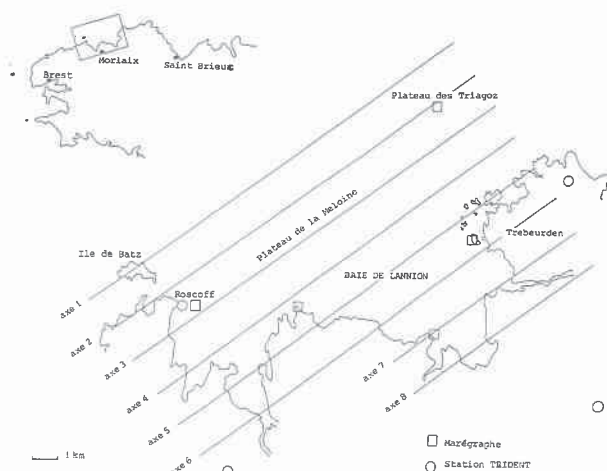


PLANCHE 1. — Mission "Baie de Lannion". Schéma des axes de vol. Situation des marégraphes et des stations TRIDENT.

Juin 1984 : Baie de Seine (planche 2).



PLANCHE 2. — Mission "Baie de Seine". Schéma des axes de vol. Situation des stations TRIDENT, des marégraphes et des échelles de marée.

Septembre 1986 : De Trégastel à l'anse d'Yffiniac (planche 3).

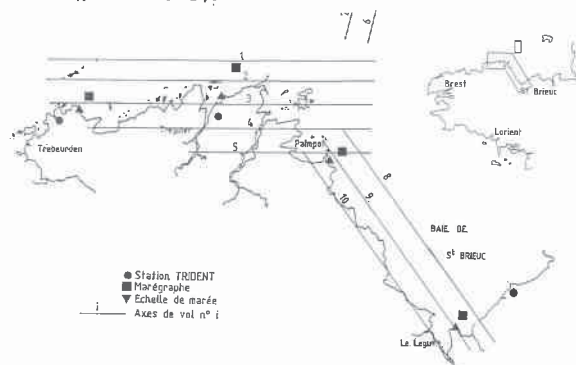


PLANCHE 3. — Mission "Paimpol". Schéma des axes de vol. Situation des stations TRIDENT, des marégraphes et des échelles de marée.

Septembre 1988 : De l'anse d'Yffiniac à la baie du Mont Saint-Michel (planche 4).

Ces choix ne facilitent cependant pas l'organisation des missions. En effet, les vols doivent être

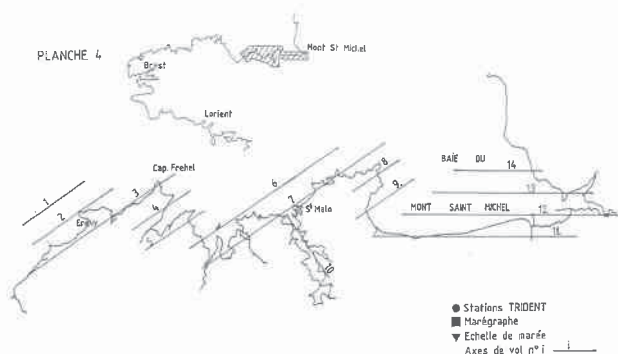


PLANCHE 4. — Mission "Mont Saint-Michel". Schéma des axes de vol. Situation des stations TRIDENT, des marégraphes et des échelles de marée.

programmés pendant des périodes de grandes marées à l'heure de la basse mer et avec des conditions de hauteur de soleil satisfaisantes (cf alinéa 1.2). Il est en général possible de dénombrer chaque année pour une région donnée trois à quatre périodes propices d'une durée d'environ trois jours chacune... La dernière exigence à satisfaire, et non la moindre, est de bénéficier pendant l'une de ces périodes de conditions météorologiques favorables. Ces nombreuses contraintes s'ajoutent aux problèmes posés par la mise en place et la surveillance d'infrastructures terrestres (marégraphes, balises de radiolocalisation). Tout ceci rend ces missions photogrammétriques relativement lourdes et nécessite une bonne organisation.

Au cours des quatre missions citées ci-dessus, nous avons pu expérimenter plusieurs capteurs de localisation (Trident, altimètre laser, statoscope) et tester différentes émulsions photographiques. Les positions issues de la radiolocalisation ont été comparées aux coordonnées des sommets des gérbes perspectives obtenues par aérotriangulation (cf référence 5). La première tâche a été d'assurer une bonne synchronisation entre l'ouverture de la caméra et l'acquisition des données de localisation.

Le système Trident de la Société Thomson/CSF permet d'obtenir les distances du mobile à quatre balises installées sur des points remarquables de la cote choisis pour assurer un bon recoupement des lieux de position.

En l'absence de mesure spécifique d'altitude, la précision obtenue en temps réel avec le Trident est d'environ 10 mètres en planimétrie. Pour ceci, le calcul est effectué en fixant l'altitude moyenne de vol. Cette précision est suffisante pour le guidage de l'aéronef sur des profils préétablis (cf alinéa 1.4). Elle peut être légèrement améliorée en temps différé en optimisant l'altitude de vol par minimisation des résidus sur les mesures de distances. La mise en œuvre d'un altimètre Laser permet d'obtenir une précision submétrique pour l'altitude de l'aéronef. L'introduction de cette altitude dans les calculs de la localisation Trident améliore la précision planimétrique de celui-ci jusqu'à moins de 3 mètres. Malheureusement, les altimètres Laser sont très coûteux et ils ne donnent une indication d'altitude exploitable que lorsque le nadir de la photographie est situé sur le plan d'eau. Pour pallier à ce deuxième inconvénient, on peut se servir conjointement

d'un statoscope (appareil enregistrant avec précision les variations d'altitude par conditions atmosphériques stables). Nous avons également expérimenté l'emploi simultané du Trident et d'un statoscope. Le passage de l'avion à proximité de la verticale d'une balise Trident fournit alors le calage altimétrique absolu à 2 à 3 mètres près.

Pour l'instant, un seul capteur ne permet donc pas de résoudre de façon satisfaisante le problème de la localisation de l'aéronef. Les progrès attendus dans ce domaine viendront du système de localisation par satellites GPS (référence 2). Des expériences menées en 1987 par la Société Sercel, le Centre d'Essais en Vol de Brétigny et le SHOM (références 3 et 4) ont montré que ce système permettait d'obtenir la position tridimensionnelle de l'aéronef avec une précision de quelques mètres en temps réel et de quelques dizaines de centimètres en temps différé. Cependant, les levés photogrammétriques littoraux ne sont pas envisageables avec le GPS avant la mise en place de la constellation définitive (1991). En effet il serait irréaliste d'ajouter aux spécifications déjà très strictes de ces missions photographiques, les contraintes dues aux courtes périodes actuelles d'observation des satellites GPS.

3 - RESTITUTIONS PHOTOGRAMMETRIQUES EN ZONE LITTORALE

3.1. OBJECTIFS

Les restitutions photogrammétriques réalisées à ce jour par le SHOM ont fait appel soit à la couverture photographique de l'IGN, soit aux missions

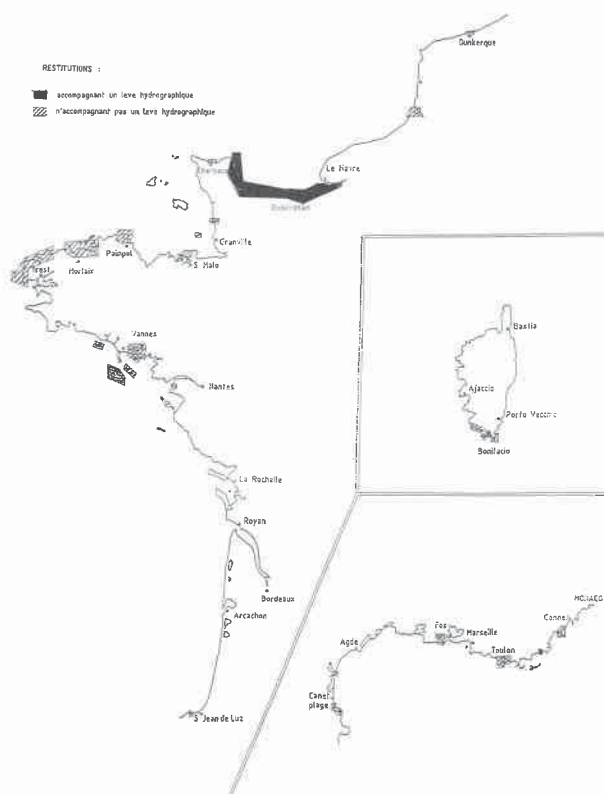


PLANCHE 5a. — FRANCE

spécifiques décrites ci-dessus. Elles peuvent se classer en deux grandes catégories :

a) *Les restitutions photogrammétriques accompagnant un levé hydrographique classique*

Les planches n° 5 a, b montrent les travaux déjà réalisés depuis 1984 suivant cette méthodologie sur les côtes métropolitaines et dans les DOM-TOM. La restitution photogrammétrique est alors effectuée préalablement au levé classique. La Mission Hydrographique dispose donc pendant les opérations sur le terrain de tous les documents et peut en assurer le complètement. En ce qui concerne la partie terrestre, celui-ci s'avère relativement léger ; il consiste à positionner les espars de faibles dimensions non identifiables sur les photographies, à classer les amers en fonction de leur visibilité par les navigateurs, à porter la toponymie et à vérifier les évolutions depuis la date de prise de vues. Le contrôle de la partie maritime de la restitution nécessite un travail plus long et la mise en œuvre de moyens plus lourds. Les performances en précision et en pénétration de la photobathymétrie ne sont en général pas suffisantes (cf paragraphe 3.2) pour rendre caducs les levés acoustiques classiques. Cependant la photogrammétrie procure un allègement très sensible de ces levés car elle permet de détecter les hauts fonds et de cerner des zones prioritaires pour lesquelles des levés détaillés mettant en œuvre des vedettes hydrographiques resteront nécessaires.



PLANCHE 5b. — DOM-TOM

b) *Les restitutions photogrammétriques n'accompagnant pas un levé hydrographique*

Etant donné le volume important des levés hydrographiques modernes restant à effectuer sur nos côtes, il est parfois nécessaire de rénover la cartographie de régions littorales pour lesquelles il n'a pas été jugé prioritaire de programmer un levé hydrographique exhaustif. C'est le cas de la Bretagne Nord. Les cartes y sont issues de levés réalisés au XIX^e siècle. Il a été décidé d'effectuer la mise à jour de cette cartographie grâce à la photogrammétrie. Des contrôles ponctuels portant sur les incohérences entre les cartes marines anciennes et les restitutions photogrammétriques ont néanmoins été réalisés. La planche n° 6 montre l'apport incon-

testable de cette méthode pour la remise à jour des cartes marines.

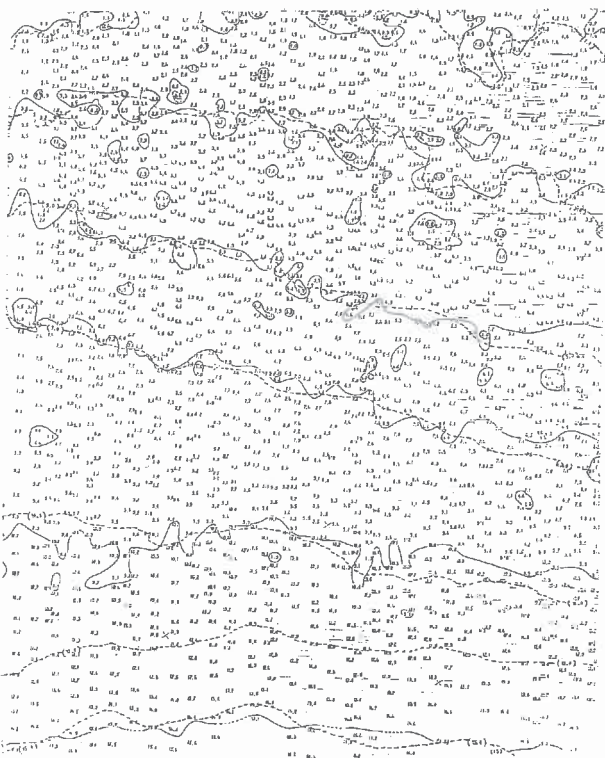


PLANCHE 6. — Lifou : Superpositions des isobathes traster : ... et de la minute 83-32-1 (levé acoustique).

3.2. PHOTOBATHYMETRIE

Les travaux photogrammétriques réalisés depuis cinq ans ont permis de dégager une méthodologie adaptée à la restitution des fonds faiblement immergés.

3.2.1. Conditions de prise de vues

En premier lieu, la prise de vues doit répondre aux critères détaillés plus haut relatifs à la hauteur du soleil, aux conditions météorologiques, aux émulsions photographiques et à l'observation de la marée. L'échelle des photographies et la distance focale de la caméra sont également à prendre en compte.

— L'échelle que nous utilisons le plus couramment est le 1/20 000 qui fournit en moyenne après aéro-triangulation une précision planimétrique de 1 à 2 mètres largement suffisante pour une échelle de rédaction de 1/10 000 et une précision altimétrique de 0,5 à 2 mètres pouvant être améliorée au voisinage du trait de cote (cf paragraphe 3.2.2) mais pouvant se dégrader dans les zones éloignées des points d'appui altimétrique. Il est apparu qu'une restitution photobathymétrique de qualité exigeait des photographies à grande échelle (1/10 000) au prix d'un allongement de toutes les phases de la restitution. Dans les zones où la densité des points d'appui est faible et lorsque la seule localisation de l'aéronef ne permet pas une mise en place suffisamment précise des couples (cf paragraphe 2), il est intéressant de prévoir deux prises de vues, la première à petite échelle (1/30 000) permettant de déterminer des points de calage, pour la seconde à grande échelle (1/10 000).



Figure 7

— Parmi les distances focales utilisées en photographie aérienne (90 mm - 150 mm - 210 mm), les deux premières fournissent un recoupement géométrique des rayons perspectifs compatible avec une restitution photobathymétrique de précision.

3.2.2. Méthodologie de restitution - Calage altimétrique des modèles stéréoscopiques

Une prise de vues de qualité n'est pas suffisante pour assurer une restitution photobathymétrique précise. La restitution des fonds immergés soulève en effet différents problèmes. Celui de la réfraction des rayons à l'interface air-mer est résolu sur le Traster par un logiciel que nous avons testé et validé. Une difficulté plus sérieuse est due au faible nombre et souvent à la mauvaise répartition des points de calage émergés. Ce problème est particulièrement crucial pour les points d'altitude et constitue le facteur limitatif principal de la photobathymétrie.

La configuration la plus défavorable est celle d'une côte rectiligne. Les points de marée sont alors presque alignés et en l'absence de données supplémentaires pouvant améliorer le calage altimétrique des modèles, la fiabilité de la restitution bathymétrique ne peut être assurée qu'au voisinage de la ligne de rivage à l'instant de prise de vues.

Le calage altimétrique peut également se révéler délicat avec une bonne répartition géométrique des points de marée lorsque ceux-ci sont difficile-

ment identifiables à cause de la trop grande clarté de l'eau (cf paragraphe 1.5).

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour remédier à ces difficultés de détermination précise d'un niveau de référence altimétrique pour les modèles stéréoscopiques.

— Utilisation de points de calages immergés

Des programmes prenant en compte cette spécificité ont été développés (cf référence 7). Pour cela, il faut pouvoir identifier de façon sûre les points de calage et en connaître la profondeur avec précision.

— Mouillage de bouées

Pour profiter de la connaissance de l'altitude du plan d'eau, on peut mouiller préalablement à la prise de vues quelques bouées permettant de faire des pointés stéréoscopiques sur le plan d'eau et ainsi de densifier le réseau des points d'appui altimétrique.

— Localisation de l'aéronef

Il a été montré (cf référence 7) que l'effet de l'introduction de l'altitude de sommets de prise de vues dans le calcul d'ajustement était comparable à celui des points d'appui altimétriques au niveau du sol situés à proximité de l'axe de vol. En optimisant le plan de vol de façon à placer les sommets de prise de vues à distance suffisante du trait de cote, on obtient donc un canevas d'appui altimé-

N°	1	2	3	4	5	6
Zone	Bonifacio	Iles de Lerins	Iles Chausey	Iles de Glénan	Ile Lifou (Nouvelle-Calédonie)	Anse de Paimpol
Echelle des clichés	1/14 500	1/14 500	1/10 000	1/20 000	1/10 000	1/20 000
Hauteur du soleil	43°	45°	44°	46°	42°	39°
Etat de la mer	Petit clapot	Calme	Vent assez fort, zone protégée dans le lagon	Petit clapot	Calme	Petit clapot
Pourcentage de reflets	33 %	25 %	40 %	40 %	10 %	25 %
Emulsion	Panchromatique	Panchromatique	Couleur et infrarouge couleur	Panchromatique	Couleur	Couleur
Localisation avion	non	non	non	non	non	oui
Marée	Prédite (marée faible)	Prédite (marée faible)	Prédite	Prédite	Prédite (marée faible)	Observée
Nature du fond	Roche et sable	Herbiers	Roche et sable	Roche et sable	Corail et sable	Roche, sable et vase
Pénétration	10 m	3 à 5 m	3 m	3 m	15 m	3 à 7 m
Précision (comparaison avec levés acoustiques)	~ 1 m	~ 2 m	(1)	~ 0,5 m	~ 0.5 m	(1)

(1) Aucun levé acoustique à grande échelle n'étant disponible pour ces zones, le paramètre de précision n'a pu être évalué.

trique favorable comprenant les sommets et les points en bordure du plan d'eau.

3.2.3. Exemples de restitutions photobathymétriques

Les différentes restitutions présentées ci-dessous mettent en valeur tous les facteurs décrits précédemment et montrent également l'importance de la nature du fond.

Les caractéristiques des missions aériennes utilisées sont rassemblées dans le tableau ci-dessous. Elles ont toutes été réalisées avec une caméra RC 10 équipée d'une focale de 150 mm.

Le pourcentage des reflets sur les clichés dépend de la hauteur du soleil et de l'état de la mer.

Les missions photographiques n° 3, 5 et 6 ont fait l'objet d'une programmation spécifique alors que les trois autres ont été choisies dans la photothèque de l'IGN.

La comparaison de ces différentes restitutions avec les documents bathymétriques de référence a montré que plusieurs facteurs se conjugaient avec pour conséquence dans la plupart des cas une surestimation des profondeurs mesurées par photobathymétrie.

a) Pointé du plan d'eau. L'opérateur a tendance à surévaluer la cote du plan d'eau en se calant sur la limite de la zone humide correspondant à une variation de teinte. Ce problème se trouve presque résolu si l'on utilise des photos couleur et ne se pose plus avec les photos infrarouge couleur. De plus, par mer agitée, le pointé du plan d'eau est délicat et la cote de celui-ci sera toujours surévaluée. Aucune méthode ne permet évidemment d'évaluer cette surcote. Cependant, on peut estimer qu'elle est comprise entre 0 et 50 cm.

b) Nature du fond. Elle a un effet important sur la précision du pointé stéréoscopique. Les réponses stéréoscopiques du sable et surtout des herbiers ou de la vase étant beaucoup moins nettes que celles de la roche ou du corail, les reconstituteurs ont tendance à faire pénétrer le ballonnet de pointage à l'intérieur du fond et donc à surestimer la profondeur.

c) Bathymétrie de référence. L'adoption du principe de sécurité pour le choix des sondes effectuées lors d'un levé acoustique classique se traduit par une surévaluation apparente des profondeurs obtenues par photobathymétrie.

Finalement les performances sont très variables, la pénétration sous l'eau pouvant aller de moins d'un mètre (fonds de vase, eaux turbides) jusqu'à plus de 15 mètres (lagons coralliens). La restitution concernant Lifou regroupe toutes les conditions favorables citées plus haut et nous a montré qu'une

précision de $\pm 0,50$ mètre était possible (cf planche 7). Par contre il est également apparu au vu de la restitution des îles de Lerins que dans certains cas des erreurs importantes probablement dues à la nature du fond (herbiers) pouvaient être commises et ceci même pour des profondeurs faibles.

CONCLUSION

L'étude systématique menée depuis bientôt cinq ans pour mettre au point des méthodologies de prise de vues et de restitution adaptées aux zones littorales a permis de rendre effectif l'emploi de la photogrammétrie, aussi bien pour l'élaboration de documents de préparation facilitant et allégeant les levés côtiers que comme outil de mise à jour et de rénovation des cartes marines.

La photobathymétrie, en particulier, est une technique dont les critères de fiabilité sont difficiles à tous maîtriser. Elle se montre la plus performante dans les zones difficiles d'accès aux moyens flottants (côte découpée, fonds rocheux et accidentés) et apparaît alors comme un moyen complémentaire aux levés acoustiques classiques.

Références

- (1) **M. Venuon** : *Photogrammetry in Hydrographic Surveying. The Hydrographic Journal*, n° 11, avril 1978.
- (2) **A. Fourgassie** : *Emploi du GPS en Hydrographie. Actes du 3^e colloque national sur la localisation en mer - Rueil - Septembre 1987.*
- (3) **G. Cozian** : *Positionnement GPS d'un avion en vol. Rapport d'essai - EPSHOM - Mars 1988.*
- (4) **R. Gounon** : *Trajectographie GPS sur avion, résultats d'essais au CEV Brétigny - SERCEL - Novembre 1987.*
- (5) **J.-M. Chimot, M. Le Gouic** : *Radiolocalisation d'un avion de prises de vues aériennes destinées à des levés hydrographiques côtiers. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection n° 103, 1986-3.*
- (6) **J.-T. Smith** : *NOS Photographic Operations for Photobathymetry. Proceedings of the Coastal Mapping Symposium, août 1978.*
- (7) **G. Cozian** : *Photogrammétrie en zone littorale. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Géodésiques - EPSHOM - Septembre 1986.*
- (8) **M. Le Gouic** : *Hydrographie et Bathymétrie. 1^{er} Congrès International de l'Association Française de Topographie - Paris - Décembre 1984 : Revue XYZ n° 21, décembre 1984.*