Opération Cadre Régionale BEACHMED-e

Sous-Projet ReSaMMé

« Recherche de Sable sous-marin en Mer Méditerranée »

PROTOCOLE SAND

(Search and Assessment of Nourishment-suitable Deposits)

Protocole méthodologique pour la recherche des dépôts sableux sur la plate-forme continentale utilisable pour le rechargement des plages en érosion

Protocole partagé par les partenaires du Sous-projet ReSaMMé:

- (Chef de file) Ingegneria Ambientale struttura tematica di ARPA Emilia-Romagna
- Università degli Studi di Roma “La Sapienza” - DST
- Università degli Studi di Genova - Dipteris
- Lab. de Biophysique et Dynamique des Systèmes Intégrés BDSI, Université de Perpignan
- Dep. de Geología Marina y Oceanografia Física, Instituto de Ciencias del Mar-CSIC
- Université Democritus de Thrace, Faculté des Ingénieurs de l’Environnement

INTRODUCTION

1 BACKGROUND DES DEPOTS SABLEUX DES PLATEFORMES CONTINENTALES AVEC UN MAJEUR DETAIL POUR LA MER MEDITERRANEE: ELEMENTS GENERAUX ET CARACTERISTIQUES PRINCIPAUX DES DEPOTS DU QUATERNAIRE TARDIF

Généralité
Dépôts de chute (Falling Sea Level Systems Tract -FSST-)
Dépôts de bas stationnement (Lowstand Systems Tract -LST-)
Dépôts de remontée (Transgressive Systems Tract -TST-)
Dépôts de haut stationnement (Highstand Systems Tract -HST-)

2 ASPECTS METHODOLOGIQUES

Prospections à mer
Méthodes indirectes
Bathymétrie
Sondeur monofaisceau
Sondeurs multifaisceaux
Analyse morpho-acoustique du fond au moyen de sonar latéral
Analyse sismostratigraphique du sous-fond marine: sismique à réflexion monocanal à haute et très haute résolution
Méthodes directes
Échantillonnage du sous-fond marin
Échantillonnage du fond marin
Analyses sedimentologiques et stratigraphiques
Interprétation géologique-minière et synthèse des résultats

3 RECHERCHE EN MER DES SABLES

Généralité
Phase 1-de planification
Phase 2-de recognition
Phase 3-de connaissance
Phase 4-d'exploration
Phase 5-d'exécution

Notices a l'égard des activités corrélées
Etude environnementale
Opérations avant le dragage
Opérations âpres le dragage

4 BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Le Protocole SAND est un document technique qui veut donner les informations essentielles et les meilleurs méthodologies pour la recherche des dépôts sableux sous-marins utilisables pour le rechargement artificielle des plages en érosion.
Le protocole se base sur la propose de lignes-guide réalisées dans le Project Beachmed et il considère les expériences gagnées pendant les recherches effectuées du DST-UNIROMA dans la Mer Tyrrhénienne (Chiocci et La Monica, 2000), des informations disponibles en littérature (ex. Finkl et al., 2004; Finkl et Khalil, 2005) et des méthodologies utilisées par les partenaires de ReSaMMé pour les recherches effectuées dans la Mer Adriatique, Mer Ligurienne, Mer de la Catalunya, Golfe du Lion et Mer de Thrace. Il pourra être appliquer au contexte Méditerranéen, caractérisé par plate-formes continentales peu étendues, avec sédimentation silicoclastique et régime hydrodynamique microtidal à domaine houleuse.

La définition de méthodes de recherche (techniques de prospection-investigation et méthodes d'interprétation stratigraphique) très précis et efficaces est fondamentale pour la recherche des dépôts sableux. La précision et l'efficace des recherché sont déterminées par la difficulté de trouver les inertes et par la rareté des dépôts qui satisfassent les conditions nécessaires pour l'utilisation.
En effet, on doit rappeler que, puisque un dépôt soit cultivable, on doit chercher à respecter nombreuses conditions. Les conditions les plus importantes sont:

- textures et minéralogie pareilles à celles de la plage à recharger;
- volumes majeurs que $1x10^6$ m^3;
- pélites moins épaisses que 4-5 m;
- localisation dans des zones pas impliquées dans la dynamique côtière actuelle et loin d'environnements sensibles;
- profondeurs accessibles avec les techniques actuelles de dragage (actuellement max- 100-120 m) et proche du site d'intervention.

La disponibilité des dépôts sableux sous-marin est destinée à diminuer, car l'exploitation de cette ressources, non renouvelable, est en train d'augmenter. Pour cela, les conditions fondamentales pour un bon aménagement de la ressource sont la connaissance totale de la morphologie et de la stratigraphie des plateformes continentales, des processus qui se sont déroulés pendant le quaternaire tardif et l'utilisation de méthodes de recherche de plus en plus sophistiqués.

1 BACKGROUND DES DEPOTS SABLEUX DES PLATEFORMES CONTINENTALES AVEC UN MAJEUR DETAIL POUR LA MER MEDITERRANEE: ELEMENTS GENERAUX ET CARACTERISTIQUES PRINCIPAUX DES DEPOTS DU QUATERNAIRE TARDIF

Généralité

La Mer Méditerranée est caractérisée par des plateformes assez récentes (pour la plus parte Plio-Quaternaire), peu étendues (max ≈275 km au large de la Tunisie – Gulf de Gabès et dans la Mer Adriatique septentrional) et avec des fonds plutôt penchants (Fig. 1).

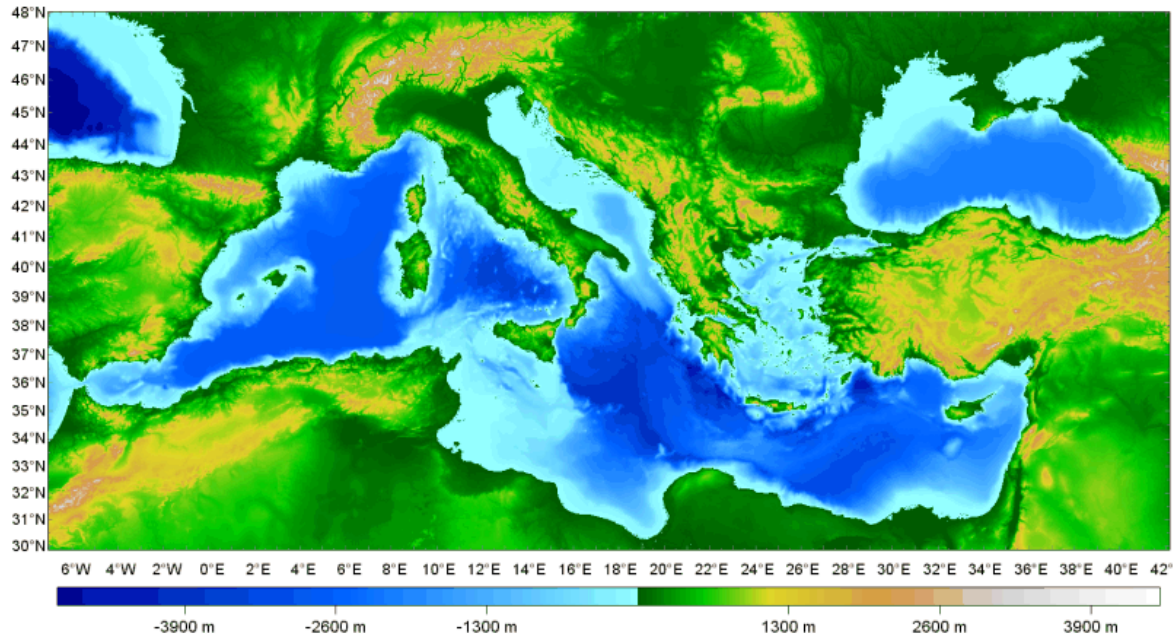

Fig. 1. Bathymetrie de la Méditerranée (www.unipv.it/cibra/edu_Mediterraneo_uk.html).

Les caractéristiques morpho-stratigraphiques des plateformes continentales sont différentes par rapport aux variations des caractéristiques géologique des marges méditerranés. Il y a plusieurs éléments qui ont contrôlé l'évolution sédimentaire de ces plateformes. Les facteurs les plus importants sont: l'arrangement tectonique, les variations du niveau de la mer, l'apport sédimentaire terrigènes et les processus d'erosion-instabilitè sous-marin.
La sédimentation dans ces plateformes est principalement silicoclastique avec apports fluviaux. Pendant l'Holocène les fleuves principaux (ex. Rodano, Po, Nilo, Ebro , Tevere) ont construit des corps deltaïque très étendus qui, quelques fois, ont de caractères distinctifs (front deltaïque et prodelta); il y a aussi des situations particulières, caractérisées par une sédimentation biogénique-carbonatique dans un climat tempéré (ex. Iles Baleari et Iles Pontine) ou volcanique (ex. Iles Eoliennes, Santorini, Pantelleria).
Le régime hydrodynamique est microtidal (excursion de marée <30-40 cm) à prévalence houleuse. La circulation superficielle est contrôlée par les vents et par le flux d'eau provenant de l'Océan Atlantique; cette eau est très importante pour la compensation du déficit hydrographique de la Mer Méditerranée (l'évaporation est plus grande que les précipitations et les apports fluviaux), en plus, l'entré de cette eau produit une circulation antiestuarine, caractérisée par afflux d'eau superficielle atlantique et reflux d'eau méditerranéenne profonde.
Sur la base des connaissances actuelles, il est évident que la plupart des dépôts de sable utilisables pour l'engraissement des plages en érosion présents dans les plateformes de la Méditerranée sont rapportables à paléo-cordons littoraux/paléo-plages formés pendant la dernière transgression (dépôts transgressifs de la séquence du quaternaire tardif).

Les dépôts de la séquence du quaternaire tardif se sont formés pendant le dernier cycle de variation du niveau de la mer (cycle du quaternaire tardif qui s'est déroulé pendant les derniers 120.000 ans ; Fig. 2).
Au cours du cycle plusieurs phases eustatiques, liées à l'expansion des glaciers se sont déroulées. Ces phases sont:

1- phase de chute;
2- phase de stationnement bas (18.000 y B.P.) – niveau de la mer : -120 m-;
3- phase de remontée – Transgression Versilienne (à partir d'il y a 18.000 ans jusqu'à 6.000 ans);
4- phase de haut stationnement (derniers 6.000 ans) – niveau de la mer proche au niveau actuel-.

La remontée a été caractérisée par taux très élevés (moyennement 10 mm/année) et par une durée très brève (presque 10.000 ans); par conséquence dans la plus grande partie des cas la transgression liée a cette remontée s'est développée d'une façon pas-dépositionelle. Au contraire, la phase de chute du niveau de la mer a été très lente (taux ~1 mm/année): elle a eu un durée majeure (presque 100.000 ans) et potentiellement il y a eu le temps nécessaire à la formation de dépôts régressifs considérables d'un point de vue volumétrique (dépôts de régression forcée).

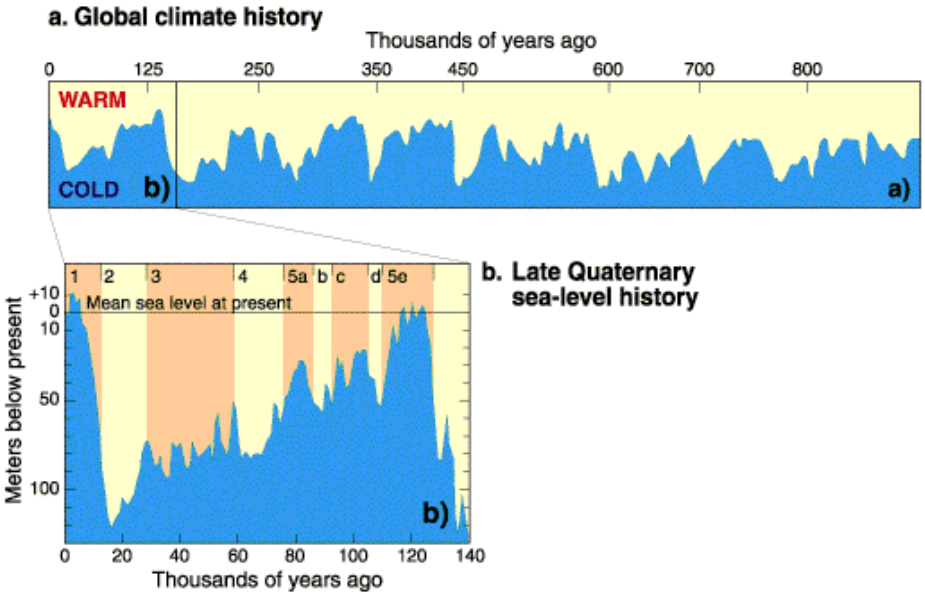

*Fig. 2. a) variation du niveau de la mer pendant le Pléistocène supérieur ; b) variation du niveau de la mer pendant le Quaternaire tardif (*http://en.wikipedia.org/wiki/National_Oceanic_and_Atmospheric_Administration*).*

D'un point de vue stratigraphique-séquentiel, les dépôts qui se sont formés pendant le cycle du Quaternaire tardif représentent une séquence de déposition[1] du IV^{ème} ordre (Séquence de Déposition du Quaternaire Tardif – SDQT), potentiellement composée par quatre Systems tracts[2] (FSST – Falling Sea Level Systems Tract ; Helland-Hansen et Gjelberg, 1994; LST – Lowstand Systems Tract ; Posamentier et Vail, 1988; TST – Transgressive Systems Tract ; Posamentier et Allen, 1993; HST – Highstand Systems Tract ; Posamentier et Vail, 1988).
En réalité, même en considérant secteurs de plate-forme très étendus (quelques dizaines de km), seulement dans des cas particuliers il y a la séquence complète. Cela parce qu'il y a plusieurs éléments qui contribuent à la formation des dépôts. Les éléments les plus importants sont: les apports sédimentaires, la distance des zone d'alimentation (les fleuves), les processus de distribution des sédiments dans la plate-forme (liés à l'action du mouvement houleux et des courants) et la physiographie (morphologie et inclination) de la surface basale. On doit aussi considérer que les dépôts sont soumis aux phénomènes érosifs post-déposition qui limitent la préservation. Variations du niveau de la mer successives à la formation des dépôts peuvent causer leur destruction, partiale ou totale. Les procès érosifs les plus considérables sont associés à

[1] Une séquence de déposition représente une unité stratigraphique composée par des dépôts qui se sont formés pendant un cycle complet de variation relative du niveau de la mer. Elle est constituée par une succession relativement conforme de couches génétiquement corrélées, et elle est délimitée à la de base et au toit par surfaces de *unconformity* ou par surfaces de conformité leur corrélées. (Mitchum et al. 1977).

[2] Les systems tracts représentent l'ensemble des dépôts qui se développent comme réponse à une phase spécifique de variation relative du niveau de la mer. Les systems tracts représentent donc l'ensemble des systèmes de déposition contemporains (Brown et Fisher, 1977) qui se cumulent avec modalité différentes en fonction de la phase de variation relative du niveau de la mer et du rapport entre taux d'apport des sédiments et variation de l'espace disponible.

l'exposition subaérienne qui s'est vérifiée dans l'émersion des plateformes pendant la phase de chute et du bas stationnement du niveau de la mer. Autres phénomènes érosifs peuvent se produire dans un ambiant entièrement sous-marin pendant la phase de transgression à cause de la translation du shoreface (plage submergée, Fig. 3). Le recul du shoreface est la cause de la formation de surfaces d'érosion transgressives (surfaces de ravinement; Swift, 1968; Nummedal et Swift, 1987). D'une façon analogue, surfaces d'érosion régressive peuvent se former pendant la chute du niveau de la mer (Plint, 1988).

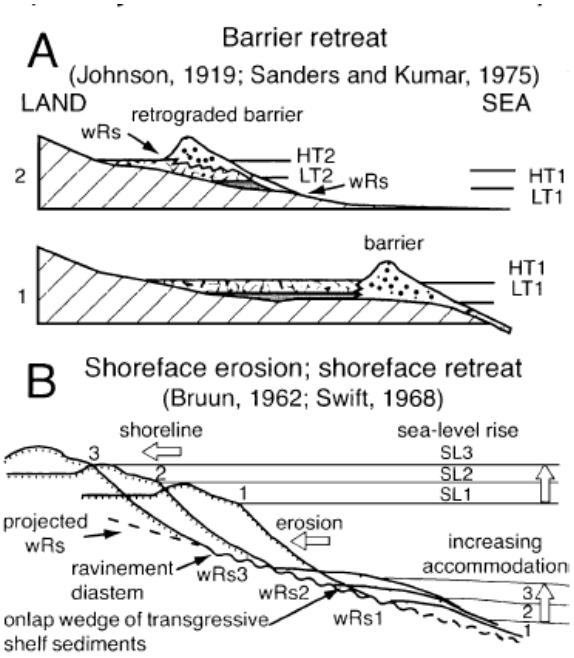

Fig. 3. Mécanisme de formation de la surface de ravinement dans un système barrière-lagune (a) et dans un système de plage (b); de Cattaneo et Steel (2003).

La surface de ravinement est identifiable dans les dépôts transgressifs et en genre elle sépare dépôts paraliques[3] (situés au-dessous) et dépôts marins (situés au-dessus). Les phénomènes de ravinement sont en mesure d'éroder des sédiments pour plusieurs mètres et quelque fois ils en déterminent la totale réélaboration. L'entité de l'érosion dépend principalement de l'énergie du mouvement houleux en correspondance du *shoreface* (il est donc inferieur dans les littoraux réparés) et du taux de remontée du niveau de la mer (il se réduit si la remontée est rapide; Cattaneo et Steel, 2003). L'érosion est de toute façon inferieure que celle associée aux *unconformity* subaériennes, par rapport auxquelles elle se distingue pour la morphologie moins articulée.
La possibilité de retrouver dépôts avec épaisseurs significatifs elle est donc liée à nombreuses conditions qui en ont influencé la formation-préservation. Pour les dépôts transgressifs, les facteurs principaux sont: taux d'apport sédimentaire considérable et/ou taux modestes de remontée du niveau de la mer, surface de base (la surface sur laquelle se produit la migration de la ligne de côte) péchée et avec une morphologie articulée, érosion réduite pour procès de ravinement; quelques fois, l'apport de sédiments fournis par l'érosion de sédiments plus anciens pendant la migration du littoral peut représenter une ultérieure aide à la formation des dépôts.
La pente de la surface de base influence l'épaisseur potentiel des dépôts: où la pente est considérable l'épaisseur des dépôts est majeur que où elle est modeste (Fig. 4); cela puisque, à parité de volume, les sédiments sont distribués sur des espaces qui deviennent de plus en plus réduits à l'augmenter de l'inclinaison de la surface.

[3] *Les dépôts paraliques se forment dans environnements côtiers internes (ex. boues qui se déposent dans les lagunes, tourbe, sables de *washover*).

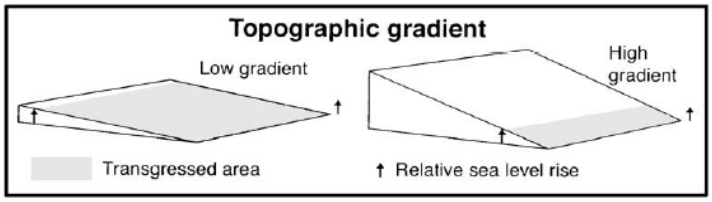

Fig. 4. Influence du gradient de la surface de base sur la surface transgressive (de Cattaneo et Steel, 2003).

En outre la pente de la surface de base représente un des principaux facteurs qui déterminent différentes modalités transgressives (Fig. 5). L'évolution transgressive des systèmes côtiers peut en effet varier de dynamiques *roll-over* sur surfaces à bas gradient jusqu'à dynamiques *encroachment* sur surfaces avec un gradient élevé (Cowell et al., 1995). De plus, la dynamique de migration du littoral conditionne d'une façon considérable la stratigraphie finale des dépôts et leur préservation. Dans plateformes à bas gradient (0.3°) Tortora et Cowell (2005) ont fixé les facteurs favorables les plus importants pour la préservation des dépôts; ces facteurs sont: les conditions de suralimentation, les variations significatives du rapport entre sédiment disponible et remontée du niveau de la mer, la morphologie articulée du substrat (ex. présence de dépressions ou de brusques ruptures de pente) et les variations du profile morphologique du littoral.

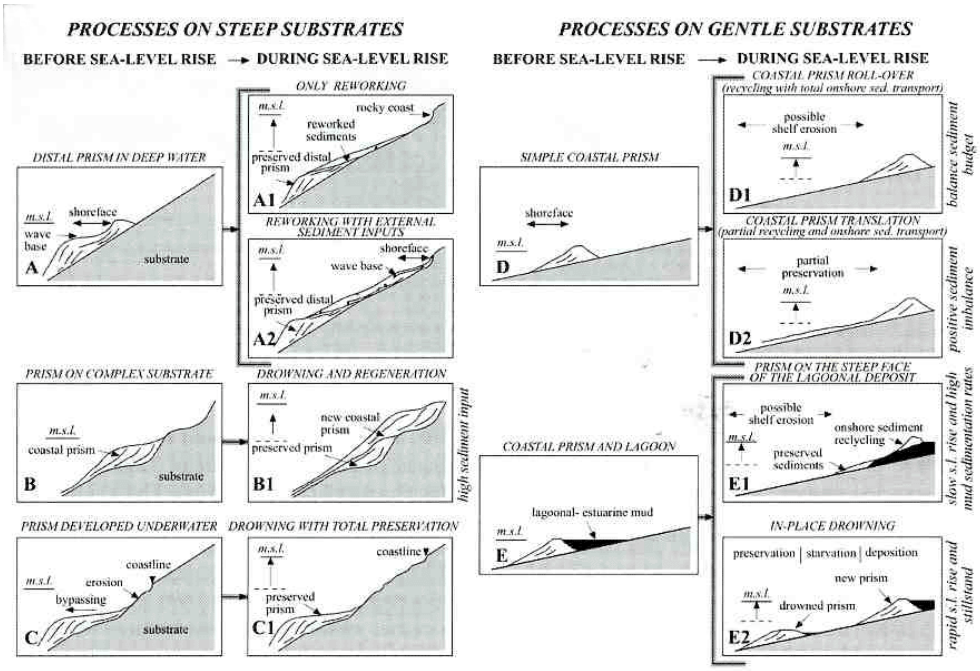

Fig. 5. Exemples des systèmes côtiers et des processus qui se développent sur substrats penchants et sur substrats peu penchants, pendant la remontée du niveau de la mer (de Tortora et al., 2001).

Dépôts de chute (Falling Sea Level Systems Tract -FSST-)

La chute du niveau de la mer jusqu'à –120 mètres a provoqué importantes variations paléogéographiques dues à la formation d'une surface de unconformity présente pratiquement sur toutes les plateformes de la Mer Méditerranée. Les dépôts qui se sont formés au cours de la chute du niveau de la mer sont appelés dépôts de régression forcée (Posamentier et al., 1992). Les dépôts de régression forcés sont composés par unités qui se forment, en suivant la chute di niveau de la mer, pendant la migration vers mer et vers secteurs plus bas de la plate-forme.
Leur conservation est généralement réduite et elle dépend des processus d'érosion associés à l'exposition subaérienne de la plate-forme; il y a aussi processus d'érosion sous-marine provoqués par la même phase régressive et éventuellement par la phase successive de transgression.

Ces dépôts ont été individualisés dans diverses zones de bordure de la méditerranée (Tesson et al., 1990; Ridente et Trincardi, 2005; Hernandez-Molina et al., 1994) et ils sont caractérisés par géométries, épaisseur, extension et lithologies extrêmement différents (Fabbri et al., 2002). Les lithotypes sableux se rapportent en général à des dépôts de shoreface, tandis que ceux qui sont essentiellement pélitiques montrent des faciès plus distaux, comme dans le cas des dépôts observés dans l'Adriatique par Ridente et Trincardi (2005).
Dans les plateformes tyrrhéniennes les dépôts sableux sont généralement référables à la partie la plus ancienne des Terrasses Dépositionnelles (Fig. 6). Les Terrasses Dépositionnelles submergées (sensu Chiocci et Orlando, 1996) sont dépôts sableux typiques des plateformes avec un haut gradient (ex. plateformes contrôlées par mouvement tectoniques, plateformes environnantes les iles volcaniques, etc.). Ces terrasses sont situées sur la plate-forme extérieur-bordure et elles sont composées par unités progradantes avec foreset à haut angle. En genre leur formation s'est produite pendant la dernière phase de chute du niveau de la mer, mais elle comprend même celle de bas stationnement.

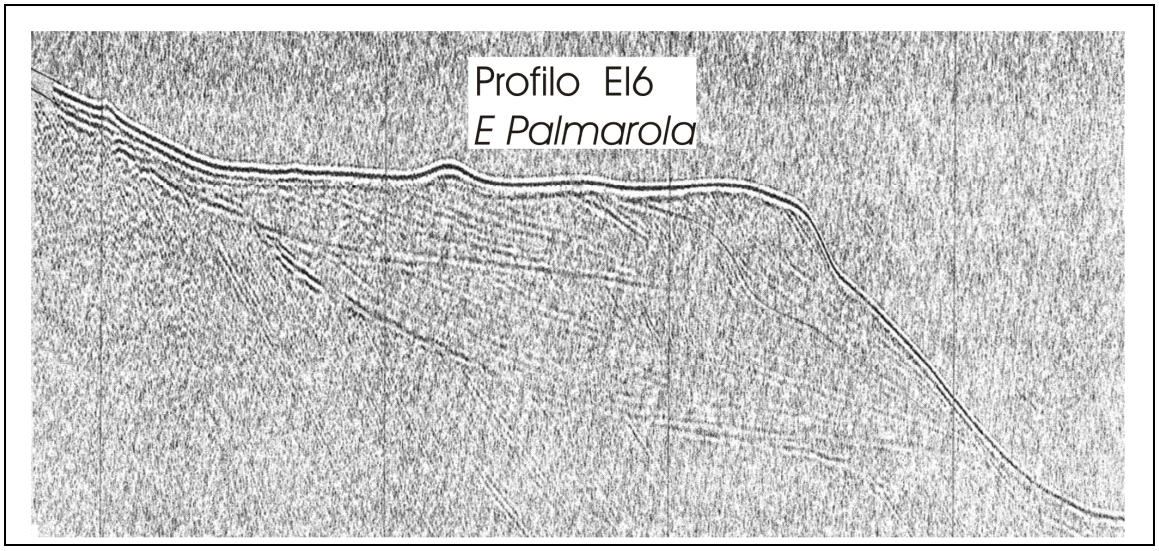

Fig. 6. Terrasses de dépôts submergées au large de l'île de Palmarola (Archipel Pontino occidental, Italie).

Dépôts de bas stationnement (Lowstand Systems Tract -LST-)

Les dépôts de bas stationnement se sont formés quand le niveau de la mer a atteint le minimum eustatique (Last Glacial Maximum) et ils se trouvent en général à l'intérieur des vallées incisées au-dessus des surfaces d'*unconformity*. Autres dépôts typiques se situent sur la bordure de la plateforme où ils constituent des enclaves côtières progradant (*shelf-margin deposits*).
La formation-préservation des dépôts de bas stationnement dépend des apports sédimentaires, de la physiographie de la plate-forme et de la profondeur de la bordure (Trincardi et Field, de 1991). Dans les plateformes tyrrhéniennes les dépôts sableux correspondent en genre aux dépôts qui constituent les unités des terrasses dépositionnelles submergées les plus récentes (Fig. 6); plus rarement ils se retrouvent à l'intérieur de vallée incisée où toutefois ils sont toujours presque recouverts par sédiments pelitiques très épais.

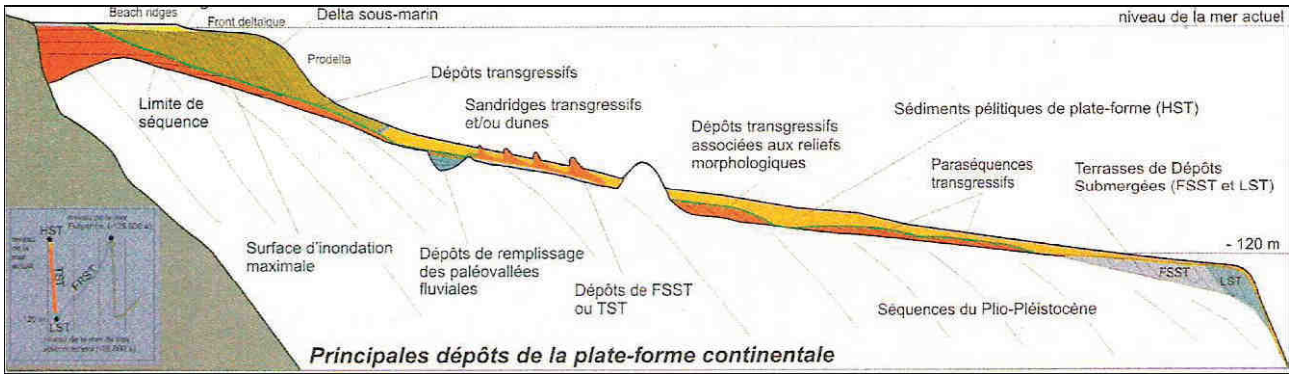

Fig. 7. Principales dépôts de la plate-forme continentale.

Dépôts de remontée (Transgressive Systems Tract -TST-)

Dans nombreuses zones la transgression a été non-dépositionnelle ou elle a été accompagnée par processus d'érosion. Les dépôts transgressifs, qui sont les inertes les plus utiliser pour les engraissements, ils se trouvent seulement dans des zones particulières du point de vue morphologique, qui ont reçu des apports sédimentaires significatifs (es. plate-forme calabrais-tyrrhénienne, quelques secteurs des plateformes catalanes, de la Toscane, du Latium, du Nord Adriatique, de la Ligurie).
Un élément-clef pour la formation-conservation des dépôts transgressifs est la topographie héritée des précédentes phases de chute et de bas stationnement. Ces dépôts se retrouvent le plus souvent avec des épaisseurs très consistants dans des zones bien alimentées où la surface de transgression est plus escarpée.
Les dépôts transgressifs peuvent être de natures très variable soit pour tissage et composition soit pour géométrie et dimension (Cattaneo et Steel, 2003); généralement les dépôts sableux sont associés aux dépôts de fleuves, dépôts littoral, *sand ridges*, formes de fond, etc. D'un point de vue sismostratigraphique, ils sont identifiés à partir de l'individualisation de corps en situation rétrograde limités au toit par la surface de majeure ingression marine. Dans l'ensemble des plateformes de la Méditerranée ces dépôts se réfèrent principalement à des systèmes littoraux (Fig. 8), qui souvent se forment en zones adjacentes à hauteurs morphologiques, au remplissage des vallées incisées et à formes de fond (type dunes).

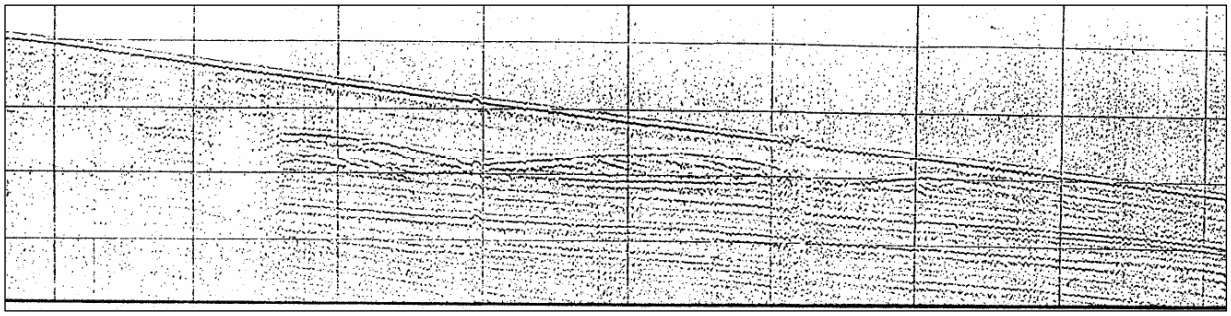

Fig. 8. Dépôts littoraux – paléobarres? au large de Golfe de Gaeta (plate-forme continentale du Latium, Italie).

Dépôts de haut stationnement (Highstand Systems Tract -HST-)

La phase de haut stationnement commence il y a 6.000 ans quand le niveau de la mer a atteint une hauteur proche celle actuelle. Pendant cette phase les systèmes de déposition actuels se sont formés et par conséquence une sédimentation surtout pélitique s'est instaurée dans les zones de plate-forme (Fig.7). Les pélites constituent un dépôt cunéiforme dont l'épaisseur décroît vers mer. Dans les zones où la plate-forme est très étendue ou peu alimentée l'épaisseur des pélites se réduit jusqu'à s'annuler, en laissant affleurer sur le fond les dépôts plus anciens. Les principaux agents de contrôle qui gouvernent la sédimentation pélitique sont les apports fluviaux et les courants présentes en plateforme.
De fait, les majeures épaisseurs du cône pélitique se trouvent aux bords des embouchures des principaux fleuves et présentent des variations importantes selon le mouvement de la courant géostrophique. Par

conséquence, le long des plateformes de la méditerranée, les secteurs qui ont potentiellement une couverture pélitique réduite se trouvent en plateforme externe, dans des zones lointaines des embouchures des principaux fleuves et dans des zones situées sur des courant par rapport aux embouchures des fleuves. Du côté de la terre, les dépôts pélitiques de haut stationnement deviennent des dépôts sableux appartenant au prisme côtier actuel. Parmi les éléments primaires présents en plate-forme interne il y a les appareils des deltas sous-marins (front deltaïque et prodelta Fig. 9) qui ne sont jamais d'intérêt minier soit parce qu'ils sont formés par dépôts essentiellement pélitiques (prodelta), soit parce qu'ils se situent dans des zones où la dynamique sédimentaire est active (front deltaïque).

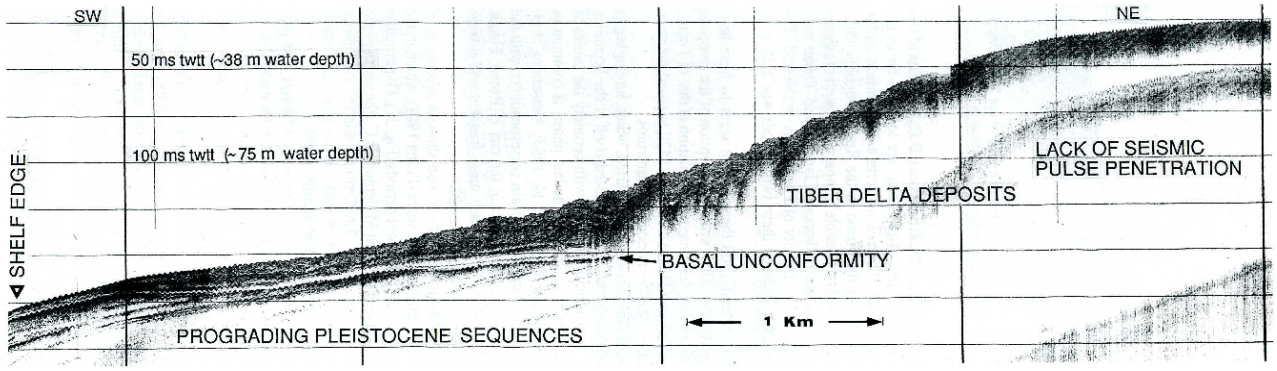

Fig. 9. Front deltaïque et prodelta du fleuve Tevere (plate-forme continentale du Latium, Italie); de Bellotti et al., 1994.

2 ASPECTS METHODOLOGIQUES

La recherche des dépôts sableux se base sur les analyses de données géophysiques (profils sismique, bathymétrie multifaisceaux et sonar latéral) et sur échantillonnages (carottes de sédiment). Au début les dépôts sont identifiés d'un point de vue géophysique et successivement ils sont caractérisés d'un point de vue sedimentologique-stratigraphique (texture, composition, variabilité verticale et latérale, etc.) à travers l'analyse de champions de sédiment prélevés des carottes.
À propos des données géophysiques, la contribution fondamentale est donnée par les profils sismiques à réflexion à haute et très haute résolution. L'interprétation des données sismiques se base sur les principes de la stratigraphie sismique (Vail et al., 1977) qui permettent d'identifier les dépôts de potentiel intéresse en analysant le facies acoustique, la forme extérieure, la configuration interne, etc.
Les données sismostratigraphiques sont complétées avec des bathymétries multifaisceaux et données sonar latéral qui permet de réaliser analyses morphologiques et morpho-acoustiques qui peuvent fournir précieuse informations sur la distribution des dépôts émergents sur le fond de la mer (Fig. 10). En effet, très souvent les dépôts d'intérêt ont une forme extérieure caractéristique (par exemple cordons, coins, dunes) et ils donnent des morphologies bien évidentes et facilement relevables. En outre, en partant des données de *backscatter* fournis par les systèmes sonar latéral, il est possible d'avoir des indications sur la texture des sédiments qui affleurent sur le fond.
Les appareils géophysiques à haute résolution les plus communs et utiles pour la réalisation des prospections sont: Chirp ou Sub-bottom et Sparker ou Uniboom pour l'acquisition des profils sismiques; sondeur multifaisceaux petits fonds pour l'acquisition d'une bathymétrie de détail; sonar latéral petits fonds pour l'acquisition des sonogrammes à haute résolution. Enfin, l'échantillonnage des dépôts est réalisé avec vibro-carottier.
Ces appareillages sont ordinairement utilisés dans bateaux de moyennes dimensions avec systèmes de positionnement à précision élevée (DGPS et RTK).

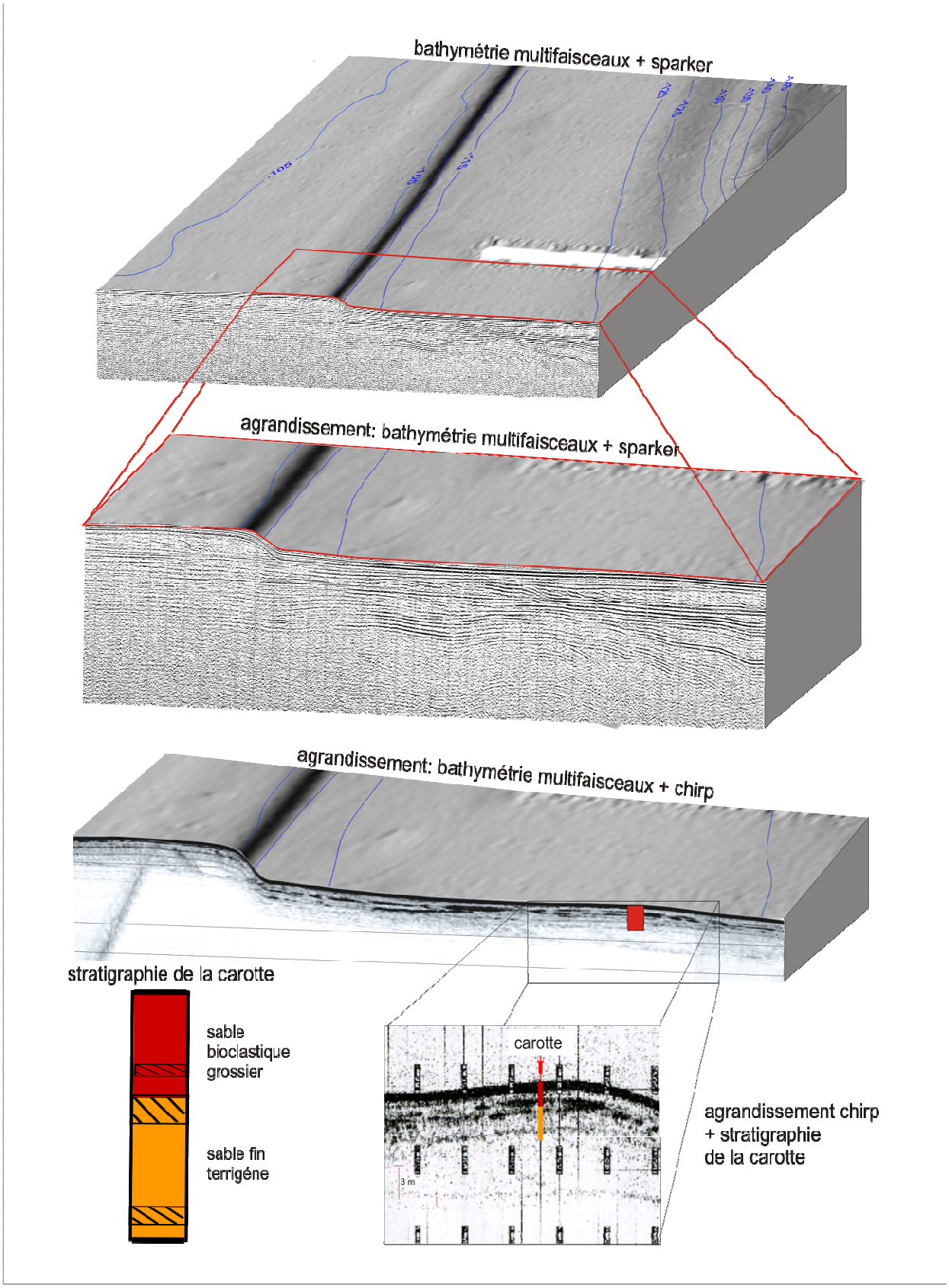

Fig. 10 Intégration des données.

Prospections à mer

Les campagnes de recherche doivent se dérouler en utilisant des embarcations aptes, équipées avec plusieurs types d'instruments, utiles à réaliser (Fig. 11):

- Positionnement satellitaire avec une haute précision avec correction différentielle ou RTK;
- Bathymétrie: multifaisceaux et sondeur monofaisceau;
- Sub Bottom Profiler ou Chirp pour l'analyse sismostratigrafique du fond marin à très haute résolution;
- Sparker ou Boomer pour l'analyse sismostratigrafique du fond marin à haute résolution;
- Sonar latéral pour la caractérisation morpho-acoustique du fond;
- Vibro-carottier pour l'échantillonnage du sous-fond marin.

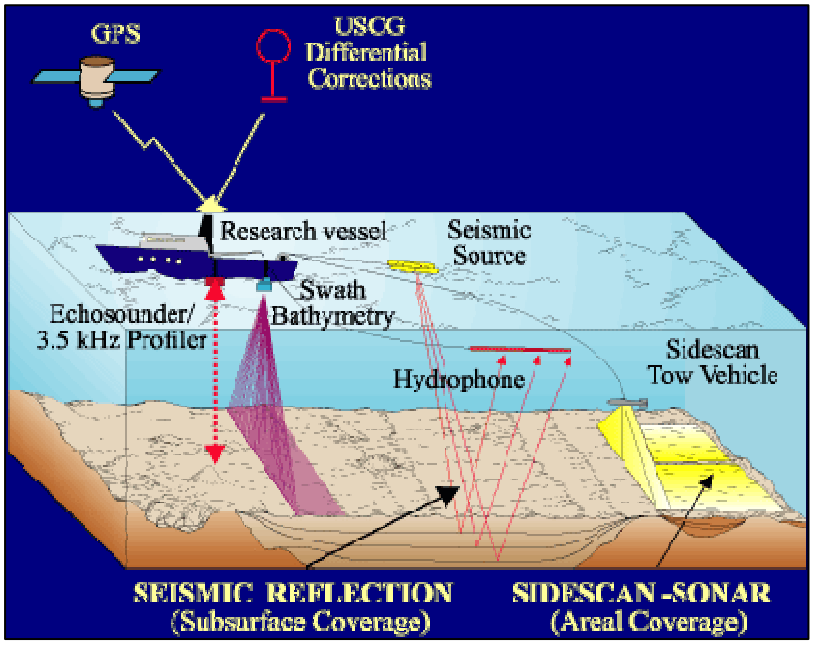

Fig. 11. Configuration typique d'une embarcation utilisée pour la prospection géophysique (http://serc.carleton.edu/eet/seafloor/case_study.html)

Les données acquises pendant les relèvements doivent être en relation à un système géodésique à travers des coordonnées géographiques; actuellement, le positionnement des données est réalisé au moyen GPS (*Global Positioning System*). Le GPS est un système de relevé satellitaire basé sur le principe de la triangulation, composé par trois segments:

- segment spatial: 24 satellites qui orbitent autour de la terre, et qui assurent la visibilité de 4 satellites, au moins, n'importe pas dans quel moment et dans quel point de la superficie terrestre;
- segment usager: antenne, récepteur, accessoires de différent type qui permettent de recevoir les signaux émis par les satellites et de traiter l'information sous forme de coordonnées géographiques;
- segment de contrôle: 5 stations de contrôle avec des coordonnées terrestres de haute précision, qui reçoivent continuellement des signaux depuis les satellites, pour en pouvoir contrôler et corriger des éventuelles erreurs orbitales.

Pour obtenir une précision du positionnement des données inferieur ou mètre il est nécessaire d'appliquer la correction différentielle (DGPS - GPS différentiel). Une précision supérieure (centimétrique) est rejointe en utilisant la technique RTK (*Real Time Kinematic*). Les données du placement sont envoyées en temps réel à un système de navigation et successivement elles peuvent être régies à travers des systèmes GIS (Geographic Information System).

Méthodes indirectes

Bathymétrie

Le mesurage de la profondeur du fond est réalisé d'une manière indirecte à travers des systèmes qui se basent sur la propagation des ondes acoustiques dans la colonne d'eau. L'instrument traditionnel est le sondeur monofaisceau (*singlebeam*), qui permet d'acquérir les données au-dessous de sa verticale; dans les dernières années les relèvements bathymétriques sont de plus en plus réalisés à travers le système multifaisceaux, qui permet d'acquérir des données extrêmement précises et avec une résolution très élevée, le long d'une bande de fond allongée parallèlement à la route du bateau.

Sondeur monofaisceau

Le sondeur monofaisceau émet un signal acoustique verticalement vers le fond de la mer, en enregistrant le signal réfléchi par le fond. L'instrument consiste essentiellement en un transducteur qui émet une vibration mécanique qui engendre une onde sonore; le transducteur se trouve sur la coque de l'embarcation et il est caractérisé par une fréquence de l'impulsion variable entre 10 et 200 kHz.
Pour les relèvements effectués sur la plate-forme continentale (profondeurs maximums de 120-150 m), on utilise des systèmes avec une haute fréquence avec lesquelles il est possible d'obtenir des données bathymétriques avec une résolution très haute. La profondeur du fond est calculée par le demi-produit du temps (t) par la vitesse de propagation (v) des ondes acoustiques dans l'eau marine. La valeur de référence pour la vitesse de propagation dans l'eau marine est de 1500 m/s, toutefois mesures bathymétriques précises nécessitent d'une calibration de l'appareil qui considère la variation de la vitesse en fonction des changements des caractéristiques physicochimiques de l'eau marine (température, salinité, pression) le long de la colonne d'eau.

Sondeur multifaisceaux

Le sondeur multifaisceaux (*multibeam*) est la technologie qui restitue données bathymétriques avec la résolution et la précision les plus hautes possibles, par conséquence il est largement utilisé. La marche du fond est représentée sur cartes bathymétriques, *shaded reliefs* 2D et 3D et cartes des pentes (Fig. 12). L'interprétation des éléments morphologiques présents sur le fond est rendue à travers des cartes géomorphologiques. Dans quelques cas il est en outre possible d'extraire les données de *backscatter* du fond à partir des données du sondeur multifaisceaux.
Le sondeur multifaisceaux est installé sur le bateau et il émet des ondes acoustiques avec des fréquences qui dans les systèmes utilisés pour les relèvements en petit fonds sont variables entre 200 et 455 kHz. Le système émet nombreux rayons ou *beams* (jusqu'à 240), distribués le long d'un éventail avec une ouverture presque de 150º au maximum, orientés perpendiculairement à la direction de mouvement du bateau. De cette manière on acquiert les valeurs de profondeur le long d'une bande du fond d'ampleur variable en relation au battant d'eau; dans bas fonds (profondeur inférieure à 100 m) la couverture latérale est moyennement 2-3 fois majeure que le battant d'eau. En acquérant les données long des lignes parallèles et situées à une juste interdistance il est possible d'obtenir le 100% de la couverture du fond marine.

Pour compenser les effets sur les mesures bathymétriques produits par les conditions environnementales existantes pendant l'acquisition (variations de l'interface eau- air causées par marées, variations de l'assiette de l'instrument causée du mouvement du bateau), le système multifaisceaux doit être interfacer à:

- une centrale d'attitude pour les effets du roulis (roll), du tangage (pitch), etc.;
- une boussole qui définit l'orientation de l'embarcation par rapport au nord magnétique;
- un marégraphe pour calibrer la mesure de la profondeur par rapport aux variations du niveau de la mer.

Au debout et à la fin des relèvements bathymétriques il faut exécuter des spécifiques lignes de calibrage nécessaires pour calculer les paramètres de correction relatifs à l'organisation statique de l'instrument et du bateau (*roll offset, pitch offset*, etc.). Tous les jours il faut mesurer des profils de vitesse par des sondes de vitesse - SVP - (*sound velocity profile*) ou sondes CTD (*conducibility températures density*); les premières effectuent des mesures directes de la vitesse, les secondes effectuent des mesures indirectes à travers les paramètres chimique-physiques.

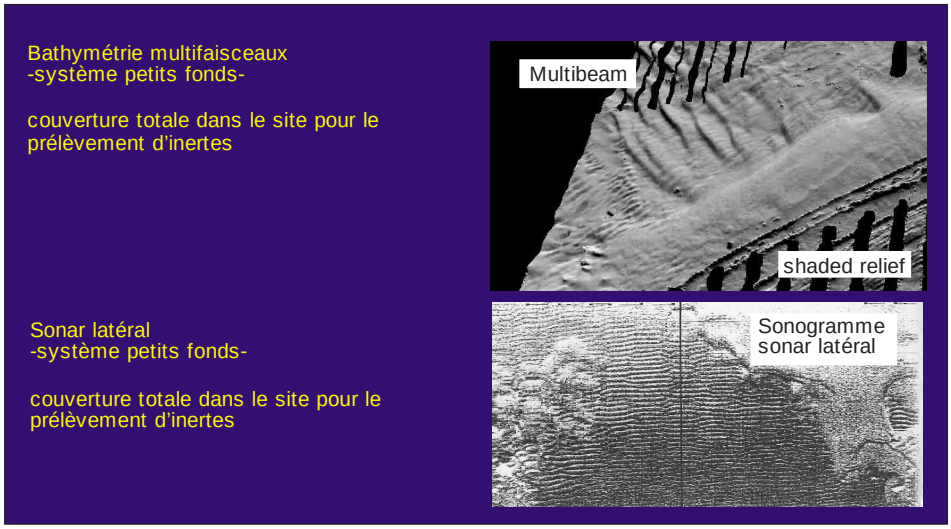

Fig. 12. Bathymétrie multifaisceaux et sonogramme du sonar latéral.

Analyse morpho-acoustique du fond au moyen de sonar latéral

Le sonar latéral consent d'acquérir l'image morpho-acoustique du fond (sonogrammes) comparables aux photoaériennes terrestres (Fig. 12). À partir des sonogrammes on réalise des cartes du facies sonar qui identifient des portions de fond avec un différent *backscatter* et qui permettent d'effectuer des analyses morphologiques et d'avoir des indications sur la nature des sédiments.
Le sonar latéral est remorqué par l'embarcation et il est lui relié à travers un câble qui le joint avec les systèmes d'enregistrement à bord. L'instrument émet des ondes acoustiques à travers une série de transducteurs, en formant un faisceau orienté transversalement à la route qui couvre une zone du fond généralement comprise entre quelques centaines de mètres et puis il enregistre les ondes acoustiques qui proviennent du fond (*backscatter*). L'écho ainsi recueilli est essentiellement une représentation des phénomènes de diffraction et de la réflectivité du fond; les phénomènes de diffraction se manifestent quand la longueur d'onde du signal incident est comparable avec les discontinuités du fond (rugosité). Les élevées fréquences qui caractérisent le système, variables entre 100 et 500 kHz, assurent l'absence de pénétration et l'élevée résolution des données.
L'image morpho-acoustique du fond exprime les variations d'intensité du *backscatter*, en termes de nuances de gris, associées à variations morphologiques, de la texture/composition des sédiments et à la présence d'affleurements rocheux, des zones colonisées par phanérogame marine (ex. *Posidonia oceanica*) ou des œuvres anthropiques.
Actuellement les données sont acquises en digital pour pouvoir effectuer les élaborations (ex. *slant range*, correction de vitesse et TVG) et la georéférenciation des images ainsi que les mosaïques.
Normalement les données sonar latéral et multifaisceaux sont analysées d'une façon complète pour obtenir une précise reconstruction de la morphologie du fond marin.
En outre, il y a des modèles qui complètent dans un unique système le Sub-Bottom Profiler et le Sonar latéral.
Autres méthodes utilisables pour obtenir des informations sur la nature du fond sont les cameras de télé sous-marines, remorquées ou installées sur un ROV (*Remote Operated Vehicle*) et la prospection visuelle directe à travers des opérateurs sous-marins.

Analyse sismostratigraphique du sous-fond marine: sismique à réflexion monocanal à haute et très haute résolution

La structure du sous-fond marin est étudiée en utilisant des méthodes indirectes, surtout la sismique à réflexion monocanal. Contrairement aux méthodes vues auparavant, on utilise des ondes acoustiques avec une mineure fréquence, qui puissent se propager dans le sous-sol. Les ondes sont réfléchies en présence de variations d'impédance acoustique, liées à variations de vitesse et/ou densité à l'intérieur des sédiments (Fig. 13A). Les signaux réfléchis par les interfaces permettent de reconstruire la stratigraphie en temps du sous-fond marin. Généralement, la profondeur de pénétration est directement proportionnelle à l'énergie du signal émise et inversement proportionnelle à la fréquence, tandis que la résolution est directement proportionnelle à la fréquence; ces paramètres sont très variables en fonction de l'instrument utilisé (Fig. 13B).
Pour satisfaire les différentes exigences de pénétration et de résolution on utilise beaucoup les sources sismiques caractérisées par différent valeurs d'énergie et de fréquence du signal émis. Dans le cas de la recherche de dépôts sableux en mer les plus communs sont le Chirp et le Sub Bottom Profiler pour très haute résolution et le Sparker et le Boomer pour l'haute résolution.

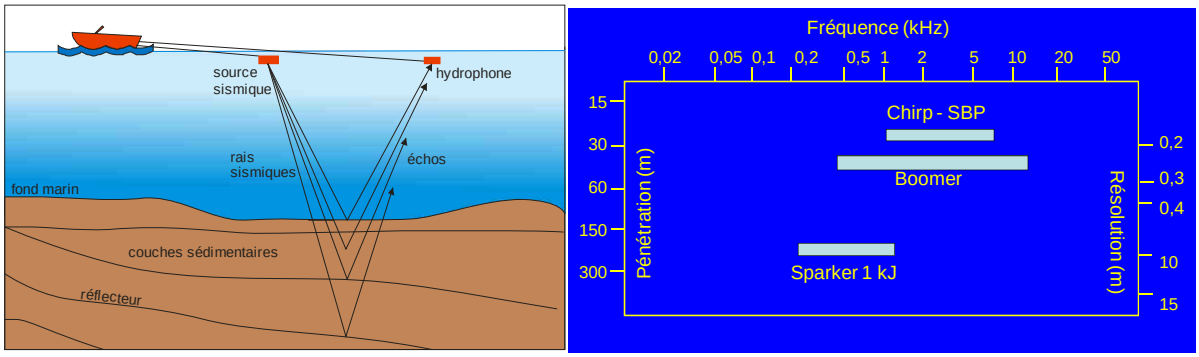

Fig. 13. A) La méthode de sismique réflexion; B) Relation entre la fréquence de l'impulsion et la résolution-pénétration.

Chirp et Sub-Bottom Profiler

Chirp (CHP) et Sub Bottom Profiler (SBP) sont des sources de type piézo-électrique qui fournissent donnés de sismique à réflexion à très haute résolution. Les ondes émettent une énergie réduite (5 joule pour SBP et 4kW pour CHP) et fréquences élevée (en genre variables entre quelque kHz et une dizaine de kHz) qui permettent de pénétrer le fond pour quelques dizaines de mètres en sédiments fins non consolidés et de rejoindre une résolution de quelques décimètres. En présence de sédiments grossiers la pénétration des systèmes est limitée à quelques mètres, par conséquence les profils acquis avec ces sources sont utilisés surtout pour mesurer l'épaisseur de la couverture pélitique et pour définir les caractéristiques de la partie superficielle des dépôts sableux (Fig. 14).

Sparker et Boomer

Sparker (SPK) et Boomer sont des sources impulsives de type électrique (SPK) et électromagnétique (Boomer). Le Sparker, employés pour prospections à haute résolution, émit des ondes acoustiques avec puissance variable de 0.2 à 1kJ et des fréquences comprises entre 0.2 et 1 kHz. Actuellement le traditionnel système tri-électrode a été modifié en systèmes multi-électrode (*multi-tip*) qui permettent d'augmenter la résolution-pénétration du système en réduisant l'effet bulle qui caractérise les sources impulsives. Le Boomer émit des ondes acoustiques avec puissance variable de 0.1 à 0.4 de kJ et fréquence en genre comprise entre 0.5 et 12 kHz. En considération des énergies et des fréquences caractéristiques des sources Sparker et Boomer, les profils sismiques acquis avec ces sources sont caractérisés par une majeure pénétration (même une centaine de mètres), et par une mineure résolution (de 1 mètre à quelques mètres) que les systèmes Chirp/Sub Bottom Profiler, et par conséquence ils sont utilisés pour identifier la base des dépôts sableux (Fig. 14).

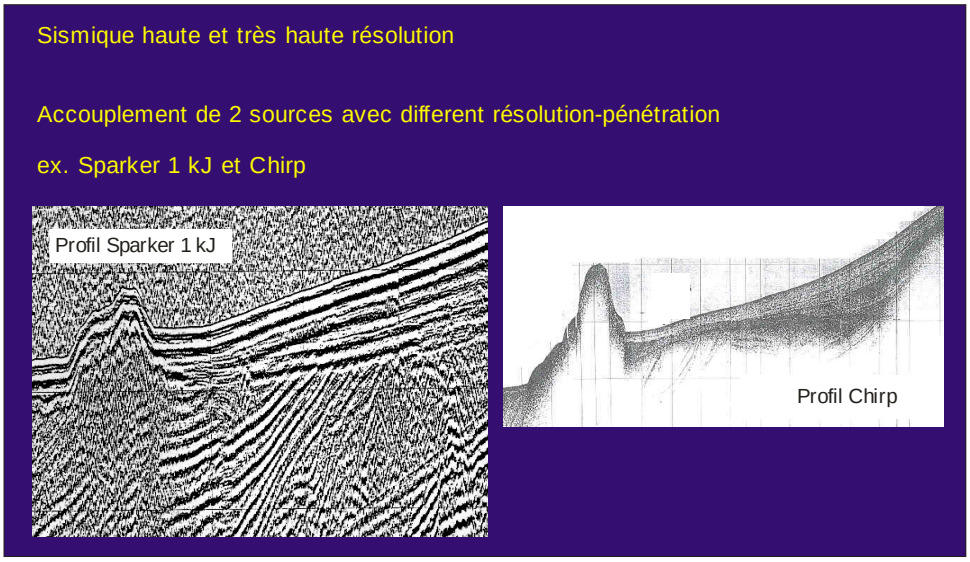

Fig. 14. Profils sismiques à haute résolution (Sparker 1 kJ) et à très haute résolution (Chirp).

Les profils sismiques acquis avec les différentes sources permettent de faire l'analyse sismostratigraphique des dépôts de plate-forme; cette analyse est la principale méthode d'analyse indirecte. L'analyse sismostratigraphique permet en effet d'identifier les différentes unités sismiques présentes dans le sous-fond marin (définies à partir du facies sismique, de la géométrie et de la configuration interne) et d'en calculer la distribution et l'épaisseur.
À moins que des élaborations utilisées pour améliorer la qualité des profils sismiques (ex. amplification et application de filtres), pour les études de recherche de sables il ne faut pas d'élaborations particulières. Au contraire la phase interprétative est plutôt longue et complexe. Actuellement, pour optimiser les temps, on utilise des données digitales avec software spécifiques. L'interprétation en digitale est particulièrement indiquées pour les études de recherche des sables, qui en se déroulant avec des degrés d'approfondissement croissant, ils nécessitent d'intégrer rapidement les données acquises dans les différentes phases de la recherche. À partir de l'interprétation des données on réalise des cartes d'épaisseur des dépôts sableux, cartes d'épaisseur de la couverture pélitique et cartes de la profondeur (référée au niveau de la mer) des surfaces qui délimitent les dépôts.
Puisque souvent les dépôts d'intéresse sont partie d'unités qui se sont formées pendant des spécifiques phases de variation du niveau de la mer (es. remontée postglaciaire et chute-bas stationnement du dernier cycle), une contribution fondamentale pour leur identification-caractérisation dérive de utilise du modèle stratigraphique-séquentiel à haute résolution. Ce modèle peut être appliqué pour étudier les séquences de déposition du Pléistocène et il donne souvent informations sur le paléo-environnement de déposition et su la nature des dépôts. Une correcte application des principes de la stratigraphie sismique et de la stratigraphie séquentielle à haute résolution permit d'interpreter certains unîtes sismiques comme gisements sableux avec un incertitude très basse, dans notre expérience presque inferieur au 10%.

Méthodes directes

L'échantillonnage des sédiments est normalement utilisé pour la caractérisation stratigraphique de la plate-forme continentale, en utilisant des méthodologies différentes pour l'échantillonnage superficiel et celui du sous-fond marin.

Échantillonnage du sous-fond marin

Pour l'échantillonnage du sous-fond marin on utilise le carottier qui permet de récupérer des carottes de sédiment de longueur variable selon le système utilisé et la typologie de sédiment présent. Les carottages sont effectués pour tarer les unités sismiques, définies à partir de l'analyse sismostratigraphique, et pour

définir les caractéristiques stratigraphiques des dépôts sableux. On doit rappeler que pour assurer une précise caractérisation stratigraphique il faut récupérer au moins 3-4 m à l'intérieur des dépôts sableux.
L'instrument le plus apte pour pénétrer les sédiments sableux est le vibro-carottier (Fig. 15), qui, en moyenne, peut rejoindre une pénétration de ~ 6 m.
Il y a plusieurs types de vibro-carottier (électrique, hydraulique, pneumatique), les dimensions desquels rendent nécessaire l'utilise d'embarcation de dimensions moyen-grandes. Ces embarcation doivent avoir d'équipements aptes et spécifiques (es. treuils, grue, etc.) en mesure d'assurer un facile emploi du vibro-carottier, soit pendant la phase de messe à mer-récupère, soit pendant le carottage. L'utilise des bateaux permet d'effectuer une majeure production journalière, pour la rapidité de déplacement et pour la possibilité de travailler même en conditions météo-marines pas optimales. Il est nécessaire que les bateaux soient doués d'un système de positionnement dynamique pour assurer le contrôle de la position pendant l'opération de carottage. En outre il est très utile que la profondeur et la vitesse de pénétration à l'intérieur du sédiment soient enregistrées pendant le vibro-carottage; en particulier, la vitesse de pénétration offre, à parité carottier utilisé, des indications sur la typologie de sédiment.
Un autre instrument très utilisé pour l'échantillonnage du sous-fond marin est le carottier à gravité (Fig. 16) qui toutefois offre à une bonne récupération (quelques mètres) seulement en sédiments fins peu consolidés. Par conséquence il ne résulte pas approprié pour la recherche des sables. Toutefois, dans les premières phases de l'investigation (ex. dans la première campagne géophysique), au cas qu'il soit disponible, il peut être utile pour effectuer quelques carottages d'essai pour obtenir des indications préalables sur la nature des sédiments.

Fig. 15. Vibro-carottier.

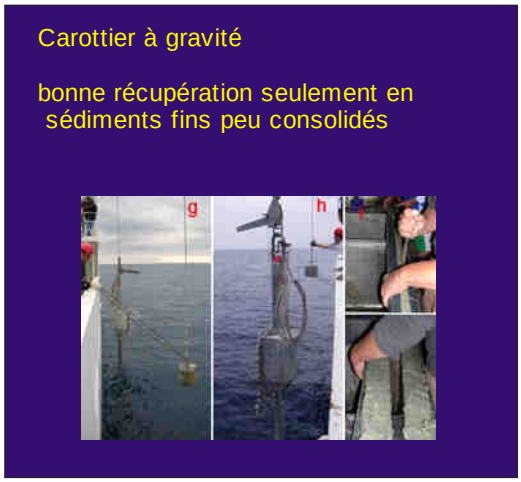

Fig. 16. Carottier à gravité.

Échantillonnage du fond marin

Les instruments utilisés pour l'échantillonnage de superficie sont la benne et le *box-corer* (Fig. 17), cependant la benne est la machine qu'on utilise plus diffusément pour sa rapidité d'emploi. Il existe deux typologies de bennes (Van Veen et Shipek), qui récoltent des échantillons en pénétrant dans le sédiment peu de dizaines de cm. L'échantillon provenant d'une benne est en général perturbé d'une façon plus ou moins prononcée; par contre, il *box*-corer conserve inaltérée la structure de l'échantillon de sédiment.
Analoguement aux carottages à gravité, les échantillonnages superficiels sont réalisés seulement dans les phases initiales pour avoir des informations préalables sur la nature des sédiments.

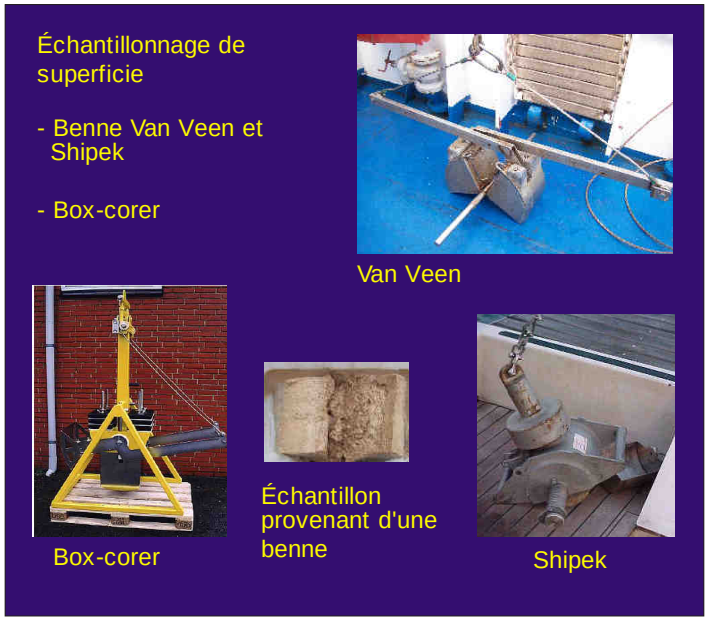

Fig. 17. Echantillonnage de superficie.

Analyses sedimentologiques et stratigraphiques

Les analyses sedimentologiques et stratigraphiques sont effectués sur des champions de sédiment prélevés des carottes, au fin de déterminer les caractéristiques granulométriques (diamètre moyen, *sorting*, etc.) et de composition (fraction bioclastique et silicoclastique, différenciation parmi les composantes principaux) du dépôt et de remarquer des éventuelles variations verticales et latérales.
L'échantillonnage des carottes se produit successivement à l'ouverture et à la description macroscopique. Avant l'ouverture des carottes il est utile d'effectuer des radiographies à rayons X qui permettent d'estimer la texture des sédiments et de remarquer des structures sédimentaires (es. laminages) pas visibles macroscopiquement, mais utiles pour définir l'ambiant de déposition.
Les analyses granulométriques et de la composition sont réalisés sur des champions prélevés dans les intervalles les plus significatifs des carottes. Les analyses granulométriques sont exécutées selon les méthodes traditionnelles, ex. tamisage ou tube de sédimentation pour les sédiments grossiers et laser ou *sedigraph* pour les sédiments fins. Les analyses minéralogiques-pétrographiques sont réalisées par diffractométrie aux rayons X et à la microscopie optique. Enfin, les calcimètries sont très utiles parce qu'elles permettent de déterminer le pourcentage du carbonate de calcium.
À partir des données sedimentologiques et de composition on reconstruit la stratigraphie des carottes et au moyen des diagrammes de corrélation celle des dépôts (Fig. 18).

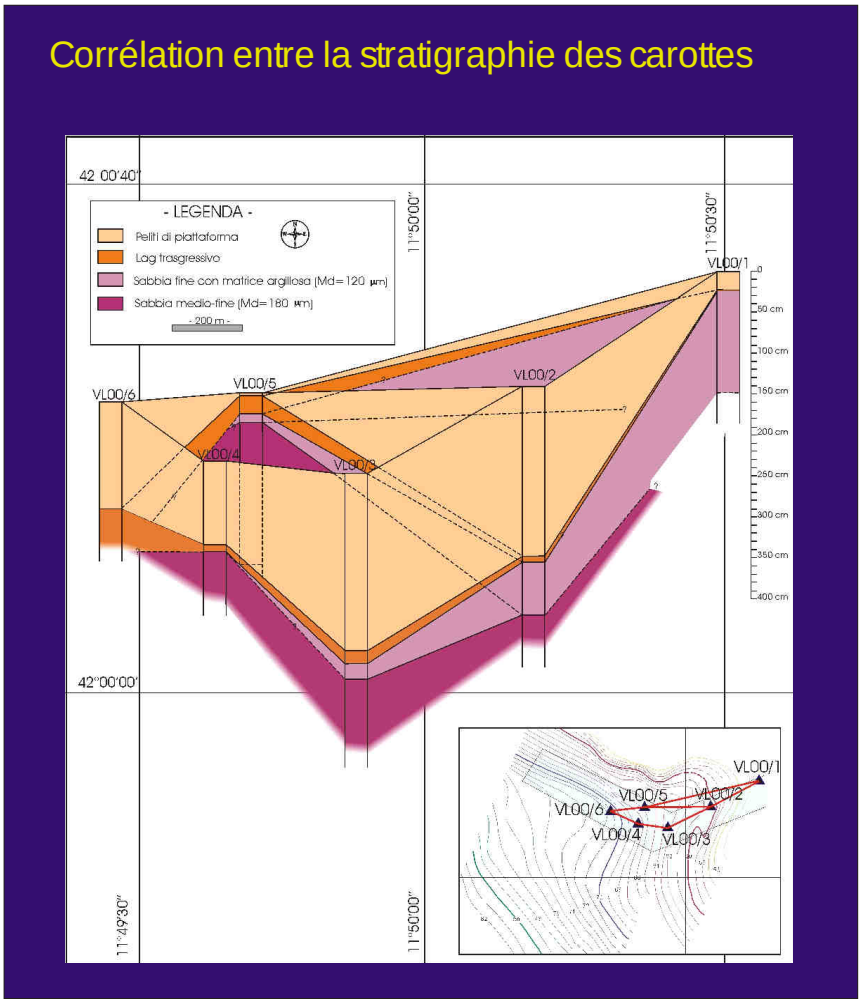

Fig. 18. Diagramme de corrélation stratigraphique.

Interprétation géologique-minière et synthèse des résultats

Cette activité est finalisée à la localisation des dépôts qui constituent l'objectif minier, en définissant les caractéristiques stratigraphique et en évaluant les volumes. L'interprétation et la synthèse sont effectuées à partir des résultats obtenus à travers les différentes méthodes (sismostratigraphique, sedimentologique-stratigraphique, etc.); par exemple il faut effectuer la corrélation entre les unîtes observées dans les profils sismiques et celles présentes dans les carottes.
Il s'agit d'une activité très délicate dans laquelle toutes les informations disponibles doivent être synthétisées. Par exemple, pour tracer les aires d'intéresse minier on doit considérer en même temps l'extension et l'épaisseur des dépôts sableux, celui des pélites et éventuelles variations stratigraphique latérales et verticales (Fig. 19). Pour cela il est indispensable compléter tous les résultats à disposition par logicielle GIS-CAD, qui permettent d'effectuer des analyses bi- tridimensionnels et des synthèses interprétatives.

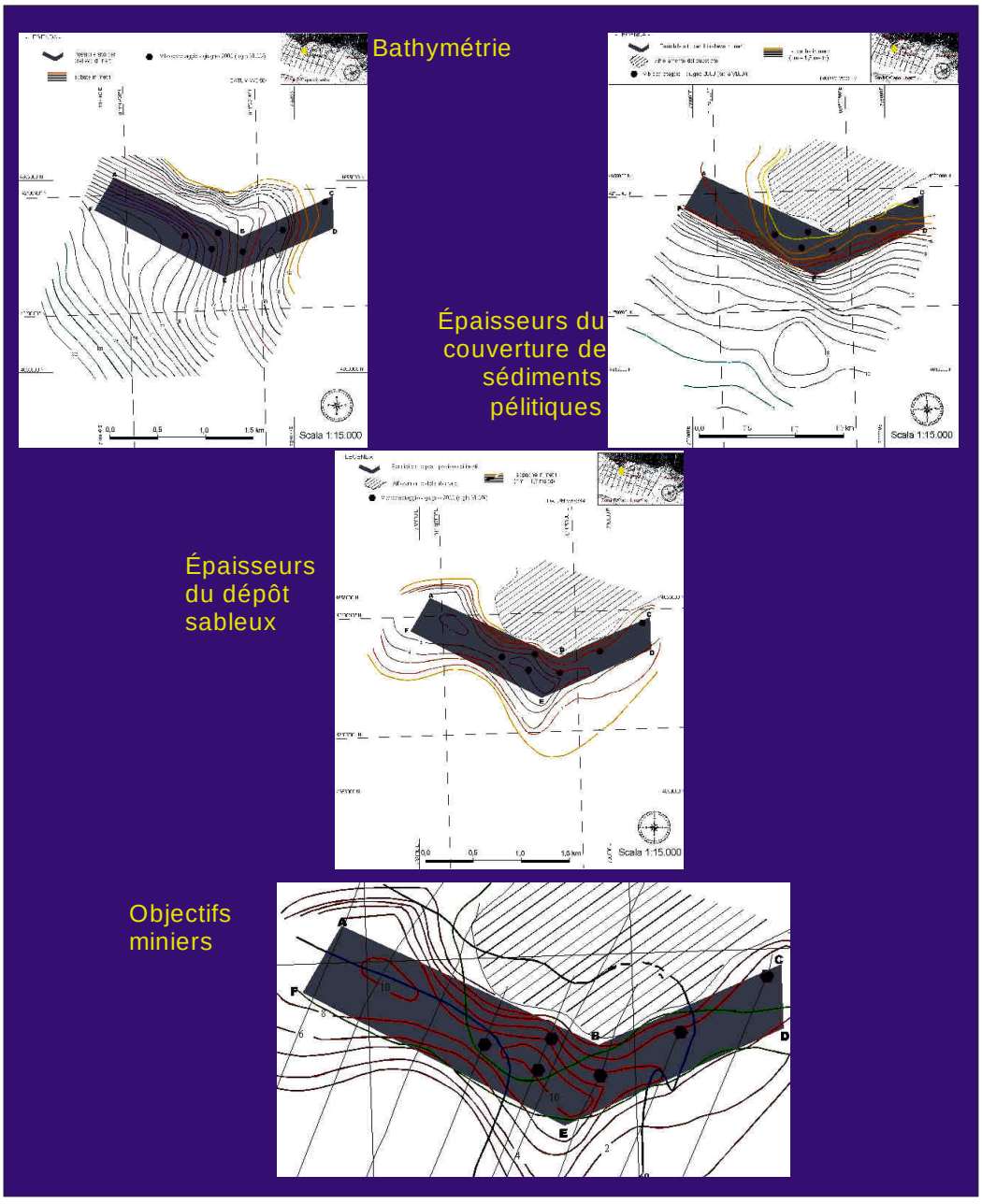

Fig. 19. Carte bathymétrique, carte d'épaisseur du dépôt sableux, carte d'épaisseur de la couverture pélitique et carte des objectifs miniers.

3 RECHERCHE EN MER DES SABLES

Généralité

La recherche en mer de sables prévoit l'exécution de plusieurs activités à dérouler dans différentes phases, (planification, recognition, connaissance, exploration et exécution) caractérisées par degrés d'approfondissement croissants dans des zones toujours plus restreintes («secteur de plateforme» et «zone d'intérêt»), qui ont comme but final la détermination et la caractérisation d'un, ou plus, sites pour le prélèvement des inertes.
On peut identifier les dépôts sableux par une recherche plutôt complexe avec nombreuses activités soit en mer, pour la réalisation des prospections (campagnes de relèvements finalisées à l'acquisition des informations géophysiques et sédimentologiques), soit en laboratoire pour l'analyse des données géophysiques et sédimentologiques.
La durée de la recherche est variable par rapport à la grandeur de la plate-forme étudiée. Pour secteurs très étendus (près de 1000 km^2) l'achèvement de la recherche requiert beaucoup de temps (au moins 3 ans) et il impose le déroulement systématique et séquentiel des différentes activités. Sur la base de ce qu'on vient de dire, la recherche doit être développée en différentes phases chacune caractérisée par nombreuses activités. Généralement il est nécessaire l'exécution de deux phases préliminaires (phase 1- de planification et phase 2- de recognition) et trois phases de prospections (phase 3- de connaissance, phase 4- d'exploration, phase 5- d'exécution), caractérisées par un détail croissant dans des zones toujours plus petites (Fig. 20 et 21). Il faut exécuter des prospections à grande échelle dans toute la plate-forme continentale, ces prospections doivent être suivies par prospections à moyenne échelle seulement dans les secteurs de plate-forme d'intérêt et par prospections très détaillées seulement dans la zone de plus grand intérêt; tous au fin de localiser les sites de prélèvement des inertes.
Pour optimiser les résultats de la recherche, il est nécessaire une robuste interaction entre les administrateurs locaux et l'institution responsable de la recherche pendant toutes les phases. Afin d'assurer la meilleure exploration des gisements disponibles, il est important achever les activités jusqu'à la phase d'exploration; en effet les dépôts sableux qui actuellement représentent ressources peu intéressantes (à cause de la difficile accessibilité ou de la réduite compatibilité avec les plages en érosion) dans un proche avenir ils pourraient être indispensables, puisque la demande est toujours en augmentation et aussi la technologie d'amélioration (sélection de texture) de sédiment pourra permettre de les utiliser.
De plus, il faut que les principales activités de recherche (ex. projet et supervision des prospections, interprétation des données et identification des objectifs miniers) soient réalisées par des institutions qui peuvent offrir hautes compétences. Cela est nécessaire parce que la disponibilité des dépôts sableux sous-marin, qui sont ressources non-renouvelables, est destinée à diminuer: d'une manière analogue à la recherche du pétrole, la précision des reconstructions stratigraphiques sera de plus en plus relevant, et elle nécessitera des méthodologies et technologies toujours plus sophistiqués.
Pour la réalisation des trois phases des prospections il faut effectuer campagnes de relèvements géophysiques et sédimentologiques, analyses en laboratoire, élaboration, interprétation des données et rédaction d'un rapport technique des résultats obtenus.
La recherche doit être effectuée en considérant éventuelles variations dans le plan des relèvements (ex. interdistance, longueur, orientation des lignes sismique, typologie du prospection) en fonction des résultats obtenus à partir de l'analyse des données acquises; ces variations doivent être possibles même pendant l'exécution des relèvements sur la base de l'interprétation préliminaire des données effectuée à bord. L'exécution des activités à l'intérieur des différentes phases est susceptible de variations significatives par réponse à des conditions d'urgence poussées par des problèmes socio-économiques et environnementaux.
Cependant, il sera nécessaire une exécution ordonnée et complète des activités de recherche, d'un façon que on parvienne à une évaluation correcte et complète des ressources disponibles, évaluation finalisée au choix les plus aptes pour la demande du commettant.
Outres phases (étude environnementale, opérations avant le dragage, opérations âpres le dragage) connexes à la exploitation, sont dédiées à l'évaluation des risques environnementales et/ou anthropiques qui dérivent des opérations de dragage. Pendant ces phases on utilise, en partie, les mêmes méthodologies de la recherche de sables, donc on souhaite vivement une intense collaboration avec les institutions qui déroulent ces recherches afin d'optimiser les relèvements.
Pendant les différentes phases, et particulièrement pendant la phase 5- d'exécution, toutes les informations et les résultats qui dérivent par les différentes méthodologies utilisées doivent être intégrées, pour la définition des caractéristiques sedimentologiques-stratigraphiques du dépôt, de l'extension et du volume. Pour cela l'utilisation des systèmes GIS-CAD, qui permettent la gestion et l'analyse intégrée, est fondamentale pour l'intégration des données.

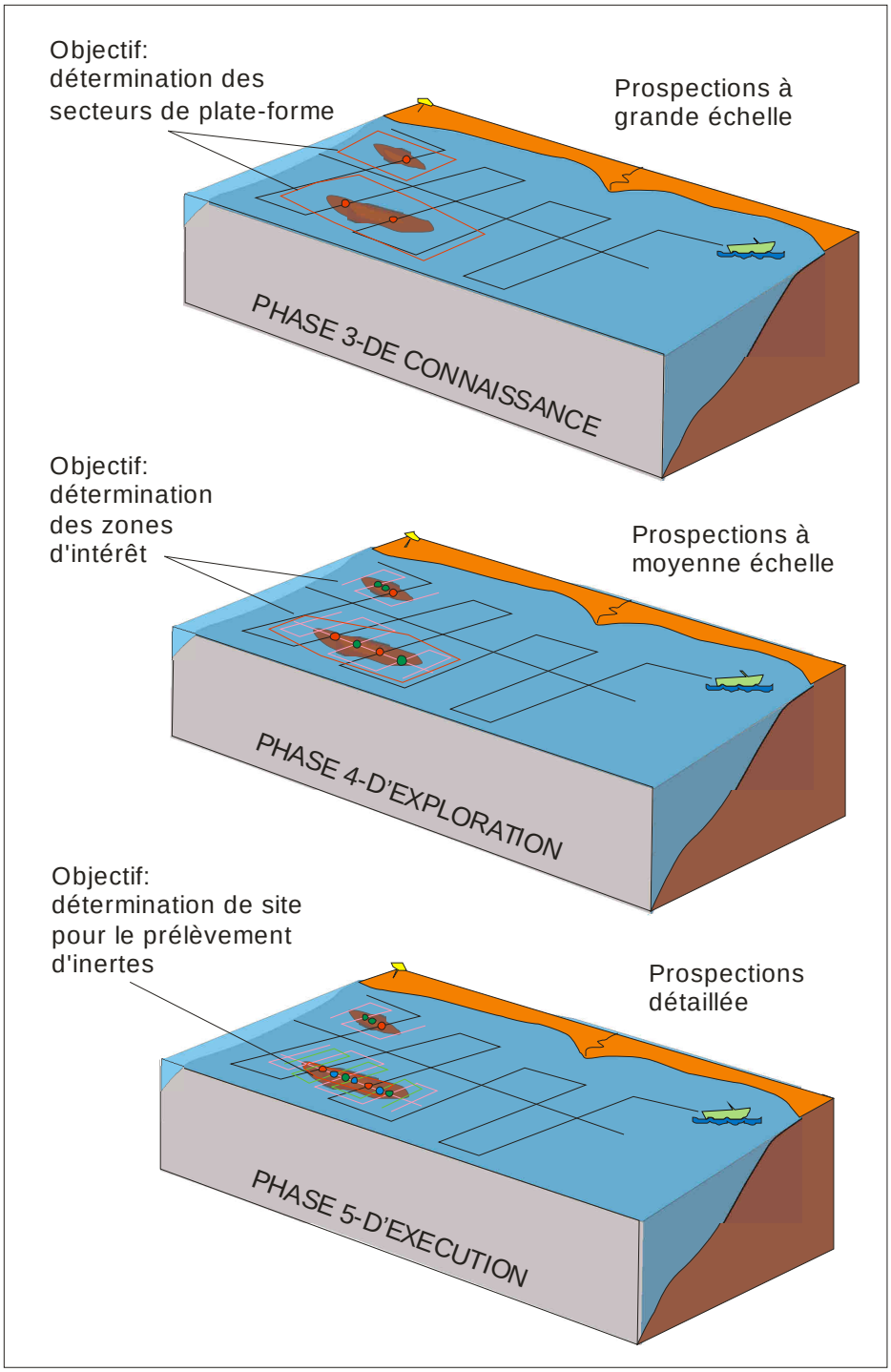

Fig. 21. Phases de prospection de la recherche des gisements sableux a la mer.

Phase 1-de planification

Il s'agit de la phase initiale et elle a comme objectif la planification préliminaire de la recherche et la rédaction d'un calendrier préliminaire des activités (Fig. 22). Telle planification doit tenir en considération l'aire d'étude (étendue, logistique, etc.), les temps de déroulement de la recherche, les activités à dérouler en mer (acquisition donnée) et à terre (élaboration, analyse et interprétation des donnés). Pour chacune des activités on doit déterminer appareils et individus, en organisant des spécifiques unités de recherche toutes dotées des nécessaires compétences. La planification définie dans cette phase est préliminaire, mais elle

constitue un important point de départ pour régler le déroulement des phases suivantes. La planification définitive est réalisée à la fin de la suivante phase recognitive, après avoir réalisé la synthèse des connaissances géologiques relatives à la plate-forme. Il faut ~15-20 jours pour le déroulement de cette phase.

Phase 1-de planification		
objectifs: planification de la recherche		**outputs: calendrier préliminaire**
Activités en mer	**-**	**-**
Activités en lab.	**Planification préliminaire de campagne en mer et identification de personnel pour la recherche**	
Collaboration avec	**Administrateurs locaux**	

Fig. 22 Phase 1-de planification.

Phase 2-de recognition

Dans cette phase on prévoit l'acquisition des connaissances générales par rapport à la plate-forme continentale, nécessaires pour le projet des recherches géophysiques et sédimentologiques à réaliser dans la successive phase de connaissance. À conclusion de cette phase on prévoit la définition du calendrier définitif des activités nécessaires pour l'achèvement de la recherche et la rédaction d'un rapport contenant la synthèse des connaissances (Fig. 23).
Les activités de cette phase prévoient essentiellement le déroulement d'une recherche bibliographique avec la récolte de toutes les données disponibles (données bathymétriques, données géophysiques, données sédimentologiques, etc.) pour la définition de l'assiette morpho-stratigraphique et pour le projet de la recherche.

Phase 2-de recognition		
objectifs: caractérization geologique		**outputs: calendrier définitif & rapport technique**
Activités en mer	**-**	**-**
Activités en lab.	**Inventaire et réinterprétation des donnees existantes, recueil de cartes, analyses de la bibliographie. Intégration des données en GIS-CAD logiciels**	
Collaboration avec	**Administrateurs locaux**	

Fig. 23. Phase 2-de recognition.

Il est très importante la réinterprétation, en clé minière, de données originelles (ex. profils sismiques et/ou carottages) éventuellement disponibles près des agences de recherche ou des administrations publiques.
Dans le but de faciliter la synthèse des données et d'optimiser le projet il faut organiser toutes les informations utiles à travers GIS; par conséquence, dans l'analyse et l'informatisation des données, il faut adresser une attention particulière aux éléments liés à la géoréférenciation des données, par exemple les systèmes de placement et les Système de référence utilisés.
L'objectif de cette phase est la caractérisation géologique-stratigraphique de la plate-forme continentale; en particulier:

- définition de la démarche morphologique générale et détermination de formes particulières d'intérêt minier (ex. paléo-cordons);
- définition de l'assiette stratigraphique générale et première évaluation des potentialités des différents secteurs de la plate-forme;
- définition des caractéristiques sédimentologiques générales des dépôts récents.

L'analyse de données est finalisée aussi à la détermination d'éventuelles zones à écarter dans les phases successives (ex. zones avec élevés épaisseur de la couverture pelitique ou situées à profondeurs supérieures à 100-120 m) et même la proximité à sites de intérêt environnemental particulier.
La réinterprétation des données existantes à partir déjà de cette phase est une activité très importante, car en situations particulièrement favorables (ex. bonne couverture et bonne qualité des données), où il est possible d'arriver à une précise définition de l'assiette morpho-stratigraphique et des potentialités minières, elle consente d'omettre la phase de connaissance ou de la réaliser seulement partiellement.
La durée de cette phase est fonction de la quantité de données existantes, de la quantité-qualité de données à re-interpréter en clé minière et elle peut varier de ~2 jusqu'à 6 mois.

Phase 3-de connaissance

L'objectif de cette phase est la définition de l'assiette morpho-stratigraphique générale de la plate-forme continentale finalisée à l'évaluation des potentialités minières, avec la détermination des secteurs de plate-forme où concentrer les recherches successives (Figs. 21 et 24). Dans cette phase on prévoit soit l'exécution de campagnes de relèvements finalisées à l'acquisition des données géophysiques et sédimentologiques, soit la réinterprétation des données acquises.
.

Phase 3-de connaissance		
objectifs: individuation des secteurs de plate-forme		**outputs: rapport technique**
Activités en mer	**Premiere campagne de géophysique à grande échelle (2-4 km)**	**Premiere campagne de vibro-carottages de calibrage**
Activités en lab.	**Analyses des données géophysique et integration avec profils existant; planification et analyses des échantillonnages; integration des donnes et individuation des secteurs de plate-forme**	
Collaboration avec	**Administrateurs locaux**	

Fig. 24. Phase 3-de connaissance.

Pour optimiser l'interprétation des données, les recherches seront divisées en deux campagnes. Dans ce cas, la première campagne sera essentiellement géophysique et elle permettra de définir l'assiette sismostratigraphique de la zone. Dans cette campagne on prévoit l'acquisition de profils sismiques à haute et très haute résolution (ex. en utilisant en même temps des sources de tipe Sparker et Chirp) en exécutant un relèvement à maille large (interdistance entre les profils de 2-4 km) étendu à toute la plate-forme continentale, y compris le bord.
Le choix de couvrir toute la plate-forme continentale vient de l'exigence de parvenir à une première évaluation du potentiel minier des dépôts présents. Cette exigence ne peut pas faire à moins de la compréhension de l'assiette sismostratigraphique général et des procès sédimentaires qui ont déterminé l'origine des corps mêmes.
Si possible, pendant l'acquisition des profils sismiques on acquerra données multifaisceaux aussi. L'acquisition des données multifaisceaux dans cette phase n'est pas indispensable parce que, puisque la distance entre les ligne est élevée (certains km), il est difficile d'interpoler les données; toutefois l'emploi du sondeur multifaisceaux déjà dans cette phase peut être utile, soit pour la possibilité d'avoir des données préalables, soit pour éviter de rebattre les mêmes lignes seulement avec le sondeur multifaisceaux.
Une partie de cette première campagne de relèvements peut être dédiée à l'exécution d'échantillonnages (avec bennes et carottages à gravité) projetés à partir des résultats de la phase de recognition et de l'interprétation préliminaire des données réalisée à bord. De cette manière on obtiendra des informations préliminaires sur les caractéristiques sédimentologiques des dépôts utiles au projet de la campagne successive.
La seconde campagne sera dédiée à la réalisation de vibro-carottages, nécessaires pour la calibration des facies sismiques individuées. Le projet des points d'échantillonnage représente une phase très délicate, dans laquelle on devra tenir en compte la variabilité des facies sismiques et la présence de conditions stratigraphiques favorables pour l'échantillonnage.

À la fin de la phase de connaissance on pourra déterminer un certain nombre de secteurs de plate-forme sur lesquels effectuer des recherches de majeur détail.
La durée de cette phase est fonction de la quantité de données acquises et elle peut varier de ~10 jusqu'à 12 mois.

Phase 4-d'exploration

Cette phase, avec des études limitées seulement aux secteurs qui présentent des caractéristiques intéressantes pour l'exploitation, prévoit la définition d'une ou plus zone d'intérêt, c'est-à-dire des zones à l'intérieur desquelles on devra déterminer les sites pour le prélèvement des sables (Figs. 21 et 25). Même dans ce cas on prévoit la réalisation de relèvements géophysiques, d'échantillonnages, et la successive interprétation des données.

Phase 4-d'exploration		
objectifs: individuation de la zone d'intérêt		**outputs: rapport technique**
Activités en mer	**Seconde campagne de géophysique (0.3-0,5 km)**	**Seconde campagne de vibrocarottages (densité: 1-2/km^2)**
Activités en lab.	**Analyses des données géophysique; planification et analyses des échantillonnages; integration des donnes et individuation de la zone d'intéret**	
Collaboration avec	**Administrateurs locaux**	

Fig. 25. Phase 4-d'exploration.

Les relèvements pourront être effectués dans deux campagnes, en procédant d'abord avec les recherches géophysiques et, après, avec les échantillonnages. Les recherches géophysiques prévoient l'exécution de relèvements sismiques et bathymétrie multifaisceaux. Les relèvements sismiques seront conduits avec des sources à différente couverture et résolution (possiblement les mêmes utilisées dans la phase précédente) en suivant une maille plus étroite, avec des profils distanciés de 0.3 à 0.5 km, en couvrant toute la plate-forme dans les seuls secteurs individués pendant la phase de connaissance. Dans cette phase, l'objectif est la définition de détail des géométries des corps, de leur variabilité latérale, de l'épaisseur de la couverture pelitique, de l'épaisseur des dépôts sableux, etc. Pour ce qui concerne les échantillonnages, on procédera à l'exécution de vibro-carottages de calibrage avec densité 1-2/km^2. Le prélèvement des carottes est finalisé à une détaillée corrélation entre le facies sismique et les caractéristiques sédimentologiques.
D'après l'interprétation de toutes les données acquises on devra déterminer une ou plus zones d'intérêt en spécifiant leur caractéristiques stratigraphiques et en évaluant la cubature disponible.
À la fin de cette phase, les résultats obtenus devront être évalués avec le commettant pour une définition des priorités à exécuter successivement, en fonction des caractéristiques stratigraphiques et des volumes repérés.
On prévoit aussi l'interaction avec les agences préposées à l'évaluation d'environnement pour la détermination d'éventuelles obligations environnementales et une redéfinition des zones.
La durée de cette phase est fonction de la quantité des données acquises et elle peut varier de ~10 jusqu'à 12 mois.

Phase 5-d'exécution

Cette phase est finalisée à la caractérisation des sites de prélèvement des sables d'une façon qu'on puisse définir: les caractéristiques granulométriques du sédiment à draguer, les exactes volumes du sédiment à draguer, l'éventuelle quantité de pélites à déplacer et la présence d'éventuels obstacles présents (ex. câbles, débris, etc.); toutes ces informations feront partie des techniques spécifiques à fournir à la maison de travaux qui exécute le dragage. On réalisera donc deux campagnes des relèvements, en procédant d'abord avec les recherches géophysiques et, après, avec les échantillonnages (Figs. 21 et 26).

Phase 5-d'execution		
objectifs: individuation du site pour le prélèvement d'inertes outputs: rapport technique		
Activités en mer	Troisième campagne de géophysique détaillée (0.3-0.1 km & MB avec couverture tot.)	Troisième campagne de échantillonnages détaillée, vibrocarottages, densité: 4-6/km^2)
Activités en lab.	Analyses des données géophysique; planification et analyses des échantillonnages; estimation des volumes des sables, caractéristiques sedimentologiques, etc.	
Collaboration avec	Administrateurs locaux et Département Environnement	

Fig. 26. Phase 5-d'exécution.

Les campagnes de relèvements seront limitées aux seules zones d'intérêt où on utilisera les mêmes méthodologies examinées auparavant, mais avec une densité du relèvement plus forte. Les profils sismiques seront acquis sur une maille très étroite (distance de 0.3 à 0.1 km).
On associera aux profils sismiques des relèvements multifaisceaux (avec une superposition entre les glissades égale au 20% de la couverture latérale). Dans le cas de sable affleurant sur le fond il est utile la réalisation d'un relèvement sonar latéral (avec couverture latérale maximum de 150 m pour canal et superposition entre les glissades égale au 25% de la couverture latérale); tous les deux types de relèvements devront être effectués à couverture totale des différentes zones.
Pour ce qui concerne les échantillonnages, on réalisera des vibro-carottages avec densité 4-6/km^2, pour définir, avec un détail extrême, la stratigraphie des dépôts, leur variabilité latérale et l'éventuelle présence de niveaux avec épaisseurs inférieurs à la résolution sismique.
La densité de échantillonnage est variable en dépendance du contexte stratigraphique, avec une augmentation en situations particulièrement complexes.
Dans le but de corréler les données stratigraphiques on devra réaliser des diagrammes de corrélation.
Après avoir défini les intervalles utiles, on pourra réaliser une comparaison avec le sédiment de la plage à reconstruire.
À la fin de cette phase, on définira les sites pour le prélèvement d'inertes en indiquant:
• leur périmètre total;
• l'épaisseur et le volume du sédiment utile à extraire;
• les caractéristiques granulométriques du sédiment utile à extraire;
• l'épaisseur et le volume du sédiment stérile à enlever (ex. pélites);
• l'éventuelle présence d'obstacle pour les opérations de dragage.

La durée de cette phase est fonction de la quantité de données acquis et elle peut varier de ~10 jusqu'à 12 mois.

Notices a l'égard des activités corrélée

Étude environnementale

L'étude environnementale comprend plusieurs activités conclues à l'évaluation de la compatibilité environnementale des opérations de dragage. Une partie des activités comprennent des relèvements géophysiques de détail analogues à ceux conduits pour la recherche des sables (sonar latéral et sondeur multifaisceaux). À ceux-ci on ajoute des relèvements ROV et/ou des inspections visuelles sur les objectifs (ex. sèches, *Posidonia oceanica*, etc.).

Opérations avant le dragage

Dans cette phase on conduit des prospections conclues à l'identification d'éventuelles infrastructures (câbles, tubes sous-marins), épaves ou engins présents dans le site de prélèvement pour inertes qui peuvent limiter ou rendre dangereuses les opérations de dragage. En genre on exécute des relèvements

géophysiques avec les mêmes instrumentations vues auparavant (sondeur multifaisceaux, sonar latéral et sismique à très haute résolution). En outre on réalisé un relèvement magnétométrique conclu à l'identification d'éventuelles anomalies magnétiques produites par infrastructures métalliques. Les relèvements sont beaucoup détaillés avec interdistance de 25-30 m.

Opérations âpres le dragage

Cette phase est finalisée à la caractérisation des sites de prélèvement des sables après les opérations de dragage, de façon à pouvoir:
• vérifier le respect du polygone assigné à la maison exécutrice du dragage;
• calculer les exacts volumes de l'inerte dragué;
• calculer les exacts volumes de l'éventuelle pelite enlevée;
• évaluer les ressources encore disponibles.

Dans ce but on réalisera donc une campagne de relèvements, centrée sur la zone d'excavation, où on utilisera les mêmes méthodologies (sauf les échantillonnages) utilisées dans la phase d'exécution. On réalisera donc: une maille de profils sismiques et un relèvement multifaisceaux et sonar latéral en utilisant le même équipement et avec des routes de navigation coïncidentes avec celles du relèvement fait dans la phase d'exécution. Pour le relèvement avec sonar latéral on utilisera la couverture latérale et la superposition entre glissades identiques à celles utilisées antérieurement. Enfin, il est important d'utiliser la même embarcation et le même équipement et, possiblement, les mêmes opérateurs, de manière à obtenir un relèvement comparable.

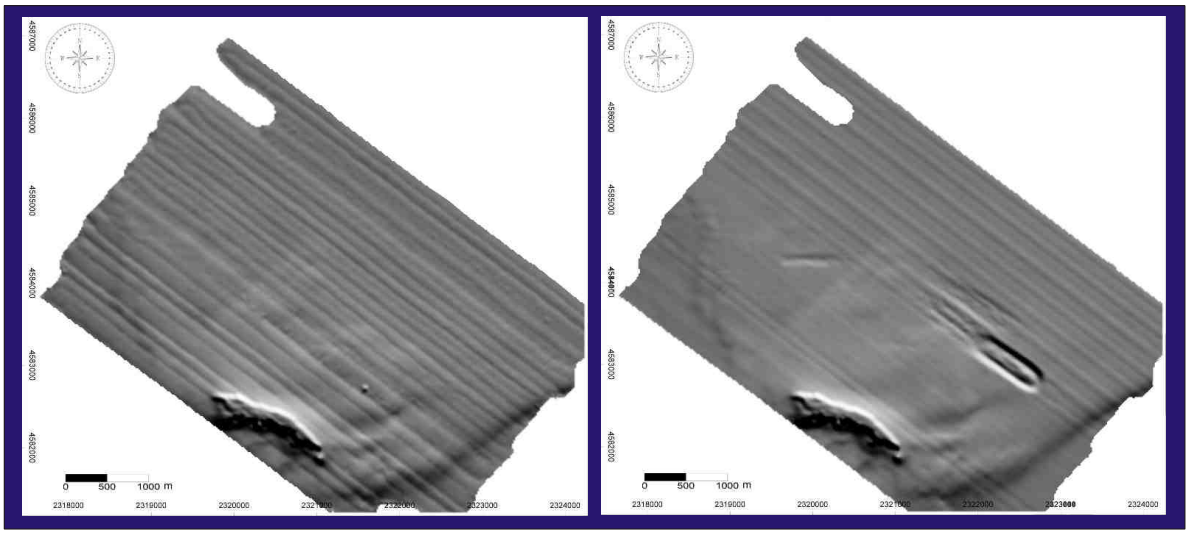

Fig. *26. Shaded relief de données bathymétriques multifaisceaux avant et après le dragage.*

4 BIBLIOGRAPHIE

BELLOTTI P., CHIOCCI F.L., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P. (1994) - Sequence Stratigraphy and depositional setting of the Tiber Delta: integration of high-resolution seismics, well-log and archaeological data. Journ. of Sedimentary Research, B64, 3: 416-432.

BROWN L.F., & FISHER W.L. (1977) - Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazil rift pull-apart basins, in C. E. Payton, ed., Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. AAPG Mem.26, 213-248.

CATTANEO A. & STEEL R. J. (2003) - Transgressive deposits: a review of their variability. Earth-Science Reviews, 62: 187–228.

CHIOCCI F.L., ORLANDO L. (1996) - Lowstand terraces on tyrrhenian sea steep continental slopes. Marine Geology: 134, 127-143.

CHIOCCI F.L. & LA MONICA G.B. (2000) – The use of relict sand lying on the continental shelf for unprotected beach nourishment. Soft Shore Protection, Eds. Goudas C.L., Katsiaris G.A., May V., Koutitas C. Proc. of the 1st International Conference, Patras, Greece, oct. 2000.

COWELL P.J., ROY P.S. & JONES R.A. (1995) - Simulation of large-scale coastal change using a morphological behavior model. Marine Geology: 126, 45-61.

FABBRI A., ARGNANI A., BORTOLUZZI G., CORREGGIARI A., GAMBERI F., LIGI M., MARANI M., PENITENTI D., ROVERI M., TRINCARDI F. a cura di D'ANGELO S., VENTURA G. (2002) - Carta Geologica dei Mari Italiani alla scala 1:250.000 –Guida al rilevamento. Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali Servizio Geologico, Quaderni Serie III, vol. 8: 13-24.

FINKL C. W. AND KHALIL S. M. (2005) - Offshore Exploration for Sand Sources: General Guidelines and Procedural Strategies along Deltaic Coasts. Journal of Coastal Research, 44, 203-233.

FINKL C. W., ANDREWS J. L., CAMPBELL T. J., BENEDET L. AND WATERS J. P. (2004) - Coupling Geological Concepts with Historical Data Sets in a MIS Framework to Prospect for Beach-Compatible Sands on the Inner Continental Shelf: Experience on the Eastern Texas Gulf Coast. Journal of Coastal Research: Vol. 20, No. 2, pp. 533–549.

HELLAND-HANSEN W., GJELBERG J.G. (1994) - Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective. Sedimentary Geology, 92: 31– 52.

HERNANDEZ-MOLINA F.J., SOMOZA L., REY J. & POMAR L. (1994) - Late Pleistocene-Holocene sediments on the Spanish continental shelves: model for very high resolution sequence stratigraphy. Marine Geology, 120: 129-174.

MITCHUM R.M. JR., VAIL P.R. & THOMPSON S. III (1977) - Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: the depositional sequence as a basis unit for stratigraphic analysis. In C.E. Payton (ed.), Seismic Stratigraphy- applications to hydrocarbon exploration. A.A.P.G. Memoir 26, 53-62.

NUMMEDAL D., SWIFT D.J.P. (1987) - Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous example. In: Nummedal, D., Pilkey, O.H., Howard, S.D. (Eds.), Sea level Fluctuation and Coastal Evolution. SEPM Special Publication, vol. 41: 241–260.

PLINT A.G. (1988) - Sharp-based shoreface parasequences and "offshore bars" in the Cardium formation of Alberta; their relationship to relative changes in sea-level. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), Sea-level Changes — An Integrated Approach. SEPM, Spec. Publ., vol. 42: 357–370.

POSAMENTIER H.W., ALLEN G.P. (1993) - Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. Sedimentary Geology 86: 91–109.

POSAMENTIER H.W., JAMES D.P., ALLEN G.P., TESSON M. (1992) - Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance. AAPG Bull. 76: 1687–1709.

POSAMENTIER H.W., VAIL, P.R. (1988) - *Eustatic controls on clastic deposition: II. Sequences and systems tract model.* In: *Sea-Level Changes— An Integrated Approach.* WILGUS C.K., HASTINGS, B.S.,

KENDALL, C.G.ST.C., POSAMENTIER, H.W., ROSS, C.A., VAN WAGONER, J.C. (EDS.), SEPM Special Publication, 42: 125-154.

RIDENTE D. & TRINCARDI F. (2005) – Pleistocene “muddy” forced-regression deposits on the Adriatic shelf: a comparison with prodelta deposits of the late Holocene highstand mud wedge. Marine Geology, 222-223: 213-233.

SWIFT D.J.P. (1968) - Coastal erosion and transgressive stratigraphy. Journal of Geology 76, 444– 456.

TESSON M., GENSOUS B., ALLEN G.P. & RAVENNE C.H. (1990) - Late Quaternary deltaic lowstand wedges on the Rhone continental shelf, France Marine Geology, 91: 325-332.

TORTORA P., BELLOTTI P. & VALERI P. (2001) – Late-Pleistocene and Holocene deposition along the coasts and continental shelves of the Italian peninsula. In: Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins. G.B. Vai and I.P. Martini (eds.), Kluwer Academic Publishers, Great Britain, 455-478.

TORTORA P., COWELL P. J. (2005) - Principi geometrici nei sistemi costieri trasgressivi. parte 2ª: la preservazione di litosomi litorali su piattaforme continentali a debole pendenza. Geologica Romana 38 (2005), 77-96.

TRINCARDI F. & FIELD M. E. (1991) – Geometry, lateral variation and preservation of downlapping regressive shelf deposits: Eastern Tyrrhenian Sea margin, Italy. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 61, N°5, 775-790.

VAIL P.R., MITCHUM J.R., TODD G.R., WIDMIER J.M., THOMPSON S. & SANGREE J.B. (1977) - Seismic stratigraphy and global changes of sea level. AAPG Mem. 26, pp.49-205.