HAL
open science

1975-1995, vingt ans de recherches sur les marges continentales “ transformantes ”

Jean Mascle

To cite this version:

Jean Mascle. 1975-1995, vingt ans de recherches sur les marges continentales “ transformantes ”. Travaux du Comité français d’Histoire de la Géologie, 2014, 3ème série (28, 2), pp.25-54. hal-04019442

HAL Id: hal-04019442

https://hal.science/hal-04019442v1

Submitted on 8 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TRAVAUX DU COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE

DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGÉO)

TROISIÈME SÉRIE, t. XXVIII, 2014, n° 2
(séance du 19 mars 2014)

Jean MASCLE

1975-1995, vingt ans de recherches sur les marges continentales « transformantes »

Résumé. Les marges continentales dites transformantes résultent des effets d'un grand mouvement de coulissage lithosphérique, d'abord intracontinental, puis mettant successivement en contact actif des lithosphères continentales amincies et enfin océaniques ; finalement ce mouvement donne naissance à d'importantes zones de fracture océaniques, alors que le segment de marge créé devient, quant à lui, passif après avoir été pendant un grande partie de son évolution tectoniquement et sismiquement actif. Cet article relate les différentes phases de la genèse, en France, au cours des années 1970, du concept de « *marge transformante* » ; il présente aussi la séquence des campagnes à la mer qui, pendant une douzaine d'années (entre 1983 et 1995), se sont succédé afin d'analyser la marge continentale au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana, considérée comme un segment typique de marge transformante et d'en proposer un modèle d'évolution. Curieusement pendant presque vingt ans pratiquement aucun programme spécifique n'a été consacré à ces objets jusqu'à un regain d'intérêt récent lié à des découvertes industrielles prometteuses.

Mots-clés : Marge continentale transformante – Atlantique équatorial – Campagnes à la mer – XXe siècle.

Abstract. Transform, or sheared, continental margins are generated at first as consequences of large-scale intra-continental strike-slip displacements, then as the results of successive shear motions between progressively thinning continental crusts and, finally, active motions along oceanic lithosphere. They, later on, give birth to oceanic fracture zones before to become seismically inactive and thus passive continental margin segments. In this paper we review how the concept of transform margin has progressively merged, mainly in France, during the seventies. We then show how a full program of sea-going researches, devoted to the progressive in situ analysis of one of the major transform margin, the Côte d'Ivoire/Ghana margin, has been built and managed during twelve years, between 1983 and 1995. Since that time, no specific systematic complementary studies were conducted on transform margins; only recent promising oil industry

discoveries in such specific setting have reactivated new scientific interests on the study of transform margin structures and of their evolution.

Key words: Transform continental margin – equatorial Atlantic – scientific cruises – 20th century.

Introduction

Dans le cadre d'un article récent, *Des Marges Continentales atlantiques aux Chaînes plissées* (Boillot, 2012), Gilbert Boillot a fourni une synthèse des recherches françaises conduites en mer entre les années 1967 et 2000 sur les marges continentales dites « *atlantiques* ». Dans cet article l'auteur passe également en revue les divers modèles conceptuels de l'époque, ainsi que les principales hypothèses sur les divers mécanismes responsables de l'amincissement crustal et de son moteur, l'extension lithosphérique. Il est enfin montré dans ce travail que l'ensemble des processus d'amincissement aboutissent non seulement à créer des marges continentales « *passives* » et, au final, un nouvel espace océanique, mais qu'ils peuvent parfois également faciliter la mise à l'affleurement, en pied de marge, juste avant la rupture continentale, d'éléments du manteau supérieur.

De tels segments de marges, qu'il conviendrait de dénommer « *passives* » plutôt qu'« *atlantiques* », car ils caractérisent la périphérie de nombreux espaces océaniques autres que le seul océan Atlantique, correspondent effectivement à la majeure partie des marges nées d'un rifting initial affectant une croûte continentale en voie d'amincissement. La disponibilité d'images géophysiques des grandes structures géologiques, telles les « *blocs basculés* » ou des « *demi-grabens* », issues de la création et de l'évolution postérieure des marges passives, fut indéniablement une avancée décisive pour l'ensemble des recherches sur ces objets ; rapidement la transposition et l'application de ces concepts et images géophysiques à l'analyse et à la compréhension des chaînes de montagnes, comme par exemple les Alpes occidentales, ont très vite constitué une véritable révolution pour les géologues travaillant sur ces domaines (Lemoine *et al.*, 1981).

Mais ces marges continentales passives, concept qui ne put véritablement prendre son ampleur que grâce à la théorie de la tectonique des plaques (au cours des années 1966-1968), et que seuls les progrès de la géophysique et de la géologie marine (sismique réflexion et forages scientifiques se développant à la même époque), ont permis d'élucider, résultent de processus d'amincissements crustaux sensiblement orthogonaux à la bordure des rifts, et ce, quels qu'en soient les mécanismes. Un rapide examen d'une carte de l'océan Atlantique, par exemple, et de ses bordures, suffit à démontrer que si, effectivement, la majeure partie des marges dites passives paraît bien procéder d'une telle géométrie d'ouverture, un pourcentage significatif de ces objets ne répond cependant pas à cette règle. Autrement dit, toutes les marges passives ne sont pas nécessairement issues d'un tel dispositif géométrique initial. On estime la proportion de ces segments singuliers à environ 30 % de la totalité des marges dites passives ; ce pourcentage est significatif et ce d'autant plus, comme on le verra par la suite, que ces marges passives « *atypiques* » se caractérisent par des structures géologiques et

crustales ainsi que par une évolution souvent très différentes de celles des marges passives classiques.

1. Au début des années 1970 : les prémices du concept de « *marge transformante* »

C'est au début des années 1970 que plusieurs chercheurs travaillant indépendamment (comme c'était souvent le cas alors pour de telles recherches exploratoires fondées sur des approches régionales) sur différents segments de marges continentales à la périphérie de l'Atlantique, se posèrent, presque simultanément, des questions comme *« Pourquoi observe-t-on dans ces régions une structure et une morphologie apparemment très différentes du cas standard des marges « passives»* ? *Pourquoi leur transition avec le domaine océanique voisin est-elle aussi rapide et souvent marquée par une « ride » morphologique importante? Pourquoi se trouvent-elles dans le prolongement direct de grandes zones de fractures océaniques ?* De telles observations étaient valables, non seulement pour la marge au sud de l'Afrique du Sud, que Roger Scrutton et ses collaborateurs commençaient alors à étudier systématiquement (Scrutton, 1979), mais également pour une partie des bordures continentales au large du Spitzberg, en Atlantique Nord, dont Olaf Eldhom abordait l'analyse, ou encore pour la plus grande partie des marges africaines de l'Atlantique équatorial (du Sierra Leone au Ghana) dont j'entreprenais, à la même époque (1970-1972), l'analyse détaillée dans le but de préparer ma thèse d'État (soutenue courant 1975 ; Mascle, 1976).

Dans la suite, cet article va, pour l'essentiel, se fonder sur l'exemple régional de la marge continentale au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana. Ce fut en effet le seul segment de marge transformante qui a été, au cours des années 1980 et jusqu'au milieu des années 1990, l'objet d'un programme d'analyse systématique s'appuyant sur plusieurs campagnes à la mer successives. Ce programme, EquaMarge (pour marges équatoriales*),* bénéficia lors de cette période de la mise en œuvre de toute une panoplie d'outils géophysiques et géologiques de plus en plus sophistiqués. Cette démarche aboutit à faire de ce segment de marge un modèle d'abord régional, puis peu à peu conceptuel ; 25 ans après ces travaux, il s'agit toujours du seul domaine de marge de ce type pour lequel la communauté scientifique dispose de ce niveau de données afin de définir le modèle de marges dites « *transformantes* » (*transform* ou *sheared margins* pour les auteurs anglo-saxons).

2. Au cours des années 1975 : naissance du concept de « *marges transformantes* »,

C'est lors de l'été 1971, au cours d'une campagne de géophysique et de géologie marines de reconnaissance des marges africaines, la campagne Walda*,* organisée par le tout jeune CNEXO (ancêtre de l'IFREMER**)**, et à laquelle je participais à bord du navire *Jean Charcot*, que je fus frappé par les différences morpho-structurales importantes entre, d'une part les larges bordures continentales, fortement sédimentées, caractérisant par exemple

l'ensemble des régions au large du Gabon et du Congo (et répondant bien aux principaux critères retenus pour les marges passives) et, d'autre part, l'étroite bordure continentale au large du Ghana ou du Libéria, secteurs où l'on observait des transitions très rapides – quelques kilomètres tout au plus – entre des plates-formes continentales peu développées et un domaine océanique profond au sud, découpé par de grandes zones de fractures océaniques (Fig. 1). Qui plus est, au large de la Côte d'Ivoire, cette transition, soulignée par une pente continentale extrêmement raide, se prolongeait vers l'ouest, par une importante ride sédimentaire, installée à la limite océan-continent, et avec une forte expression morphologique.

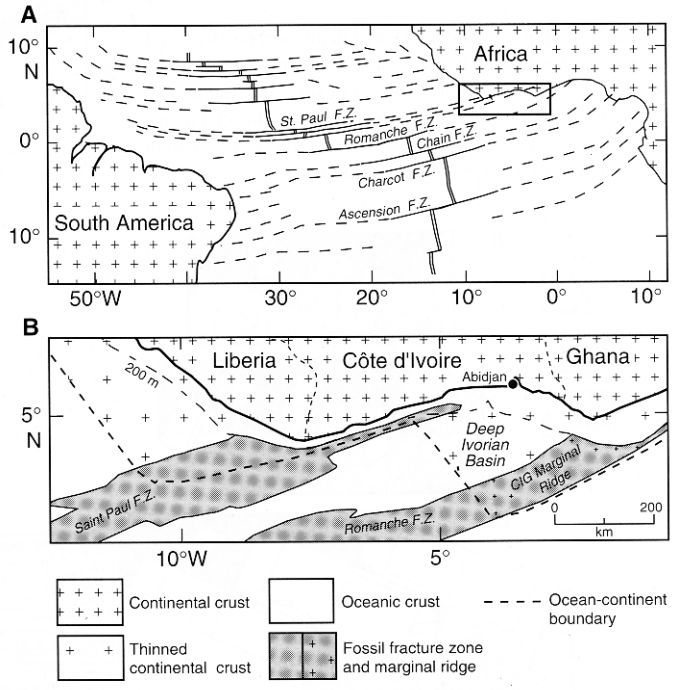

Fig. 1. L'Atlantique équatorial et le golfe de Guinée. La marge de Côte d'Ivoire-Ghana est indiquée par le rectangle ; on observe les grandes zones de fractures équatoriales (Saint-Paul, Romanche, Chain) qui décalent l'axe de la dorsale médio-océanique de plusieurs milliers de kilomètres, sensiblement au niveau de l'Équateur.

Cette structure marginale, ou *« zone de fracture marginale »* (« *marginal fracture ridge* » de Francheteau et Le Pichon, 1972), semblait elle-même se poursuivre latéralement, vers l'ouest, par un alignement de petites collines abyssales partiellement enfouies sous la couverture sédimentaire du golfe de Guinée. Dès cette époque, l'hypothèse selon laquelle ces éléments pouvaient être des jalons fossiles de la zone de fracture de la Romanche fut proposée (Delteil *et al.,* 1974). La zone de fracture de la Romanche (nom d'un navire français qui, à la fin du XIXe siècle, fit des sondages dans ce secteur, l'un des plus profonds de l'Atlantique) installée quasiment le long de l'Équateur, est actuellement l'une des plus importantes et des plus profondes à la surface du Globe ; elle décale de plus d'un millier de kilomètres deux tronçons de la dorsale médio-océanique (Honnorez *et al.*, 1991).

En séjour à la Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) depuis l'automne 1970, dans le cadre de ce que l'on nommerait aujourd'hui une bourse postdoctorale, j'eus la chance

de participer, en 1972, à une campagne du navire de la WHOI, l'*Atlantis,* dans le cadre d'un vaste projet de reconnaissance des marges de l'Afrique (International Decade of Oceanographic Exploration, ou IDOE*)*. Cette campagne de plusieurs mois, dirigée par Kenneth O. Emery (l'un des fondateurs de la géologie marine), me permit à nouveau d'observer les diverses particularités des marges continentales de l'Atlantique équatorial au large de l'Afrique, et notamment leur morphologie singulière.

À mon retour, courant 1972, dans le Cape Cod, puis ultérieurement au CNEXO à Brest (fin 1973), je décidais de consacrer le principal de mon travail de thèse d'État à l'analyse du domaine équatorial de l'Atlantique Sud, région dont la morpho-structure des bordures continentales ne répondait manifestement pas aux caractéristiques « *standard* » retenues pour les marges passives. Dès lors devenu entre temps chercheur au CNRS, je me consacrais presque exclusivement à l'interprétation des nombreuses données géophysiques et géologiques acquises lors de ces deux campagnes ; peu de temps avant de m'installer à Villefranche-sur-Mer, fin 1975, je soutenais ma thèse d'État intitulée *Géologie sous-marine du Golfe de Guinée*, dans laquelle je proposais le concept d'une marge de *« troisième type »*, issue ni d'une divergence lithosphérique (marge passive), ni d'une convergence lithosphérique (marge active) mais plutôt d'un déplacement intra-lithosphérique initial de type coulissant. Je définissais peu après, dans le cadre d'un mémoire publié en 1977 par la *Société géologique de France* (Mascle, 1977), ce troisième type de marge comme *« Marge continentale transformante »* ou « *de cisaillement* ». Le terme « *transformante* » permettait à mes yeux de bien différencier de tels segments de marges, issus non d'une divergence plus ou moins orthogonale à la bordure continentale, mais d'une cassure initiale impliquant un grand mouvement lithosphérique de type transcurrent. Ce mouvement, d'abord intracontinental, et qui donne finalement naissance aux grandes zones de fractures intra-océaniques, passe par divers stades intermédiaires impliquant des contacts coulissants, tectoniquement et sismiquement actifs, entre lithosphères continentales épaisses, puis en voie d'amincissement, enfin contre une lithosphère océanique néoformée.

3. Les années 1983-1995, ÉquaMarge : un programme de recherches consacré à l'analyse des marges transformantes de l'Atlantique équatorial

Arrivé à Villefranche fin 1975, je n'eus pas la possibilité de développer rapidement cette thématique, dont j'avais pressenti tout l'intérêt et pour l'analyse de laquelle la bordure africaine de l'Afrique équatoriale me paraissait le chantier régional idéal. À cette époque le petit groupe de chercheurs que je venais de rejoindre (6 ou 7 tout au plus) ne disposait en effet que de très peu de moyens. Il faisait surtout porter ses efforts sur la reconnaissance des marges et du bassin profond de la Méditerranée comme expliqué dans un article récent sur *La naissance et le développement de la géologie marine à Villefranche-sur-Mer des années 1950 au milieu des années 1980* (Gennesseaux et Mascle, 2012).

Afin de m'adapter au mieux à cette situation je décidais de bâtir un programme consacré aux marges de convergence, et donc sismiquement actives, de la Méditerranée

orientale, et, plus particulièrement, aux marges et aux fosses helléniques alors interprétées comme des fosses de subduction. Ces travaux concernant l'extraordinaire domaine géologique que représente la Méditerranée auront accompagné la presque totalité de ma vie de chercheur puisque devenu, près de quarante ans après leur début, un chercheur émérite, je les poursuis encore ! Tout en concevant, puis conduisant ou participant, entre 1976 et 2008, à une quinzaine de campagnes de géologie et de géophysique marines au large du Péloponnèse, de la Crète, de Rhodes, plus tard au large de Chypre, de la Libye et de l'Égypte, je réfléchissais toujours au cas des marges transformantes dont je désirais lancer l'analyse. Ce ne fut effectivement possible qu'à partir du début des années 1980, quand il fut enfin envisageable que les navires de la flotte océanographique du CNEXO puissent à nouveau voguer vers les eaux de l'Atlantique équatorial.

4. 1983, EquaMarge 1 : une première campagne de reconnaissance sur les marges transformantes de l'Atlantique équatorial au large de la Guinée, de la Côte d'Ivoire et du Ghana

Ce n'est qu'en 1983 que j'eus la possibilité de conduire, à bord du navire *Le Suroît*, une opération de reconnaissance, la campagne EquaMarge 1, première d'une série de six campagnes, au large de deux régions de l'Atlantique équatorial, dont tout laissait à penser que les bordures continentales résultaient de processus d'un rifting transformant. La première partie de la campagne EquaMarge 1, débutant à Dakar, concerna la bordure méridionale d'un vaste plateau profond s'étendant au large de la Guinée, le plateau marginal de Guinée (Fig. 2a, b).

L'hypothèse de départ était que la mise en place de ce plateau résultait de deux phases successives : (a) un grand mouvement de coulissement, au cours du Crétacé, contre ce qui, de nos jours, constitue, au large de la Guyane, la pente d'un autre plateau marginal, le plateau du Demerara ; (b) l'une et l'autre de ces régions ayant appartenu auparavant, au cours du Jurassique inférieur, à un même segment de la marge passive de l'Atlantique central. La seconde partie d'EquaMarge 1 nous conduisit au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana.

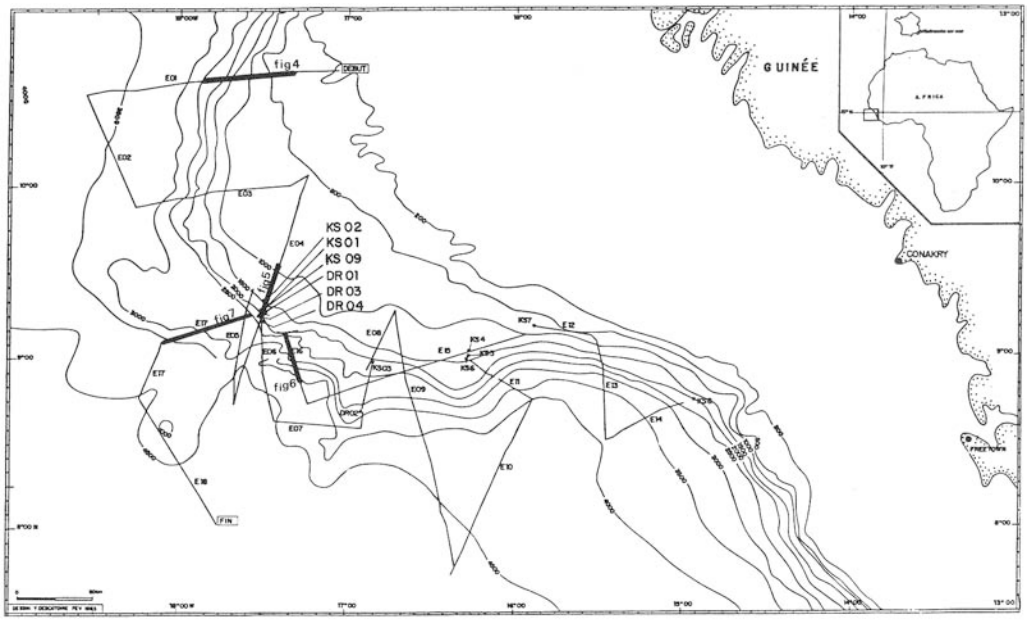

Fig. 2a. Routes suivies lors de la campagne EquaMarge 1 au large de la Guinée (Mascle *et al.,* 1988) et localisation des principaux prélèvements effectués.

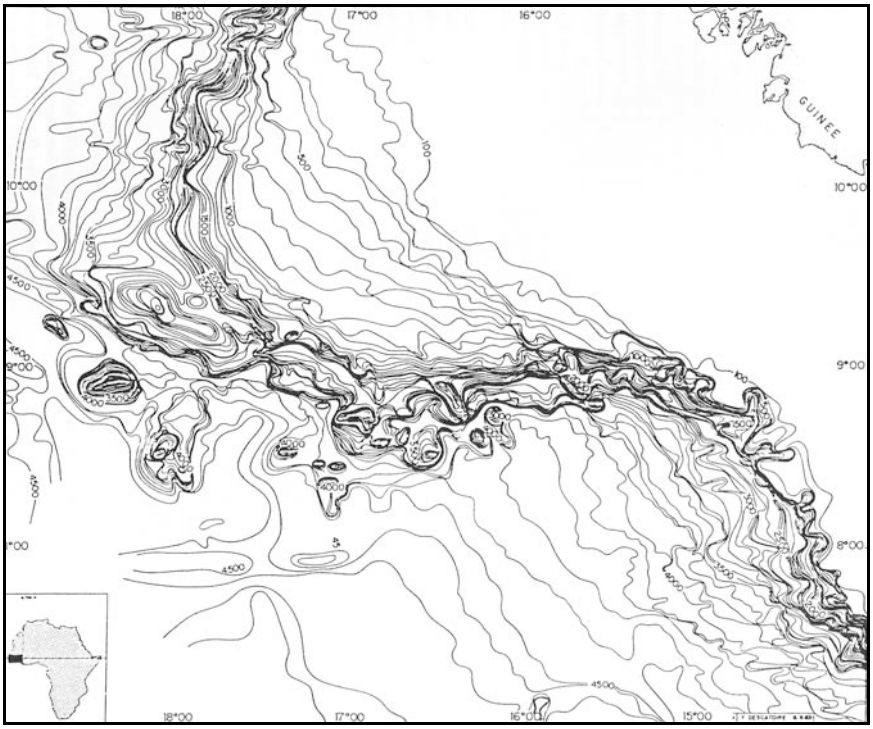

Fig. 2b. Morphologie générale du plateau de Guinée (issue de la campagne EquaMarge 1) et illustrant la présence de nombreux reliefs sous-marins (volcans) accidentant la pente méridionale (Mascle *et al.,* 1988).

Dans l'un et l'autre de ces secteurs, relevés bathymétriques, profils de sismique réflexion, carottages et dragages permirent de collecter une impressionnante quantité de données qui, additionnées à des résultats antérieurs, permirent la réalisation de deux thèses (Marinho, 1985 ; Blarez, 1986). Les nombreux prélèvements effectués par dragage et carottage révélèrent de belles surprises : par exemple la présence, directement à

l'affleurement au long de la bordure méridionale du plateau (du fait des conditions hydrodynamiques locales), de dépôts de marnes noires témoins directs des évènements anoxiques du Cénomanien (Moullade *et al*., 1993). La pente méridionale du plateau, de morphologie complexe, semblait, quant à elle, avoir été le siège d'une activité magmatique soulignée par plusieurs gros édifices magnétiques, donc probablement volcaniques. Au large du Ghana et de la Côte d'Ivoire, au contraire, la pente continentale, très raide et quasi rectiligne, en prolongement direct de la zone de fracture de la Romanche, semblait résulter d'un découpage à l'emporte-pièce du craton panafricain et de sa couverture paléozoïque, ce que démontrèrent effectivement plusieurs dragages, dont certains fournirent également des sédiments terrigènes datés du Crétacé inférieur (Blarez *et al.,* 1987) (Fig. 3).

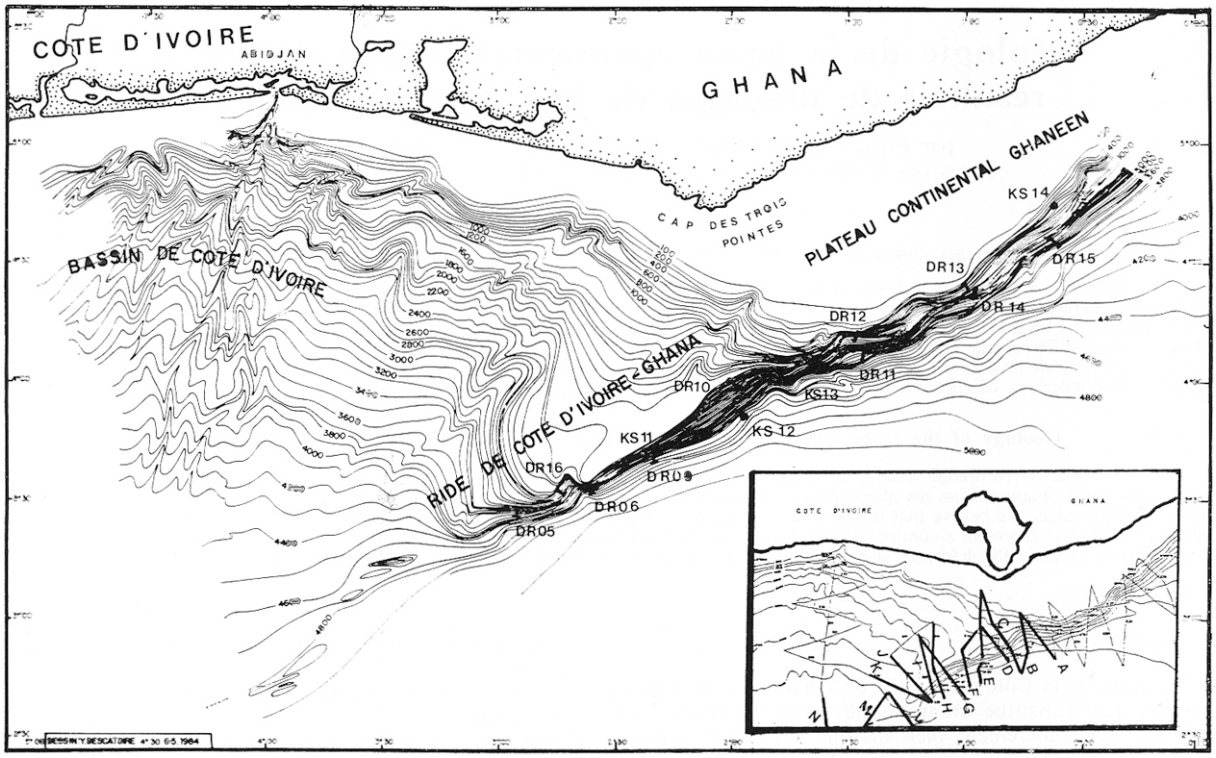

Fig. 3. Morphologie de la marge de Côte d'Ivoire et du Ghana et localisation des dragages. (En encadré les routes suivies lors de la campagne EquaMarge 1) (Blarez *et al.,* 1987).

Nous avions donc affaire à deux exemples de deux types de marges transformantes, l'une, la marge guinéenne, clairement polyphasée, d'abord créée comme un segment de marge passive au cours du Jurassique, puis reprise en cisaillement lors de l'ouverture, postérieure, de l'Atlantique équatorial ; l'autre, la marge ivoiro-ghanéenne, globalement plus simple, issue d'abord d'un long mouvement de coulissage entre cratons africain et brésilien, puis de la poursuite de ce mouvement entre des ensembles crustaux continentaux en voie d'amincissement et de déformation, enfin contre une lithosphère océanique néoformée.

Ces résultats permirent de proposer un premier modèle d'évolution (Mascle et Blarez, 1987) tentant d'expliquer les grands traits d'une marge transformante par la succession dans le temps de divers contacts coulissants actifs, d'abord entre lithosphères continentales non amincies, puis en voie d'amincissement, enfin contre une lithosphère océanique néoformée.

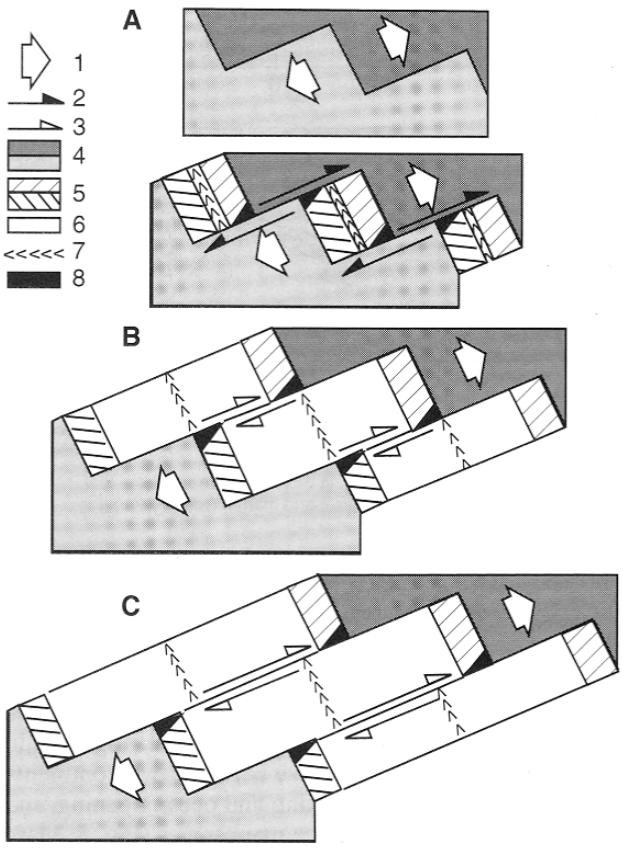

Fig. 4. Modèle d'évolution d'une marge transformante (Mascle et Blarez, 1987). 1 : direction d'extension ; 2 et 3 : décrochement, d'abord intracontinental, puis intraocéanique ; 4 : en gris clair plaque Amérique ; en gris foncé plaque Afrique ; 5 : croûte continentale en voie d'amincissement (marge continentale) ; 6 : croûte océanique ; 7 : dorsale océanique ; 8 : marge transformante.

Après un état initial durant lequel le rifting affecte une croûte continentale épaisse, le modèle se fonde sur la succession de trois stades *:* (1) un amincissement progressif de la lithosphère continentale qui aboutit à la création de bassins divergents distincts (de type « *pull-apart* »), tectoniquement reliés par des zones assimilables à des failles transformantes intracontinentales (Fig. 4A) ; pour l'essentiel Les domaines transformants mettent alors en contact des fragments de croûte continentale d'épaisseur, et donc d'élévation, sensiblement comparables, sauf le long de la bordure des bassins divergents où les zones transformantes assurent des contacts tectoniques actifs entre croûte continentale en voie d'amincissement et craton non aminci ; les conséquences thermiques d'un tel dispositif sont vraisemblablement limitées à un simple réchauffement par friction mécanique au sein du seul domaine transformant ; l'accrétion océanique qui commence à se mettre en place à la base du domaine divergent, alors scellé par une discordance post-rift, n'affecte pas, dans un premier temps, la zone transformante, qui demeure intracontinentale et toujours tectoniquement active et voit sa couverture sédimentaire potentiellement très déformée ; (2) au cours d'un second stade (Fig. 4A) au fur et à mesure que se poursuit l'accrétion océanique, un segment de plus en plus important de la faille transformante met en contact actif lithosphères océanique et continentale (Fig. 4B) ; la zone transformante évolue alors peu à peu en une marge continentale tectoniquement (et sismiquement) active dont la bordure continue à se déformer ;

à ce stade, on peut penser que les différences de régimes thermiques entre les deux domaines lithosphériques en contact, mais contrastés, peuvent induire des transferts de chaleur significatifs à travers le domaine transformant, la lithosphère océanique plus chaude réchauffant alors la lithosphère continentale ; de tels transferts devraient en principe induire des mouvements verticaux importants, en particulier une surrection de la bordure continentale du domaine transformant, facilitée par le découplage des deux lithosphères ; une telle surrection devrait *à priori* atteindre un maximum lors du passage contre l'axe d'accrétion océanique ; le long de la marge, cet épisode doit également correspondre à un arrêt de l'activité tectonique transformante intracontinentale ; un tel arrêt doit s'enregistrer, au sein de la couverture sédimentaire par une nouvelle discordance, la discordance post-transformante (par analogie avec la discordance post-rift des marges passives classiques) ; (3) l'activité tectonique majeure ayant cessé, de même que les contrastes thermiques (Fig. 4C), l'évolution de la marge est alors essentiellement gouvernée par le refroidissement progressif de la lithosphère continentale sur laquelle elle a été construite (subsidence thermique), ainsi que par la succession des évènements environnementaux et gravitaires qui vont façonner sa couverture sédimentaire ; à partir de cette période, les deux lithosphères, continentale et océanique, appartiennent définitivement à la même plaque et sont couplées ; la marge transformante est enfin devenue passive.

Bien qu'avec quelques ajustements, ce modèle demeure curieusement de nos jours, près de trente ans après sa publication, le seul disponible tentant de rendre compte des principales caractéristiques morpho-structurales de la plupart des marges transformantes ; dans ce modèle, la ride dite « *marginale* », l'une des caractéristiques majeures de ces objets, résulterait à la fois de la forte déformation de la couverture sédimentaire accompagnant la création de la marge et de la surrection concomitante d'un domaine de croûte continentale amincie au cours de ses premiers stades de création.

5. 1988, EquaMarge 2 : une seconde campagne consacrée à l'analyse morphostructurale détaillée des deux segments de marges transformantes au large de la Guinée, de la Côte d'Ivoire et du Ghana

Les résultats, prometteurs, de la campagne de reconnaissance de 1983, qui avaient finalement permis de proposer un premier modèle d'évolution des marges transformantes, m'avaient également définitivement convaincu que la marge continentale au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana constituait de toute évidence un cas d'école. C'était donc sur elle qu'il était nécessaire de faire porter l'effort si l'on voulait, un jour, détenir un maximum de données pour mieux élucider ces objets, tant du point de vue de leur structure profonde qu'à celui de leur évolution sédimentaire, ou encore des rôles respectifs de la tectonique et de la thermicité quant à leur évolution verticale. Ces réflexions me conduisirent à proposer, dès 1985, une suite à la campagne initiale. Ce projet, EquaMarge 2, se fondait sur les capacités techniques, en particulier bathymétriques, disponibles depuis quelques années sur le navire du CNEXO *Jean Charcot.* Ce navire était en effet équipé du premier système de bathymétrie multifaisceaux à usage civil (le *Seabeam,* mis antérieurement au point pour la marine

américaine), permettant d'obtenir le long de la route du navire une cartographie détaillée du fond de mer avec une couverture significative. Les relevés obtenus permettaient en effet de cartographier en continu la topographie sous-marine le long de bandes du fond de mer d'une largeur proche des 3/4 de la profondeur d'eau ; autrement dit, pour une profondeur d'eau de 4 000 m, le *Seabeam* permettait d'obtenir une carte détaillée, large d'environ 3 km, le long de la route du navire. Il s'agissait là d'une véritable révolution car nous allions enfin pouvoir disposer, pour analyser la morphologie du fond de mer ainsi que les processus qui la modèlent, d'une cartographie presque aussi précise que celle dont disposent les géologues à terre !

Je proposais alors de concentrer les opérations sur des régions clefs des marges guinéenne et ivoiro-ghanéenne, ainsi que sur un secteur restreint de la zone de fracture de la Romanche, afin d'obtenir une couverture à 100 % des régions sélectionnées et de pouvoir, ultérieurement, mieux y localiser de futurs prélèvements et, si possible, de faire des observations *in situ* directement sur le fond de mer. L'idée était de pouvoir travailler en fond de mer avec une précision quasi comparable à celle d'un travail à terre. Grâce à l'acquisition simultanée de données géophysiques sériées, en particulier de bathymétrie et de sismique réflexion, résultant de la densité de l'espacement des routes sur chacun de ces secteurs, on pouvait également envisager une approche en quasi *« 3 D »* de la structure géologique des secteurs étudiés. Pour des raisons logistiques et de calendrier de la flotte océanographique l'opération EquaMarge 2 ne put être réalisée qu'en 1988, soit près de cinq ans après la campagne initiale.

EquaMarge 2, démarrant à Dakar au mois de février 1988, les opérations commencèrent au long de la marge guinéenne par l'acquisition de profils sériés à travers la pente continentale méridionale du plateau marginal de Guinée. Les données permirent de cartographier des reliefs qui purent être interprétés sans équivoque comme de gros volcans sous-marins ayant recoupé la marge primitive (Bertrand *et al.*, 1989). Cette interprétation fut confirmée par la récupération, par dragages le long de l'un de ces édifices, de basaltes alcalins qui ont été datés ultérieurement du Paléocène (Bertrand *et al.,* 1993). Le navire poursuivit sa route vers la zone de fracture de la Romanche au niveau de laquelle une « *boîte* » de dimensions réduites fut également cartographiée ; ces données illustrèrent pour la première fois les effets de la tectonique, issue d'un grand coulissement actif et aboutissant à créer des reliefs gigantesques avec des dénivelés dépassant 5 500 m entre le fond de la fosse de la Romanche (avoisinant -7 000 m dans le secteur étudié) et les blocs de croûte océaniques basculés et surélevés jusqu'à des profondeurs de -1 300 m (Honnorez *et al.*, 1991). Pour rejoindre notre objectif principal, la marge ivoiro-ghanéenne, le *Jean Charcot* suivit le tracé théorique de la zone de fracture fossile dans le but de repérer, le long de la route, des reliefs émergeant de la couverture sédimentaire recouvrant l'ensemble de la plaine abyssale et signalant cet accident majeur. Nous découvrîmes effectivement, sur ce tracé fossile, deux petites collines abyssales, plus ou moins elliptiques, émergeant, par 2° de latitude Nord et 6° 30 de longitude Ouest, du fond plat et sédimenté du golfe de Guinée. Un dragage fut tenté avec l'espoir de récupérer des roches magmatiques et de pouvoir ainsi tenter de dater sans ambiguïté le socle océanique de cette région de l'Atlantique qui, du fait de

sa localisation quasi permanente à proximité de l'Équateur, n'offre pas la possibilité de repérer des anomalies magnétiques interprétables. Le dragage permit effectivement de remonter des fragments rocheux mais ces derniers étaient constitués de roches sédimentaires, cataclasées et métamorphiques, typiques de la couverture paléozoïque du craton africain (Honnorez *et al.,* 1994). Autrement dit, des fragments du craton africain sont actuellement à l'affleurement en plein domaine océanique le long du trajet de la zone de fracture de la Romanche ! La seule explication logique à une telle énigme est vraisemblablement à rechercher dans le fonctionnement du grand décrochement, d'abord intracontinental, mais ayant par la suite donné naissance à la fracture océanique. Lors de ce mouvement, des fragments du craton africain, et de sa couverture, auraient été arrachés à la bordure africaine et abandonnée au fur et à mesure de l'ouverture océanique.

Après cette découverte surprenante, l'équipe, arrivée au large du Ghana et de la Côte d'Ivoire, entreprit aussitôt les travaux prévus dans deux secteurs de la marge transformante : (a) un secteur recouvrant la terminaison occidentale de la ride marginale de Côte d'Ivoire-Ghana à proximité du socle océanique et (b) un secteur où cette ride commence à s'individualiser à la jonction entre plate-forme et pente continentale ghanéenne.

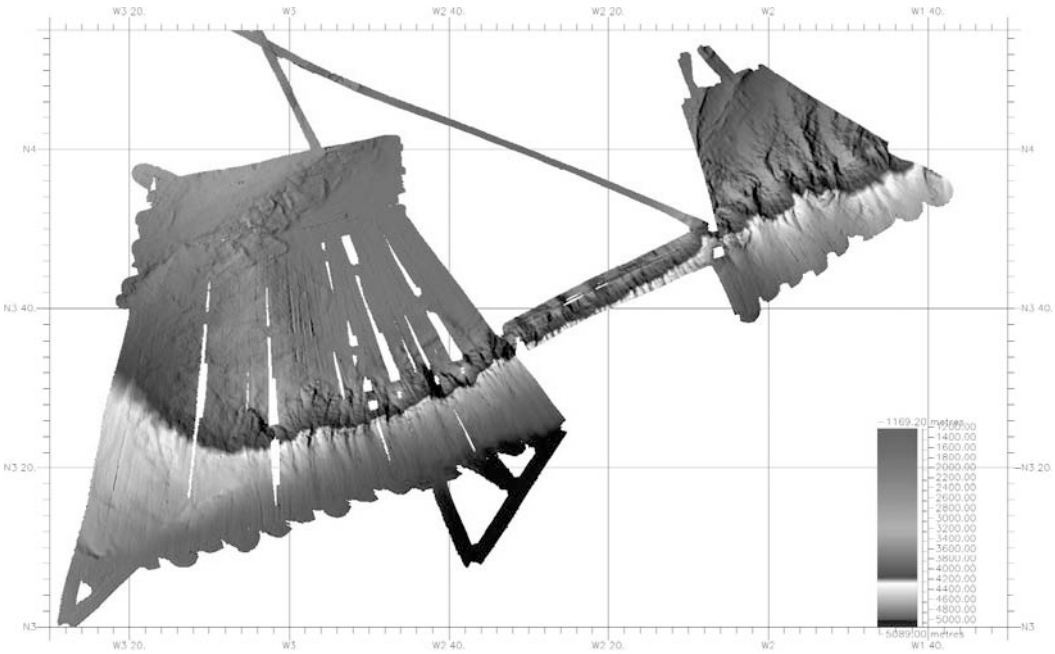

Fig. 5. Morphologie de deux secteurs de la ride marginale de Côte d'Ivoire-Ghana d'après les relevés de bathymétrie multifaisceaux de la campagne EquaMarge 2 (L. Loncke, communication personnelle).

Les nombreux profils parallèles (plus d'une trentaine), très rapprochés et nécessaires à l'établissement d'une carte bathymétrique précise (Fig. 5), illustrèrent bien la raideur et la linéarité de la pente méridionale de la ride mais montrèrent aussi que cette dernière était entaillée de nombreux petites vallées, canyons et ravines impliquant les effets probables d'une tectonique et ceux d'une érosion subaérienne bien que la profondeur d'eau se situe actuellement entre -2 000 et -5 000 m. Les profils sismiques permirent, quant à eux, de bien mettre en évidence une importante déformation tectonique (plis, faisceaux de failles) affectant

la partie la plus profonde de la couverture sédimentaire (Basile *et al.*, 1996) et tout à fait compatible avec un mouvement décrochant dextre de grande ampleur dirigé au N 60° (Fig. 6). Cette observation, combinée aux résultats de plusieurs dragages, qui fournirent à la fois des éléments du socle africain (surtout dans l'est de la zone d'étude) et des sédiments terrigènes indurés datés du Crétacé inférieur (le long de la pente méridionale de la ride), démontra que la ride marginale était pour l'essentiel constituée d'un matériel sédimentaire épais intensément déformé, datant vraisemblablement du Crétacé inférieur recouvert d'une mince pellicule sédimentaire non déformée et soumise à une érosion sous-marine. Une part du modèle conceptuel proposé antérieurement était, dans une certaine mesure, validée.

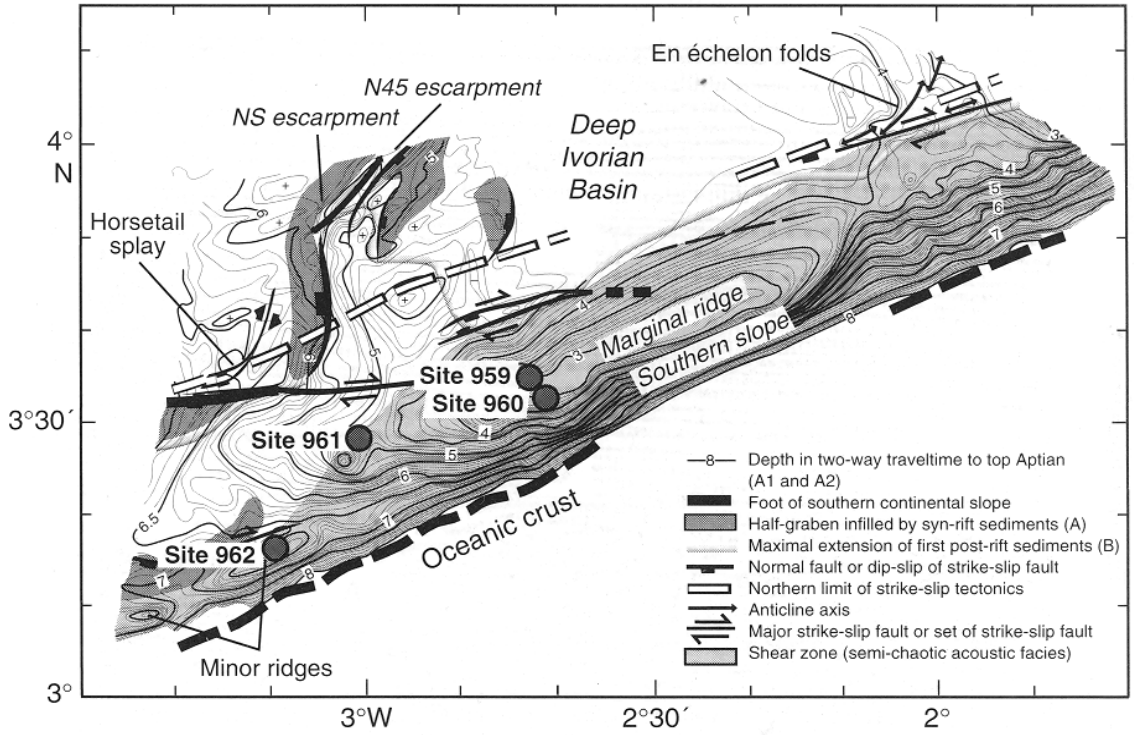

Fig. 6. Schéma structural de la ride de Côte d'Ivoire-Ghana construit à partir des données sismiques de la campagne EquaMarge 2 (Basile *et al.*, 1996).

Mais outre leurs intérêts scientifiques, directement exploitables, les résultats acquis au cours de cette campagne avaient également pour but de préparer le futur, notamment l'organisation de plongées profondes devant permettre d'analyser cette pente continentale *in situ*, pratiquement comme peuvent le faire des géologues sur le terrain. Pour l'heure, il était apparu fondamental, si l'on voulait construire un modèle robuste de marge transformante, de ne pas se limiter aux seules caractéristiques morphostructurales et sédimentaire, d'un tel objet, mais aussi d'obtenir des résultats concernant sa structure profonde et crustale. Par ailleurs, de telles données, en particulier celles de sismique réflexion multitrace, étaient indispensables à acquérir dans le but de promouvoir d'éventuels forages scientifiques profonds, seuls types de données permettant de calibrer sans ambiguïté l'ensemble des résultats disponibles et, si possible, d'établir un scénario robuste concernant l'évolution tectonique, sédimentaire et temporelle d'une marge transformante telle que celle de Côte d'Ivoire-Ghana. Ce sont les raisons pour lesquelles je me lançais, dès la fin de 1988, avec

l'équipe de chercheurs et d'étudiants qui m'accompagnaient, dans un dossier de proposition de deux nouvelles campagnes à la mer.

6. 1990, EquaSis et EquaRef : deux campagnes « *jumelles* » consacrées à l'analyse des structures profonde et crustale de la marge transformante de Côte d'Ivoire-Ghana par sismique réflexion multitrace et sismique grand angle

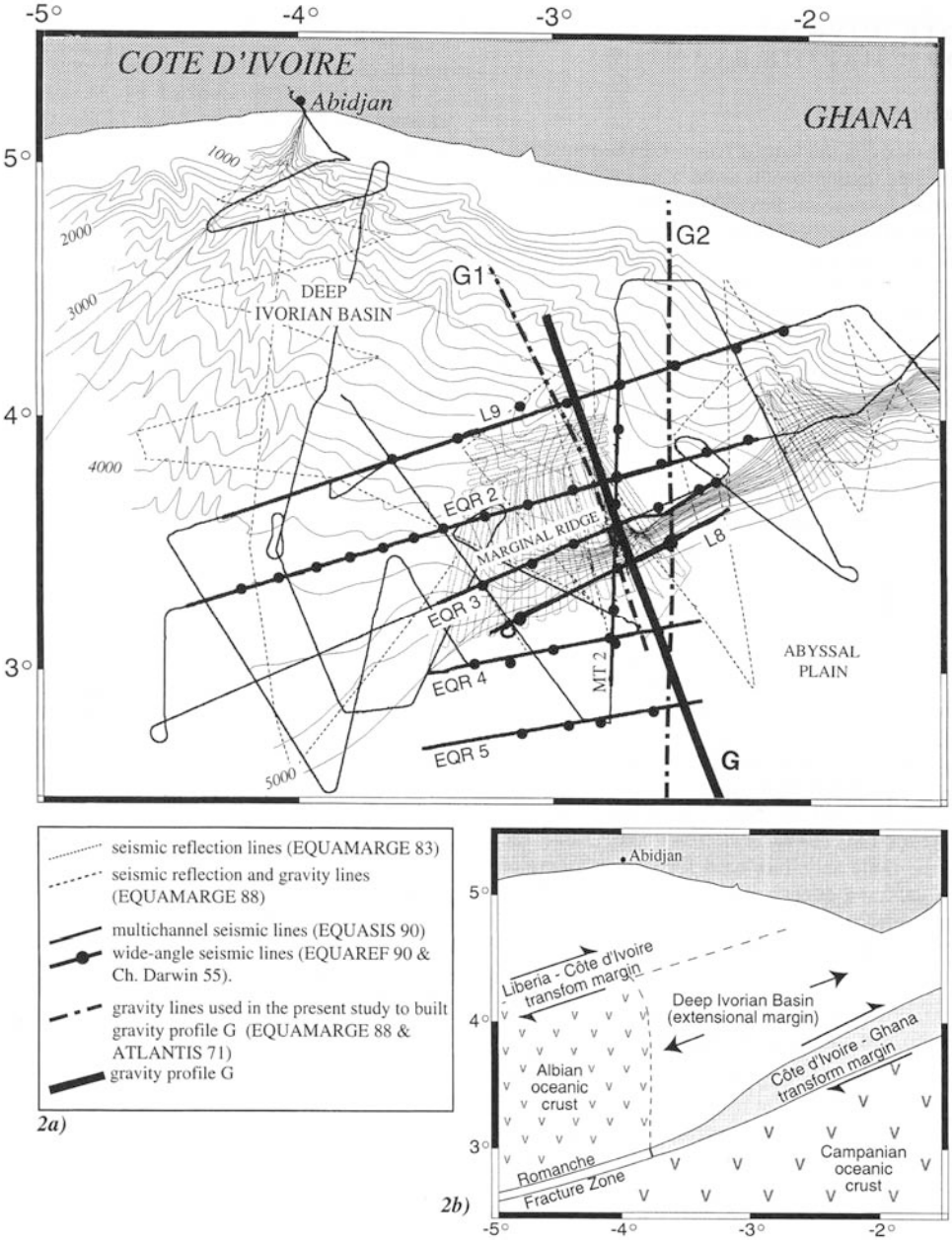

Fig. 7. Localisation des profils des campagnes EquaSis et EquaRef.

Conduites à bord du navire de l'IFREMER le *Nadir* par l'équipe Géomer du laboratoire de Géodynamique de Villefranche-sur-Mer (Jean Mascle, chef de mission) et par une équipe de l'ORSTOM-IRD (Bernard Pontoise, chef de mission), également basée à Villefranche-sur-Mer,

les deux campagnes EquaSis et EquaRef se déroulèrent successivement au printemps 1990 au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana.

EquaSis et EquaRef mirent en œuvre, le long des mêmes profils, des moyens de sismique réflexion dits multitraces (six sources sismiques puissantes et un capteur remorqué de 96 traces), et une douzaine de sismomètres marins (Obs) enregistrant sur le fond de mer les ondes sismiques générées par les sources et réfractées par les différentes interfaces du sous-sol (Fig. 7).

L'acquisition de données de sismique multitrace avait le double but : (a) obtenir des profils sismiques régionaux permettant d'illustrer la structure de la couverture sédimentaire de l'ensemble de la marge ivoiro-ghanéenne, tant à travers son segment divergent qu'à travers son segment transformant (la ride marginale) ; ces profils devaient permettre d'imager (sur des épaisseurs estimées à 20-25 km) la totalité de la couverture sédimentaire jusqu'au socle cristallin du bâti africain sur lequel elle repose ; (b) fournir des relevés de détail permettant par la suite de sélectionner d'éventuelles cibles de forages scientifiques profonds, et absolument indispensables à la localisation de ces dernières.

Les données attendues des opérations de sismique réfraction (ou grand angle) avaient quant à elles pour but : (a) de fournir les valeurs des vitesses de propagation des ondes sismiques à travers l'ensemble de la colonne sédimentaire ainsi qu'au niveau de la croûte et, si possible, jusqu'au manteau supérieur ; et (b) de permettre d'en déduire l'épaisseur totale et, si possible, d'avoir une idée de la nature géologique des différents ensembles mis en évidence par leurs vitesses sismiques. Ces valeurs avaient également pour but de fournir une meilleure calibration des profils de sismique réflexion, en particulier de convertir par migration les coupes-temps en coupes-profondeur et ainsi de restituer au mieux la géométrie réelle des différents réflecteurs. L'ensemble des opérations se déroula parfaitement.

Les seize profils de sismique « *multitrace* » permirent de bien illustrer les différentes caractéristiques de la couverture sédimentaire de la marge, tant au plan de sa stratigraphie sismique, avec des unités acoustiquement très différenciées (Fig. 8), que de sa variabilité en épaisseur (Lamarche *et al.*, 1997). Ils permirent en outre de bien caractériser les principales discordances, sédimentaires et tectoniques qui résultent des grandes étapes de construction d'une marge transformante telle que celle de Côte d'Ivoire-Ghana ; ils facilitèrent enfin le choix d'emplacements pour de futurs forages profonds (Basile *et al.*, 1996).

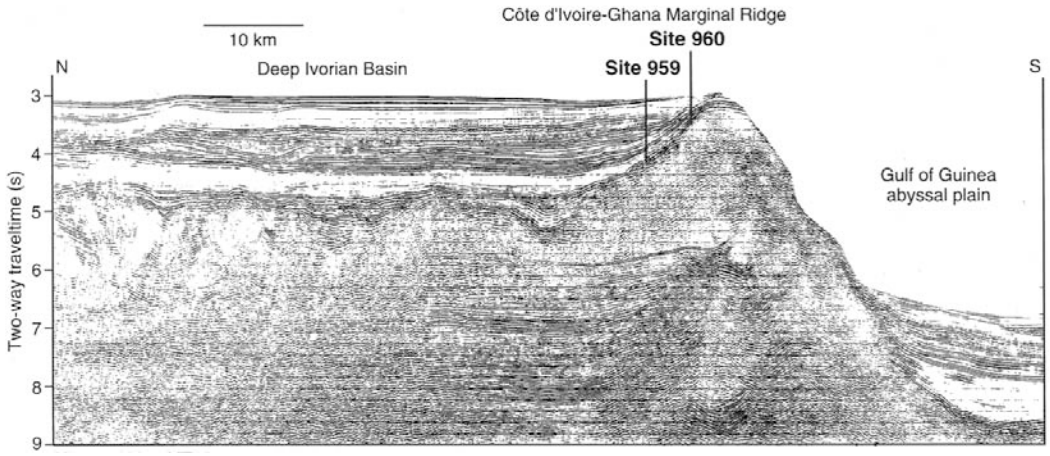

Fig. 8. Exemple d'un profil de sismique réflexion multitrace à travers la marge ivoiro-ghanéenne et sa ride marginale (localisation du profil sur la figure 7 par un trait gras) (Basile *et al.,* 1996).

Associées à des modélisations gravimétriques, l'interprétation des résultats de ces six opérations de sismique grand angle fournit des profils crustaux à travers le segment de marge divergente qui borde la ride marginale au nord, la ride marginale elle-même, et le domaine océanique voisin (Fig. 9) qu'elle surplombe (Sage *et al.*, 1997a). Ces données démontrèrent, entre autres, que la bordure transformante de la marge ivoiro-ghanéenne, caractérisée par la ride marginale, correspondait à une série de blocs crustaux, d'une dizaine de kilomètres d'extension horizontale et d'une vingtaine de kilomètres d'épaisseur (dont 7 à 8 km de sédiments), en contact abrupt (tout juste quelques kilomètres) avec la croûte océanique voisine, elle-même anormalement peu épaisse (Sage *et al.,* 1997b). Un tel dispositif suggérait la possibilité d'un réchauffement potentiel par conduction thermique latérale à partir de la lithosphère océanique voisine ; l'une des conséquences attendues d'un tel transfert de chaleur pouvait être un soulèvement de la bordure transformante (Sage *et al.*, 2000), bien que les données géologiques disponibles ne semblent indiquer qu'un transfert thermique plutôt modéré (Bouillin *et al.*, 1997).

Après ces opérations, le modèle « *Marge transformante »*, proposé en 1987, disposait enfin de contraintes crustales ; ces dernières indiquaient que la bordure transformante offrait une structure profonde à semi-profonde assez comparable à celle du segment divergent voisin, à ceci près qu'un soulèvement, issu de mécanismes d'origine incertaine, avait affecté cette bordure, dont une bonne part de la couverture sédimentaire était en outre fortement déformée par les effets d'une tectonique décrochante. S'agissait-il des effets de la déformation tectonique, y compris au sein de la couverture sédimentaire, de frictions entre deux plaques lithosphériques, ou d'échanges thermiques par simple conduction latérale entre deux lithosphères à régimes thermiques différents ? La question n'était pas vraiment résolue. Il apparut donc nécessaire, si l'on voulait tenter d'y répondre, d'acquérir des données plus concrètes, permettant par exemple de savoir quelle était la nature exacte et le degré de la déformation, ainsi que celui de l'éventuelle transformation métamorphique qu'avaient subi les sédiments qui, d'après les données sismiques, semblaient constituer une bonne part de la ride marginale, du moins dans sa partie supérieure. Tout en avançant, avec l'équipe scientifique et quelques étudiants en thèse (Sage, 1994), dans le traitement des données sismiques

récoltées durant les deux campagnes EquaSis et EquaRef, cette constatation me conduisit à proposer une nouvelle campagne consacrée à l'analyse *in situ* de la pente continentale méridionale de la ride marginale de Côte d'Ivoire-Ghana. Ce fut le dossier EquaNaute soumis fin 1990.

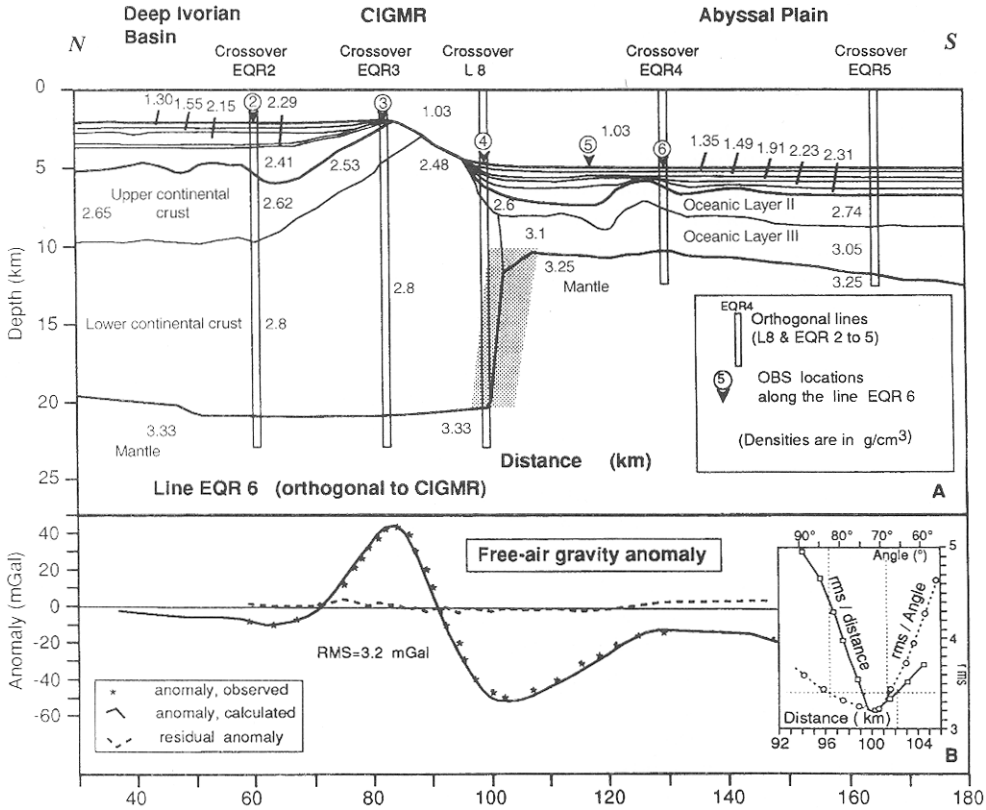

Fig. 9. Modèle crustal à travers la ride de Côte d'Ivoire-Ghana construit à partir des résultats de sismique grand angle ; en bas, modèle gravimétrique (localisation du profil sur la figure 7 par un trait gras) (Sage *et al.*, 1997).

7. 1992, EquaNaute : plongées scientifiques sur deux segments de marge transformante et acquisition de données géologiques *in situ*

Début juin 1992, une équipe scientifique composée presque exclusivement de géologues particulièrement bien entraînés à l'observation de terrain (Jacques Allouc, Christophe Basile, Jean Benkhelil, Hervé Bertrand, Jean-Pierre Bouillin, Michel Cousin, Michel Guiraud, José Honnorez, Georges Mascle, Michel Popoff, C.-Boko Sombo et Pierre Tricart) embarqua à Abidjan à bord du *Nadir,* alors porteur du submersible de recherches le *Nautile* pour une cinquième opération à la mer (sous la conduite de Jean Mascle) baptisée EquaNaute et consacrée aux marges transformantes. L'utilisation de ce sous-marin, capable d'emporter trois personnes dont un scientifique, jusqu'à 6 000 m de profondeur, équipé de caméras, de divers systèmes de prélèvements et avec des possibilités de mesure *in situ,* devait permettre d'effectuer, sur des fonds topographiques enfin précis (provenant des cartes obtenues au cours de la campagne EquaMarge 2), des travaux d'observation, des prélèvements d'échantillons, voire des mesures microstructurales si… les sites choisis pour les plongées

n'étaient pas sédimentés ou recouverts d'encroûtements manganésifères, comme le prédisaient la plupart des spécialistes. Quatorze plongées furent effectuées à cette occasion le long de la pente méridionale de la ride de Côte d'Ivoire-Ghana (Fig. 10).

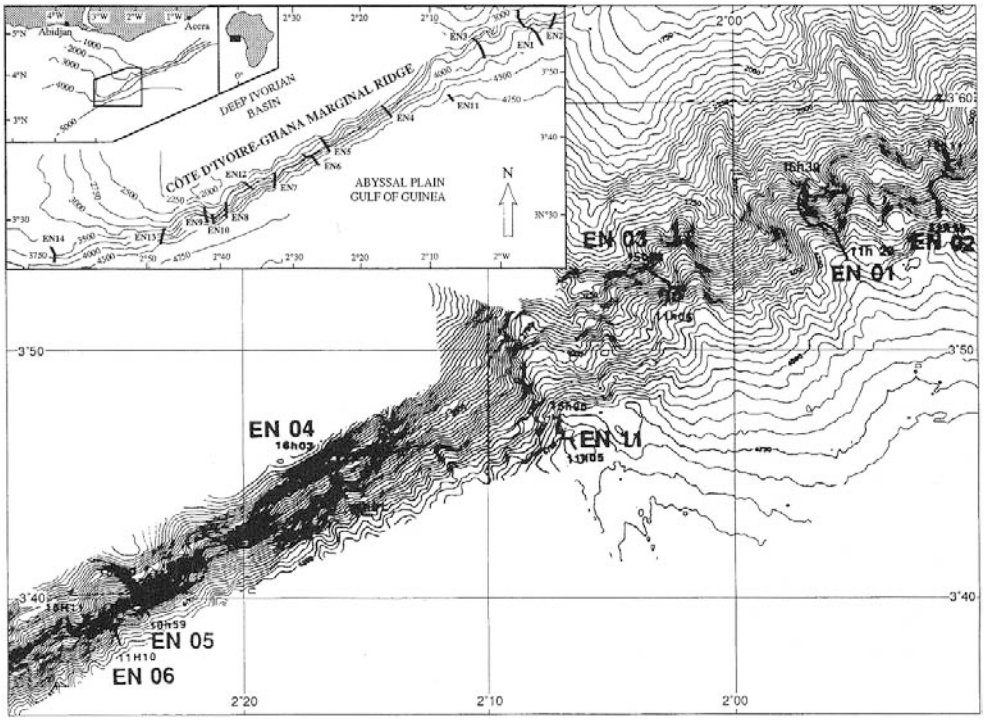

Fig. 10. Localisation des plongées EquaNaute 1 à 4 et 11 au long de la pente ivoiro-ghanéenne.

Deux courtes plongées d'exploration furent tentées sur les reliefs abyssaux découverts antérieurement le long de la zone de fracture fossile de la Romanche ; la campagne devant se terminer à Dakar, trois plongées furent enfin consacrées à des sites sur la marge guinéenne. À l'exception d'une seule, avortée pour raisons techniques, toutes les plongées profondes réalisées lors de cette campagne démontrèrent que notre pari avait été le bon : tous les sites étudiés se révélèrent être très favorables, non seulement à l'observation et aux mesures microstructurales *in situ*, mais la plupart d'entre eux permirent également de nombreux prélèvements géologiques (Mascle *et al.*, 1994). Les quatorze plongées réalisées entre -2 200 m et -4 905 m au long de la pente ivoiro-ghanéenne permirent de lever des coupes géologiques détaillées le long de presque 75 km de distance parcourue sur le fond (Fig. 11) ; plus de 160 échantillons rocheux orientés furent directement prélevés le long des parois rocheuses non ou très peu recouvertes d'enduits indurés ou de sédiments meubles. Il apparut alors que l'épais empilement sédimentaire (3 000 m au minimum), directement exposé le long de la pente, correspondait à une série purement terrigène, d'âge crétacé inférieur, se répétant selon des séquences cycliques de quelques dizaines de mètres (Fig. 12) et correspondant à des dépôts d'origine très peu profonds (environnements deltaïques à pro-deltaïques) (Guiraud *et al.,* 1997). Ces dépôts avaient en outre enregistré la trace de différents épisodes de déformation : les effets d'un régime d'abord transtensif accompagnant leur lithification, puis ceux d'une déformation de type cisaillant produisant une importante fracturation (Fig. 13) créant de spectaculaires micro-falaises sur la pente, et pouvant même localement aboutir à la mise en place de plis, surtout observables vers le haut

des parois explorées (-2 250 m) (Mascle *et al.,* 1998). Les deux plongées que j'eus personnellement la chance d'effectuer, dont l'une jusqu'à près de -5 000 m, demeurent pour moi l'une des grandes émotions scientifiques de ma vie de chercheur. Savoir que l'on observe pour la première fois, et sans doute la dernière, des parois créées au sein de séries datant de 110 millions d'années, mises vraisemblablement à l'affleurement au cours du Crétacé supérieur, voilà donc plus de 80 millions d'années, et toujours demeurées, depuis cette époque, à l'affleurement dans un tel environnement marin, est une expérience plus que rare !

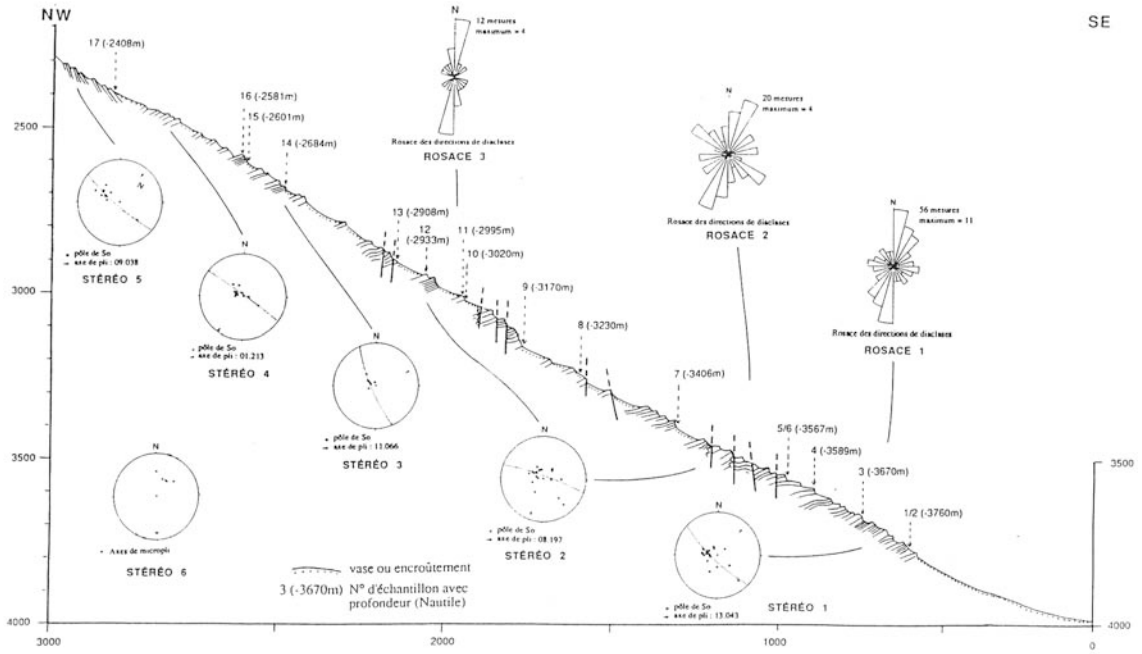

Fig. 11. Synthèse des observations, et localisation des prélèvements, effectuées lors de la plongée 5, entre -4 076 et -2 340 m de profondeur. (Voir localisation sur la Fig. 10) (Mascle *et al.,* 1994).

Après vingt jours de plongées scientifiques le long de la pente continentale ivoiro-ghanéenne, riches d'une moisson géologique exceptionnelle, *le Nadir* fit route vers la marge de Guinée en passant par les témoins fossiles de la zone de la Romanche, abandonnés au milieu de la plaine abyssale et repérés en 1988. Les deux plongées effectuées sur ces reliefs, entre -4 600 et -3 700 m de profondeur, confirmèrent la présence de méta-sédiments identiques à ceux prélevés quelques années auparavant par dragages, et permirent également d'observer, à la base des reliefs, des dolérites fortement mylonitisées indiquant les effets d'une très forte déformation (Honnorez *et al.*, 1994).

Trois plongées sur le mont Nadir, l'un des grands édifices volcaniques accidentant la pente continentale sud-guinéenne, vinrent clore la campagne EquaNaut avant l'arrivée du *Nadir* à Dakar. Les prélèvements, tentés sur des coulées volcaniques massives et curieusement corrodées (Mascle *et al.,* 1994), furent quasiment impossibles du fait d'une forte cimentation liée à la présence d'un enduit manganésifère particulièrement induré ; seuls quelques nodules de manganèse et quelques plaques d'encroûtements purent être prélevés vers le sommet du relief exploré. Ce sommet, quasiment plat, évoque fortement un guyot ; les volcans de la marge sud-guinéenne, sans doute issus de l'activité d'un point chaud, auraient

donc pu avoir été subaériens au début de leur histoire, au cours du Paléocène (Bertrand *et al.,* 1993) ; ils auraient ensuite « *subsidé* » comme l'ensemble de la marge continentale qu'ils avaient antérieurement affectée ; les étranges figures de corrosion, observées lors des plongées sur les coulées, peuvent peut-être s'expliquer par cette phase de l'histoire du mont Nadir.

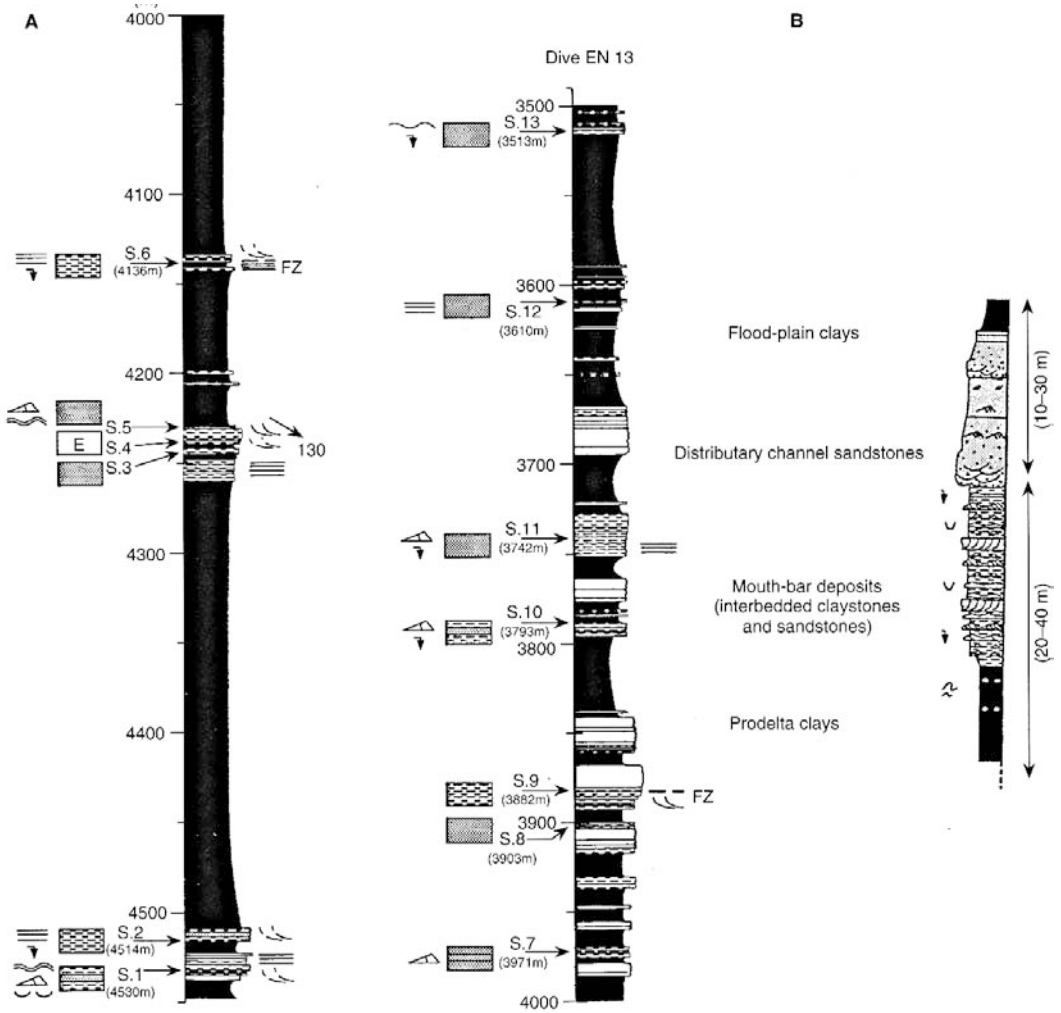

Fig. 12. Séquences sédimentaires répétitives observées lors de la plongée EN 13 (A), et synthèse (B) des dépôts terrigènes observés le long de la pente ivoiro-ghanéenne ; ces séquences sont typiques de dépôts deltaïques très peu profonds (Guiraud *et al.,* 1997).

Courant 1992, le programme EquaMarge avait permis d'acquérir une énorme quantité de données, tant géologiques que géophysiques, analysées, ou encore en cours de l'être, dans le cadre de thèses s'adressant à la marge guinéenne (Marinho, 1985) et surtout à la marge de Côte d'Ivoire-Ghana (Blarez, 1986 ; Basile, 1990 ; Sage, 1994), considérée comme un exemple parfait de marge continentale transformante. Ces données, malheureusement toujours les seules à être aussi nombreuses et variées concernant un segment de marge transformante, furent alors confrontées à des expériences analogiques conduites par Christophe Basile dans le cadre d'une coopération avec le laboratoire de tectonique de l'université de Rennes (Jean-Pierre Brun). Le but était de tenter de reproduire, grâce à ces

expériences, les différentes structures observées au sein de la marge, puis de confronter les résultats avec les diverses observations géologiques et géophysiques provenant de l'exemple naturel. La comparaison avec les résultats de modélisation analogique fut intéressante, montrant entre autres que la formation d'une ride marginale était bien compatible avec l'activité d'un grand décrochement dextre (Basile *et al.,* 1992). Mais si une telle approche permettait effectivement une première tentative de généralisation du modèle naturel que constituait la marge de Côte d'Ivoire-Ghana, elle ne permettait bien sûr pas de caler, à la fois dans l'espace et dans le temps, les variations et le contrôle de (et sur) la sédimentation, de la déformation, des mouvements verticaux ou encore moins les effets de la variabilité des températures ayant affecté un segment de marge transformante au cours de sa mise en place.

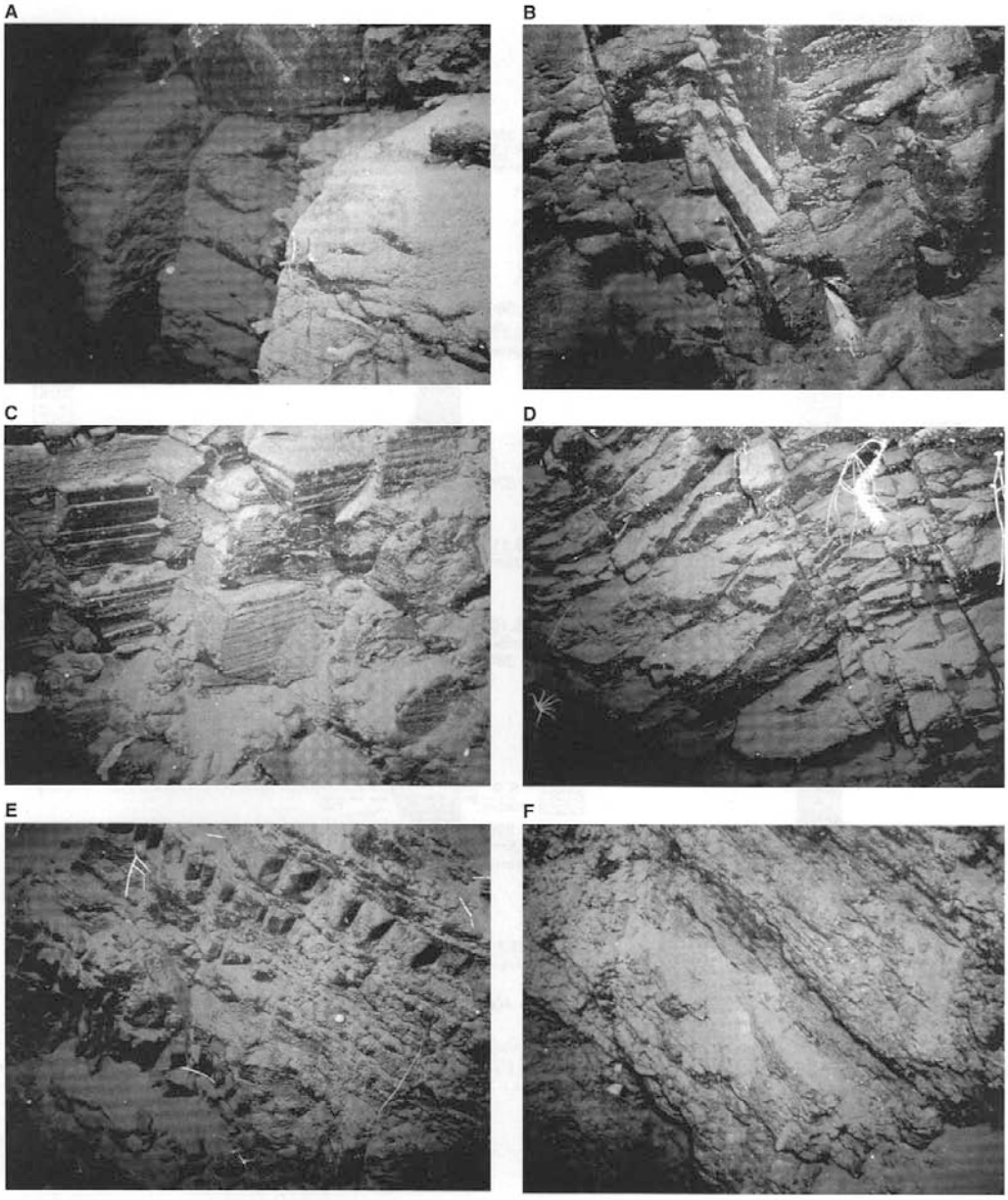

Fig. 13. Quelques exemples d'affleurements rocheux (grès fins diaclasés) observés en plongée sur la pente ivoiro-ghanéenne lors de plongées Equanaute (Mascle *et al.*, 1994).

Pour tenter de mieux comprendre les variations au cours du temps de la subsidence et du soulèvement et, par là, fournir des données non ambiguës pour tenter d'évaluer les parts respectives des contrôles thermique et thermomécanique, et aboutir ainsi à davantage contraindre le modèle initial, l'équipe que j'animais fut conduite à bâtir et à proposer un projet de forages scientifiques dans le cadre du programme international Ocean Drilling Program.

8. 1995 : la campagne ODP 159 au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana : contrôle géologique par forages scientifiques profonds

Fort d'une expérience antérieure, le leg ODP 107 réalisé en mer Tyrrhénienne en 1984-1985 lors de l'une des premières campagnes du programme international de forages scientifiques ODP, j'avais appris à bien connaître les divers arcanes du fonctionnement de ce programme ; je me lançais, dès le début des années 1990, avec mes collègues d'EquaMarge dans la préparation d'un dossier de proposition de forages scientifiques dédiés à la marge transformante ivoiro-ghanéenne. Nous avions pour cela une bonne part des cartes en mains ; en effet, les données indispensables que sont les profils de sismique multitrace de qualité étaient disponibles depuis 1990 et en cours de traitement (Basile *et al.*, 1996 ; Lamarche *et al.*, 1997) ; additionnés aux cartes bathymétriques détaillées, obtenues en 1988, et aux observations géologiques *in situ* acquises depuis peu (1992), ils rendaient le dossier relativement aisé à plaider techniquement. Encore fallait-il convaincre les divers comités d'évaluation du programme ODP de son intérêt scientifique ! Ce fut chose assez facile, en particulier du fait de la qualité et de la variété des données déjà disponibles, mais aussi de l'absence de forages, scientifiques ou industriels, concernant l'environnement géologique si particulier que représentent les marges transformantes. Après ce semi-marathon scientifique, restait à franchir le redoutable obstacle d'un comité spécifique (le Safety and Pollution Panel, auquel j'eus la grande chance d'appartenir par la suite pendant plusieurs années) en charge d'évaluer les propositions de forages au strict plan de la sécurité et des risques potentiels induits. Je me souviens très bien de cette réunion tenue à la Barbade ! Là, les experts du comité, pratiquement tous originaires du monde pétrolier, fascinés par les images provenant des plongées Equanaut sur ce qui leur parut être des affleurements sous-marins parmi les plus anciens au monde, donnèrent, sans trop de difficultés, un feu vert final et décisif aux différentes localisations proposées pour les forages (Fig. 14).

C'est ainsi que, du 4 janvier au 2 mars 1995, une équipe internationale d'une vingtaine de chercheurs, dont quatre Français (Christophe Basile, Jean-Pierre Bellier, Jean Benkhelil, Jean Mascle) embarqua pour le Leg ODP 159 sous la direction conjointe de George-P. Lohman (chercheur au Woods Hole Ocanographic Institution) et de moi-même, sur le navire de forage *Joides Resolution*. La ride marginale de Côte d'Ivoire/Ghana, principale expression morpho-structurale de ce segment de marge transformante, fut à cette occasion le lieu de quatre sites de forages implantés par des profondeurs variant entre -2 060 m et -4 657 m de profondeur d'eau (Fig. 15).

On retiendra surtout que ces quatre sites atteignirent tous des sédiments terrigènes, en partie déformés, datés du Crétacé inférieur. Au site 959, implanté par 2 582 m de profondeur d'eau, quatre forages furent successivement effectués afin de documenter non seulement la base de la colonne sédimentaire du bassin profond de Côte d'Ivoire recouvrant les contreforts de la ride de Côte d'Ivoire (Fig. 8), mais aussi, par une récupération à 100 %, échantillonner en grand détail la partie supérieure de cette couverture ; le forage le plus profond de cette série de quatre pénétra la colonne sédimentaire sur 1 159 m. Il permit d'analyser l'ensemble de l'histoire sédimentaire du bassin et de la ride marginale la bordant au sud. Ce forage documenta, entre autres, une discordance angulaire, d'âge turonien, entre dépôts terrigènes (grès fins) tectonisés et sédiments carbonatés peu profonds ; la fin de la période de déformation active et du soulèvement de la ride, donc, en fait, la fin de l'activité transformante de la marge, était datée.

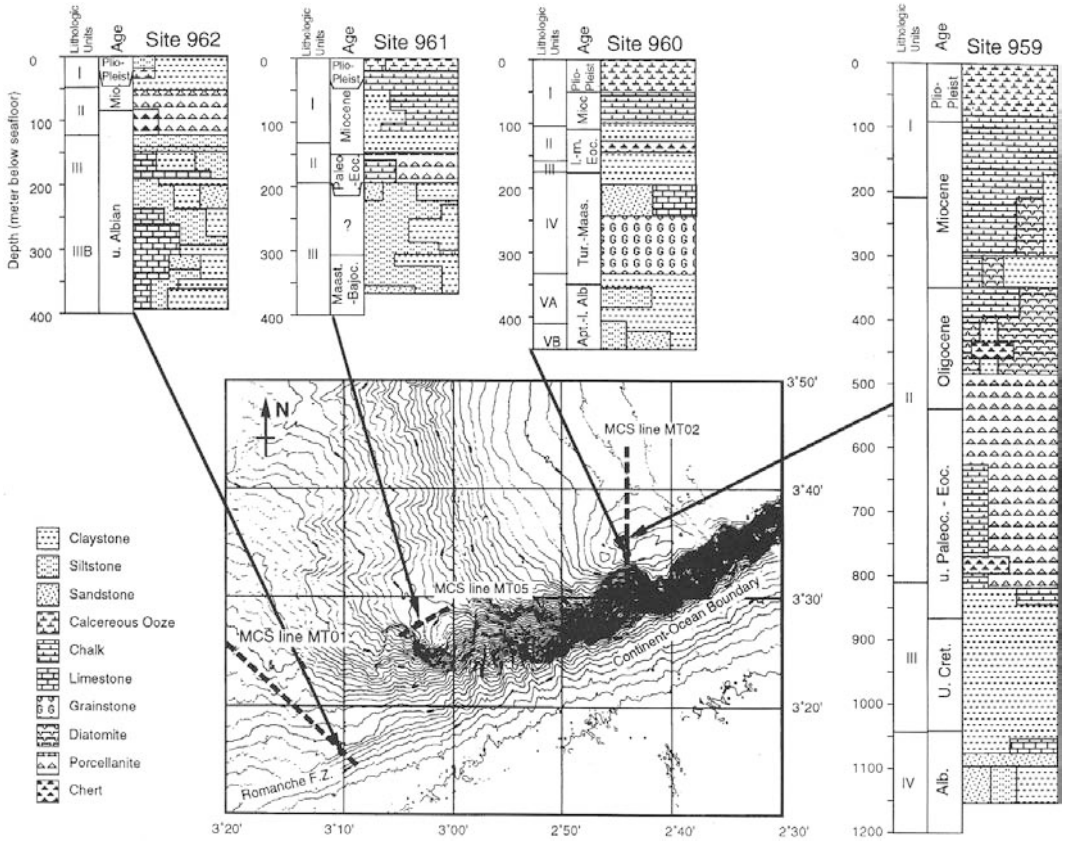

Fig. 14. Emplacements et logs synthétiques des forages ODP 159 implantés sur la ride de Côte d'Ivoire-Ghana.

Une succession comparable, mais condensée, fut échantillonnée lors de trois forages réalisés au site 960, localisé sur le sommet de la ride marginale par 2 046 m de profondeur (Fig. 8). La seule différence, notable, entre les deux sites réside dans la variation d'épaisseur de la couverture d'âge post-turonien à oligocène, caractérisée par de nombreux hiatus sédimentaires. Aux deux sites 961 et 962, six forages furent réalisés avec des pénétrations maximales de 375 et 393 m. Le forage 961, localisé sur la terminaison occidentale de la ride marginale par -3 306 m de profondeur (Fig. 15), atteignit également des sédiments silico-clastiques, partiellement déformés, attribués au Crétacé inférieur. Le forage 962, implanté

quant à lui par 4 649 m de profondeur sur un petit relief décelable à proximité de la terminaison de la ride marginale, traversa d'abord une soixantaine de mètres de vases et marnes d'âge pléistocène à miocène, avant d'atteindre directement des sédiments siliceux, des marnes et de traverser une succession de grès fins et marnes siliceuses datés de l'Albien terminal.

Les forages du leg ODP 159 fournirent des données géologiques cruciales qui confortèrent en partie le modèle initial proposé dès 1987. La nature de la ride marginale, ainsi que la succession des évènements sédimentaires et tectoniques gouvernant la mise en place d'un tel segment de marge transformante, étaient bien établies.

Tant au plan sédimentaire, structural que paléogéographique ces nouvelles contraintes permettaient de résumer l'évolution de la marge transformante au large de la Côte d'Ivoire-Ghana en trois grands stades (Fig. 15) : (1) à partir de l'Aptien, et jusqu'au Turonien, une période dite « *syn-transformante* », accompagnant la création concomitante du segment divergent voisin, et durant laquelle la sédimentation, essentiellement terrigène, s'accompagne d'une importante déformation tectonique ; (2) du Turonien au Santonien, un stade au cours duquel s'achève l'édification de la ride marginale et pendant lequel cesse progressivement une activité tectonique (issue du mouvement coulissant) diachrone, (3) enfin, depuis le Campanien, une période à partir de laquelle la bordure continentale, devenue finalement passive, se refroidit, « *subside* » et n'enregistre plus que des événements sédimentaires contrôlés par les variations de l'environnement global. Au cours de ce dernier stade, le bassin ivoirien profond, ne recevant plus de sédiments clastiques originaires du sud, se différencie alors nettement de sa ride méridionale et reçoit d'abord le dépôt de séries surtout carbonatées ; il enregistre aussi les effets de périodes d'intense productivité (« *black shales* »). Depuis l'Éocène et jusqu'au cours du Miocène, la sédimentation, du fait de son contrôle par des facteurs océanographiques globaux, devient essentiellement bio-siliceuse avant de se caractériser, au cours du Néogène, par une épaisse succession de marnes pélagiques à hémipélagiques.

Il n'est pas possible de résumer, dans le cadre de cet article, l'ensemble des résultats provenant de ces quatre forages profonds. Outre le fait de documenter les divers processus sédimentaires et tectoniques ayant accompagné la création de la marge transformante (ce qui avait été le but principal de la campagne de forages), les résultats permirent d'étudier un large spectre de thématiques parmi lesquelles l'altération géothermique des argiles et de la matière organique, les variations de la géochimie organique, les diverses réactions diagénétiques, les variations de l'environnement des dépôts, celles de la paléo-océanographie et de la biostratigraphie, etc. L'ensemble des résultats est présenté et discuté en détail au sein des 1261 pages des deux volumes directement issus de la campagne ODP 159, que sont les *Volume 159, Initial Reports* et *Volume 159, Scientific Results* (Mascle *et al.*, 1996a ; 1998), ainsi que dans plusieurs articles de synthèse auxquels les lecteurs pourront se reporter (Mascle *et al.*, 1995 ; 1996b ; 1997; Clift *et al.*, 1997).

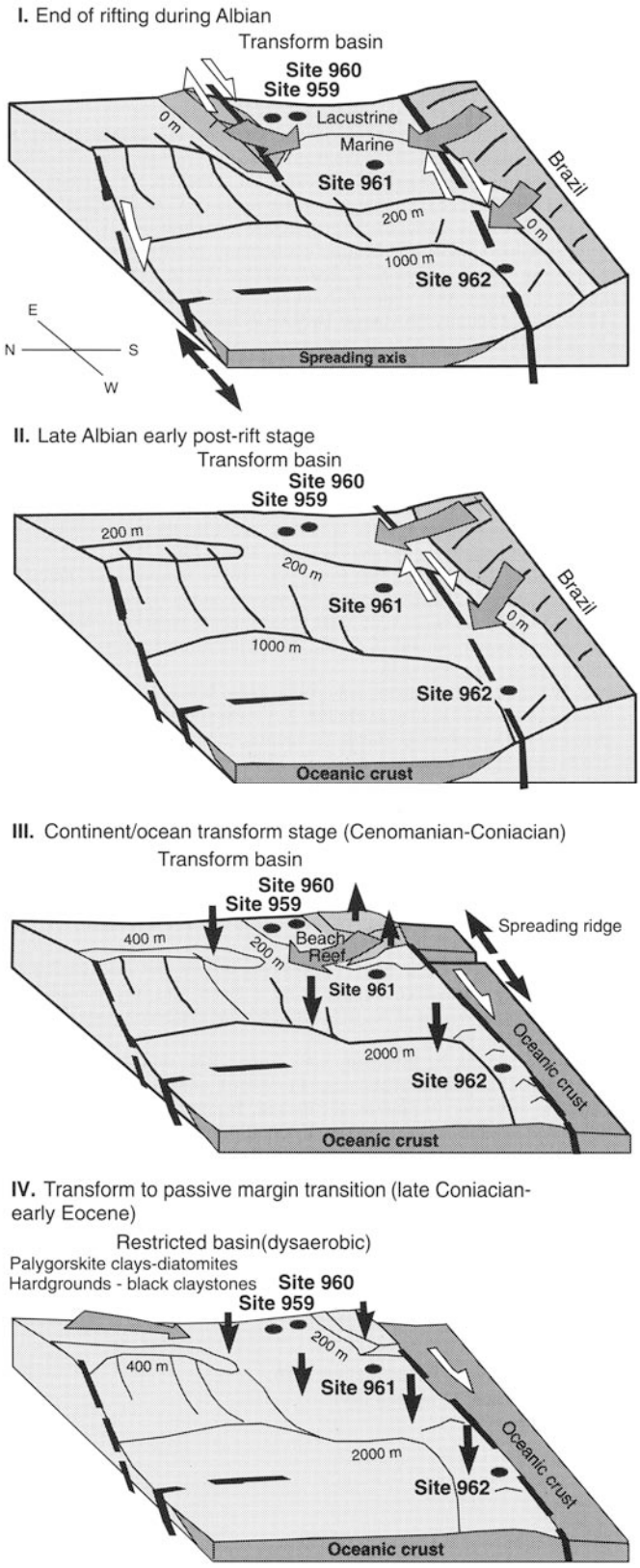

Figure 15. Quatre stades illustrant l'évolution tectonique, verticale (soulèvement et subsidence), les différentes sources sédimentaires et les zones de dépôt des principaux domaines de la marge transformante de Côte d'Ivoire-Ghana au cours du Crétacé (d'après Strand, 1998).

Conclusions

De 1975 à 1995, deux décennies de recherches ont permis de combler une anomalie dans la connaissance et l'étude des marges continentales. Alors qu'au cours des années 1970 à 1980, les efforts de la communauté scientifique avaient porté sur l'analyse des bordures continentales issues soit (a) de la convergence entre plaques lithosphériques et aboutissant à la création et au fonctionnement des marges actives, soit (b) des effets et conséquences de la rupture, puis de la divergence lithosphérique avec leur corollaire : la construction des marges passives, l'impact des grands mouvements de coulissement entre plaques lithosphériques, n'avait curieusement pas été pris en compte pour expliquer les particularités de certaines bordures des continents ; seul le coulissement en domaine intra-océanique, aboutissant à la notion de zones de fractures, avait été analysé. Cette constatation fut la principale raison de la création et de la conduite ultérieure, en France, de l'ambitieux programme EquaMarge. Ce dernier fut essentiellement consacré à combler cette lacune des connaissances en se focalisant sur l'analyse de la marge transformante au large de la Côte d'Ivoire-Ghana, considérée comme l'un des plus beaux exemples de ce troisième type de marge. Pendant une douzaine d'années, ce programme, dont le couronnement fut, début 1995, l'organisation d'une campagne de forages scientifiques profonds, permit de collecter une énorme quantité de données ; ces dernières fournirent alors de nombreuses contraintes, tant géophysiques que géologiques, permettant de préciser peu à peu un modèle conceptuel rendant compte des grandes étapes de la formation d'une marge transformante et des structures qui en sont issues. Un modèle ne peut cependant être validé et généralisé que s'il se fonde sur plusieurs exemples ! Malheureusement, à la suite de l'effort considérable qu'avait été la réalisation des différentes étapes du projet EquaMarge, aucune autre analyse systématique d'un segment de marge transformante n'a été entreprise au cours des vingt dernières années dans le monde ! Seules quelques recherches régionales, à buts surtout industriels, ont été conduites çà et là, notamment au large de l'Australie occidentale (Rollet *et al.,* 2013), de la Tasmanie (Exon *et al*., 2001) ou encore de l'Afrique orientale (Coffin et Rabinowitz, 1987). Si bien que le modèle, simple pour ne pas dire simpliste, proposé en 1987, demeure paradoxalement le seul auquel se réfère encore de nos jours la communauté scientifique, et ce malgré toutes ses approximations.

Mais les choses sont peut être en train de changer ! La découverte, relativement récente, au large de la Côte d'Ivoire-Ghana, au sein de séries sédimentaires liées à un environnement de type marge transformante, de gisements potentiellement prometteurs, a brusquement éveillé l'attention du monde industriel et de la communauté scientifique. Plusieurs ateliers consacrés aux marges transformantes ont été organisés depuis 2013 en France et à l'étranger ; certains devraient aboutir à la publication d'articles et d'ouvrages de synthèse. Peut-être assiste-t-on à un renouveau du concept ? Espérons que de nouvelles études régionales et systématiques en découleront et que rapidement le modeste modèle de base, proposé voici presque trente ans, deviendra obsolète.

Références

BASILE, C. (1990). Analyse structurale et modélisation analogique d'une marge transformante : l'exemple de la marge profonde de Côte d'Ivoire-Ghana. Thèse Université de Rennes, Mém. Doc. CAESS Rennes, **39**.

BASILE, C., BRUN J.-P., MASCLE J. (1992). Structure et formation de la marge transformante de Côte d'Ivoire-Ghana: apports de la sismique réflexion et de la modélisation analogique. *Bulletin de la Société géologique de France,* **163**, (3), p. 207-216.

BASILE, C., MASCLE, J., POPOFF, M., BOUILLIN, J.-P., MASCLE, G. (1993). The Ivory Coast-Ghana transform margin: a marginal ridge structure from seismic data. *Tectonophysics,* **22**, p. 1-19.

BASILE, C., MASCLE, J., SAGE, F., PONTOISE, B., LAMARCHE, G. (1996). ODP 159 Pre-cruise surveys and Site surveys: a synthesis of marine geological and geophysical data on the Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin. *In* MASCLE, J., LOHMANN, G.P., CLIFT, P., *Proceedings of ODP, Initial Report* ***159****,* College Station, TX*, (Ocean Drilling Program),* p. 47-60.

BASILE, C., MASCLE, J., BENKHELIL, J**.** (1998). Geodynamic evolution of the Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin: an overview from ODP Leg 159 results. *In*: MASCLE, J., LOHMANN, P. AND CLIFT, P., *Proceedings of ODP, Initial Report* **159***, College Station, TX, (Ocean Drilling Program),* p. 101-112.

BERTRAND, H., VILLENEUVE, M., ROBERT, C., COUSIN, M., groupe EQUAMARGE (1989). Le volcanisme de la marge sud-guinéenne, implications pour l'ouverture de l'Atlantique Equatorial: résultats de la campagne Equamarge II. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris,* **309**, (II), p. 1703-1708.

BERTRAND, H., FÉRAUD, G., MASCLE, J. (1993). Alkaline volcano of Palaeocene age on the Southern Guinean Margin: Mapping, petrology, ^{40}Ar-^{39}Ar laser probe dating, and implications for the evolution of the Eastern Equatorial Atlantic. *Marine Geology,* **114**, p. 251-262.

BLAREZ, E. (1986). *La marge continentale de Côte d'Ivoire-Ghana: structure et évolution d'une marge transformante.* Thèse Université Paris VI, Paris, 188 p.

BLAREZ, E., MASCLE, J., AFFATON, P., ROBERT, C., HERBIN, J.-P., MASCLE, G. (1987). Géologie de la pente continentale ivoiro-ghanéenne: résultats de dragages de la campagne EQUAMARGE. *Bulletin de la Société géologique de France,* (8), **III**, p. 877-885.

BOILLOT, G. (2012). Des marges continentales atlantiques aux chaînes plissées: les recherches françaises entre 1967 et 2000, *Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie (COFRHIGEO),* (3), **XXVI**, p. 1-24.

BOUILLIN, J.-P., POUPEAU, G., LABRIN, E., BASILE, C., SABIL, N., MASCLE, J., MASCLE, G., GILLOT, F., RIOU, L. (1997). Fission track study heating and denudation of the marginal ridge of the Ivory Coast-Ghana transform margin. *Geo-Marine Letter,* **17**, p. 55-61.

CLIFT, P. D., LORENZO, J., CARTER, A., HURFORD, A. J., BOUILLIN, J.-P., ODP LEG 159 SCIENTIFIC PARTY (1997). Transform tectonics and thermal rejuvenation on the Côte

d'Ivoire-Ghana margin, West Africa. *Journal of the Geological Society of London*, **154**, p. 483-489.

COFFIN, M.-F., RABINOWITZ, P. (1987). Reconstruction of Madagascar and Africa: Evidence from the Davie Fracture Zone and Western Somali Basin. *Journal of Geophysical Research*, **92**, p. 9385-9406.

DELTEIL, J. R., VALERY, P., MONTADERT, L., FONDEUR, C., MASCLE, J., PATRIAT, P. (1974). Continental margin in the northern part of the Gulf of Guinea. *In* BURK, C.A. & DRAKE, C.L. (Eds): *The Geology of Continental Margins,* p. 197-312.

EXON, N.F., WHITE, T.S., MALONE, M., KENNETT, J.P., HILL, P.J. (2001). Petroleum potential of deep-water basins around Tasmania: insights from Ocean Drilling Program Leg 189. *In* HILL, K.C., BERNECKER, T. (Eds): *Eastern Australasian Basins Symposium, a refocused energy perspective for the future. Petroleum Exploration Society of Australia, Special Publication*, p. 49-60.

GENNESSEAUX, M., MASCLE, J. (2012). La naissance et le développement de la géologie marine à Villefranche-sur-Mer : des années 1950 au milieu des années 1980. *Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie (COFRHIGEO)*, (3), **XXVI**, p.193-233.

GUIRAUD, M., MASCLE, J., BENKHELIL, J., *et al.* (1997). Early Cretaceous deltaic sedimentary environment of the Côte d'Ivoire - Ghana Transform Margin as deduced from deep dives data. *Geo-Marine Letter*, **17**, p. 79-86.

HONNOREZ, J., MASCLE, J., TRICART, P., BASILE, C., VILLENEUVE, M., BERTRAND, H. (1991). Mapping of a segment of the Romanche fracture zone: a morphostructural analysis of a major transform fault of the Equatorial Atlantic. *Geology,* **19**, (8), p. 769-864.

HONNOREZ, J., VILLENEUVE, M., MASCLE, J. (1994). Old continent-derived meta-sedimentary rocks in the Equatorial Atlantic: an acoustic basement outcrop along the fossil trace of the Romanche transform fault at 6°30'W. *Marine Geology,* **117**, p. 237-251.

LAMARCHE G., BASILE C., MASCLE J., SAGE, F. (1997). The Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin: sedimentary and tectonic structure from MCS data. *Geo-Marine Letter*, **17**, (1), p. 62-69.

MARINHO, M., (1985). *Le plateau marginal de Guinée : transition entre Atlantique central et Atlantique equatorial.* Thèse Université Paris VI, Paris, 183 p.

MASCLE, J. (1975). *Géologie sous-marine du Golfe de Guinée.* Thèse Doctorat, Université Paris VI, 357 p.

MASCLE, J. (1976). Atlantic-type continental margins : Distinction of two basic structural types. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, **48**, p. 191-197.

MASCLE J., (1977). Le golfe de Guinée (Atlantique Sud) : un exemple d'évolution de marges atlantiques en cisaillement. *Mémoires de la Société géologique de France,* 55, **128**, 104 p.

MASCLE, J., BASILE, C. (1998). Le point sur les marges continentales transformantes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes,* **326**, p. 827-838.

MASCLE, J., BLAREZ, E. (1987). Evidence for transform margin evolution from the Ivory Coast-Ghana continental margin. *Nature,* **326**, p. 378-381.

MASCLE, J., équipe EQUANAUTE (1994). Les marges continentales transformantes ouest-africaines, Guinée, Côte d'Ivoire/Ghana: résultats d'une analyse "in situ" (campagne EquaNaute 1992), *Publication IFREMER,* **5**, 145 p.

MASCLE, J., ODP Leg 159 Scientific Party (1997). Development of a passive transform margin: preliminary results from ODP Leg 159 on the Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin. *Geo-Marine Letter,* **17**, p. 4 -11.

MASCLE, J., MARINHO, M., WANNESSON, J. (1986). The structure of the Guinean continental margin: implications for the connection between the central and South Atlantic Oceans. *Geologische Rundschau,* **75**, (1), p. 57-70.

MASCLE, J., BLAREZ, E., MARINHO, M. (1988). The shallow structure of the Guinea and Ivory Coast-Ghana transform margins: their bearing on the Equatorial Atlantic Mesozoic evolution. *Tectonophysics,* **155**, p. 193-209.

MASCLE, J., LOHMANN, G.P., CLIFT, P., équipe scientifique embarquée (1995). La marge transformante de Côte-d'Ivoire – Ghana: premiers résultats de la campagne ODP 159. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris,* **320**, (II a), p. 737-747.

MASCLE, J., LOHMANN, G. P., CLIFT, P. (Eds) (1996). *Proceedings of ODP Initial Report,* **159**, College Station, TX, (Ocean Drilling Program), 616 p.

MASCLE J., LOHMAN P., ODP Leg 159 Scientific Party (1996). ODP 159 principal results. *Proceedings of ODP, Initial Report* **159**, College Station, TX, (Ocean Drilling Program), p. 297-314

MASCLE, J., GUIRAUD, M., BENKHELIL, J., BASILE, C., BOUILLIN, J.-P., MASCLE, G., COUSIN, M., DURAND, M., DEJAX, J., MOULLADE, M. (1998). A geological field trip to a transform margin segment: results from a deep sea submersible survey across the Côte-d'Ivoire - Ghana Transform Margin. *Oceanologica Acta*, **21**, (1), p. 1-20.

MASCLE, J., LOHMANN, G.P., MOULLADE, M. (Eds). (1998). *Proceedings of ODP Scientific Results,* ***159,*** College Station, TX (Ocean Drilling Program), 645 p.

ROLLET, N., PFAHL, M., JONES, A., KENNARD, J., NICHOLSON, C., GROSJEAN, E., MANTLE, D., JORGENSEN, D., BERNARDEL, G., KEMPTON, R., LANGHI, L., ZHANG, Y., HALL, L., HACKNEY, R., JOHNSTON, S., BOREHAM, C., ROBERTSON, D., PETKOVIC, P., LECH, M. (2013). Northern Extension of Active Petroleum Systems in the Offshore Perth Basin, an Integrated Stratigraphic, Geochemical, Geomechanical and Seepage Study. *West Australian Basins Symposium 2013*, p. 1-35.

SAGE, F. (1994). *Structure crustale d'une marge transformante et du domaine océanique adjacent : exemple de la marge de Côte d'Ivoire-Ghana*. Thèse, Université Paris VI, Paris, 167 p.

SAGE, F., PONTOISE, B., MASCLE, J., BASILE, C. (1997). Structure of oceanic crust adjacent to a transform margin segment: example of the Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin. *Geo-Marine Letter,* vol. 17, p. 31-39.

SAGE, F., PONTOISE, B., MASCLE, J., BASILE, C., ARNOULD, L. (1997). Crustal structure and ocean-continent transition at marginal ridge: the Côte-d'Ivoire - Ghana Marginal Ridge. *Geo-Marine Letter*, **17**, p. 40-48.

SAGE, F., BASILE, C., MASCLE, J., PONTOISE, B., WHITMARSH, R. (2000). Crustal structure of the continent-ocean transition off the Côte-d'Ivoire - Ghana transform margin: implications for thermal exchanges across a paleo-transform boundary, *Geophysical International Journal*, **143**, p. 662-678.

SCRUTTON, R.A. (1979). Sheared passive continental margins. *Tectonophysics*, **59**, (1-4), p. 293-305.

STRAND, K. (1998). Sedimentary facies and sediment composition changes in response to tectonics of the Côte d'Ivoire-Ghana transform margin. *In* MASCLE, J., LOHMANN, G.P., MOULLADE, M. (Eds): *Proceedings ODP Scientific Results, 159*, College Station, TX (Ocean Drilling Program), p. 113-123.