UNIVERSITÉ DE PROVENCE
Laboratoire de Géologie des Systèmes Carbonatés
FRE - CNRS 2761
École Doctorale : Sciences de l'environnement

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Provence

Spécialité : Sédimentologie

par

Jâmes GARI

DÉVELOPPEMENTS EN GÉOLOGIE NUMÉRIQUE D'AFFLEUREMENT ET MODÉLISATION STRATIGRAPHIQUE 3D :

EXEMPLE DE LA MARGE CARBONATÉE DU BASSIN SUD-PROVENÇAL AU CRÉTACÉ SUPÉRIEUR (SE, FRANCE)

Directeur de Thèse : Jean BORGOMANO

THÈSE EN VUE D'ETRE SOUTENUE le 8 Février 2008 devant le Jury composé de :

Pr. Jean BORGOMANO - Université de Provence – Professeur, Directeur de Thèse.
Dr. Paule BORGOMANO - Bureau géologique de Provence - Géologue consultante, Invitée.
Pr. Marc FLOQUET - Université de Provence - Professeur, Examinateur.
Dr. Didier GRANJEON - Institut Français du Pétrole - Chef de Projet, Rapporteur.
Pr. Jean-Laurent MALLET - Institut National Polytechnique de Lorraine - Professeur émérite, Rapporteur.
Dr. Sergio NARDON - ENI - Chef de Projet, Examinateur.
Dr. Sophie VISEUR - Université de Provence – Ingénieur de Recherche, Examinatrice.

1. Contexte général et problématique scientifique

1.1. Contexte général

Les systèmes sédimentaires carbonatés ont un grand intérêt scientifique et industriel (Borgomano *et al.*, 2005) :

- ils ont enregistré une multitude de processus et de paramètres qui ont affecté les enveloppes externes de la Terre depuis le Précambrien ;
- ils constituent les plus grands réservoirs de carbone de ces enveloppes externes (75%) ;
- ils forment des aquifères importants notamment au niveau des réseaux karstiques ;
- ils renferment prés de 65% des réserves globales d'hydrocarbure dans leurs réseaux poreux et sont des objectifs majeurs de l'industrie pétrolière.

Ce dernier pourcentage correspond au volume de pétrole récupérable de manière économique avec les moyens technologiques actuels (environ mille milliards de barils). A l'inverse des réservoirs gréseux, les réservoirs carbonatés sont caractérisés par de faibles taux de récupération (15% en moyenne). Ils renferment donc des volumes importants d'hydrocarbure non exploités en raison de leur complexité et de leur hétérogénéité dont la prédiction en subsurface est très incertaine (Pöppelreiter *et al.*, 2006). Une augmentation de quelques pourcents du taux d'extraction permettrait d'accéder à une plus grande quantité de réserves pétrolières.

Dans ce contexte, l'analyse des processus et des paramètres enregistrés par les systèmes sédimentaires carbonatés, ainsi que leur caractérisation, nécessite d'améliorer et de développer les méthodes de quantification et de modélisation de ces systèmes à toutes les échelles spatiales. Un des objectifs de ces développements est d'améliorer la représentation de la distribution spatiale en trois dimensions des faciès et des géométries sédimentaires qui contrôlent les propriétés pétrophysiques des réservoirs et la distribution des hydrocarbures (Borgomano *et al.*, 2001). Les modèles géologiques 3D de ces réservoirs sont conditionnés uniquement par des interprétations de puits, des images sismiques et des données de production des fluides (Ravenne, 2002). Les informations qualitatives sur le contexte, ainsi

que les tendances et les concepts géologiques régionaux sont généralement intégrés dans ces modèles. Ces données sont, le plus souvent, éparses, hétérogènes et imprécises rendant difficile la représentation de la complexité et de l'hétérogénéité des réservoirs carbonatés en 3D (Haldorsen & Damsleth, 1990). Une approche pouvant contribuer à améliorer la caractérisation des systèmes carbonatés est d'analyser des dépôts d'analogues exposés à l'affleurement (Grammer *et al.*, 2004). De nombreuses études d'analogues d'affleurements ont été entreprises d'un point de vue qualitatif et quantitatif (Eisenberg *et al.*, 1994 ; Grant *et al.*, 1994 ; Kerans *et al.*, 1994 ; Tinker, 1996 ; Borgomano *et al.*, 2002 ; Bassant *et al.*, 2004 ; Osleger *et al.*, 2004 ; Sivils, 2004 ; Pranter *et al.*, 2005). L'enjeu majeur de cette approche, dans le contexte de la caractérisation des réservoirs pétroliers, est de modéliser en 3D les objets géologiques exposés à l'affleurement (Pringle *et al.*, 2006). La nature complexe des systèmes carbonatés est telle que les représentations 2D traditionnellement obtenues par les études d'affleurements sous la forme de cartes, de coupes et de logs ne sont pas suffisantes pour répondre à cet enjeu. La construction de modèle numérique 3D d'affleurement est réalisable à l'aide de systèmes informatiques spécifiques (géomodeleurs) capables de générer et de gérer des données diverses et hétérogènes. Ces géomodeleurs ont été développés dans le contexte pétrolier et ne sont pas destinés *a priori* aux études d'affleurements. Ce travail se place donc dans la double perspective de (1) réaliser des modèles géologiques 3D à partir de données d'affleurements et (2) d'améliorer et de tester les méthodes de modélisation numérique 3D appliquées aux réservoirs carbonatés.

1.2. Modélisation géologique : définition

Un modèle géologique est une représentation théorique du fonctionnement d'un système d'éléments et de leurs relations plus ou moins complexes. C'est un dispositif intellectuel qui permet de mieux le comprendre (Lehr, 1990). Un modèle ne représente donc pas nécessairement la réalité mais une conception ou une perception de la réalité (Anderson & Crerar, 1993 ; Koltermann & Gorelick, 1996). A chaque cas d'étude, le géologue doit définir la nature des enjeux en fonction de l'application du modèle et des échelles de temps et d'espace. Par exemple, si notre objectif est la prédiction de la distribution des sables bioclastiques au sein d'un complexe récifal, il n'est pas requis de modéliser le mouvement de chaque grain individuellement. Le modèle de la production et du déplacement en masse des sables bioclastiques en fonction des conditions écologiques et hydrodynamique est suffisant.

Il existe deux types de modèles : les modèles conceptuels et les modèles quantitatifs. Les modèles conceptuels sont traduits par des graphiques et des termes, tandis que les modèles quantitatifs sont représentés par des équations qui permettent de modéliser des processus ou des objets géologiques ainsi que leurs propriétés. Les modèles quantitatifs sont de nature déterministe ou de nature probabiliste (stochastique).

La modélisation géologique correspond à l'ensemble des méthodes mathématiques qui permettent de représenter de façon unifiée la géométrie et les propriétés physiques des objets géologiques, tout en considérant les données de toutes sortes rattachées à ces objets (Mallet, 2002). Dans ce travail, la modélisation de systèmes sédimentaires carbonatés s'est appuyée sur deux approches complémentaires mais indépendantes :

1. la modélisation numérique 3D (XYZ) haute résolution d'objets géologiques carbonatés à partir de données de surface et du sous-sol (superficiel à peu profond). Il s'agit de la modélisation des structures géologiques à partir de maillages 3D des surfaces (horizons stratigraphiques et failles) et des propriétés critiques (faciès, porosité ou perméabilité). La distribution des propriétés peut-être envisagée suivant deux procédures. La première consiste à réaliser un modèle unique de manière déterministe à l'aide de méthodes d'interpolation. La seconde de nature stochastique implique la réalisation de plusieurs modèles équiprobables et représentatifs de l'objet géologique à partir de méthodes de simulations géostatistiques (simulations « basées-objet » ou «basées-pixel » ; Journel *et al.*, 1998). Ce denier type permet de distribuer les valeurs d'une propriété sur l'ensemble du domaine à partir uniquement de quelques données éparses. Au contraire, la première approche requiert l'utilisation d'un échantillonnage important ;
2. la modélisation numérique 4D (XYZ et le temps) des processus primaires qui contrôlent la formation des objets carbonatés. On parle de modélisation basée-processus (*forward modelling* ou *process-imitating sensu* Koltermann & Gorelick, 1996). En Sciences de la Terre, l'expérimentation directe n'est pas possible car les dimensions (temps et espace) des processus géologiques dépassent nos capacités d'observations et de mesures. Par contre, les effets et les résultats de ces processus (les objets géologiques) sont observables et mesurables en surface et en subsurface. L'approche consiste à créer des modèles numériques issus de simulations basées-processus et de les comparer à la réalité conceptuelle ou numérique des objets géologiques. Il est donc indispensable de réaliser *a priori* des modèles conceptuels ou

numériques exactes des objets et des systèmes géologiques. L'essentiel des méthodes proposées repose sur une approche déterministe (Watney *et al.*, 1999). Seules quelques méthodes utilisent un contexte probabilistes (Burgess & Wright, 2001, 2003). Pour rendre compte des spécificités de la sédimentation carbonatée plusieurs modèles ont été mis en place notamment en utilisant des équations différentielles (Granjeon & Joseph, 1999) ou des éléments de logique floue (Nordlund, 1996, 1999a, 1999b).

1.3. Problématique scientifique

La problématique scientifique de cette Thèse peut-être ainsi résumée :
Comment améliorer la caractérisation et la compréhension des réservoirs carbonatés en modélisant leurs architectures géologiques et leurs propriétés en trois dimensions d'après des données d'affleurement ?

Pour répondre à cette question, il a été mentionné précédemment que l'une des réponses se trouvait dans l'analyse en 3D de systèmes sédimentaires carbonatés exposés à l'affleurement. Ce travail nécessite obligatoirement une approche multidisciplinaire fondée sur (1) la détection des propriétés critiques à toutes les échelles spatiales ; (2) une meilleure compréhension de la formation et de la distribution spatiales de ces propriétés à l'aide d'analyses sédimentologiques et de l'utilisation de méthodes géostatistiques ; et (3) la réalisation d'outils numériques de modélisation tridimensionnelle pour pouvoir construire des modèles d'analogues unifiés de manière simple et efficace.

2. Choix des données d'affleurement

Les affleurements représentent l'intersection du volume des objets géologiques avec la surface topographique actuelle. Ainsi, les données géologiques d'affleurement sont généralement restreintes ou discontinues et n'offrent qu'une image en deux dimensions des structures stratigraphiques et sédimentaires. Ces données ne permettent pas une caractérisation immédiate en trois dimensions de l'hétérogénéité complexe des systèmes carbonatés qui résultent de la multiplicité et de la diversité des processus génétiques des

carbonates (biologiques, physiques et chimiques). Pour répondre à la problématique, il est évident que le choix des données s'est porté sur un objet typique des systèmes carbonatés présentant le maximum de continuité spatiale en surface et subsurface. Il a été choisi les séries sédimentaires de plate-forme et de bassin de la marge carbonatée du Bassin Sud-Provençal (MCBSP) pour la période comprise entre le Cénomanien et le Coniacien inférieur. Les principaux affleurements de ces séries se situent dans le synclinal du Beausset localisé dans le Sud-Est de la France en Basse Provence (**figure i-1**).

Le terme synclinal correspond à l'objet tel qu'il est préservé à l'affleurement. Le terme de marge désigne l'entité sédimentaire au Crétacé supérieur. Ce dernier a été utilisé pour désigner la zone de transition entre les dépôts d'environnement peu profond (plate-forme) et les dépôts d'environnement plus profond (pente et bassin) *sensu* Borgomano (1987). Ce terme réunit les caractères physiographiques, sédimentologiques, structuraux et environnementaux qui sont associés au passage plate-forme/bassin. Deux types de marges carbonatées ont été distinguées pour l'intervalle stratigraphique considéré (Bouchard, 1986 ; Jolet, 1996 ; Hennuy, 2003 ; Floquet *et al.,* 2005, 2006) : (1) une plate-forme à escarpement bordier (*rimmed shelf with escarpment sensu* Read, 1985) et (2) une rampe s'approfondissant distalement (*distally steepened ramp sensu* Read, 1985).

La MCBSP constitue un laboratoire d'étude complet et exceptionnel par :

- la continuité spatiale des affleurements en trois dimensions et sa grande hétérogénéité spatiale à l'échelle du réservoir dans un secteur géographique restreint (dimension de la zone étudiée : XYZ = 10 km x 10 km x 0,8 km). Il est rare de retrouver dans les séries sédimentaires toutes les composantes depuis leurs pôles proximaux jusqu'à leurs pôles distaux (plate-forme/bassin ; bassin/delta). Les séries de la MCBSP ont justement le grand intérêt de contenir tous ces dépôts, à la fois carbonatés et silicoclastiques, préservés avec une extension complète des environnements de dépôts (plate-forme, pente, bassin et delta) et des lithologies diverses (roches carbonatées, argileuses et silicoclastiques) ;
- la présence d'évolutions spatiales de dépôts graduelles et abruptes ;
- le calage biostratigraphique précis fourni par de précédentes études (ammonites, rudistes, inocérames, foraminifères, ostracodes ; cf. Ch. I) ;
- la précision du découpage séquentiel notamment en domaine de plate-forme et les corrélations à haute résolution qui en découlent d'après les travaux antérieurs (cf. Ch. I) ;

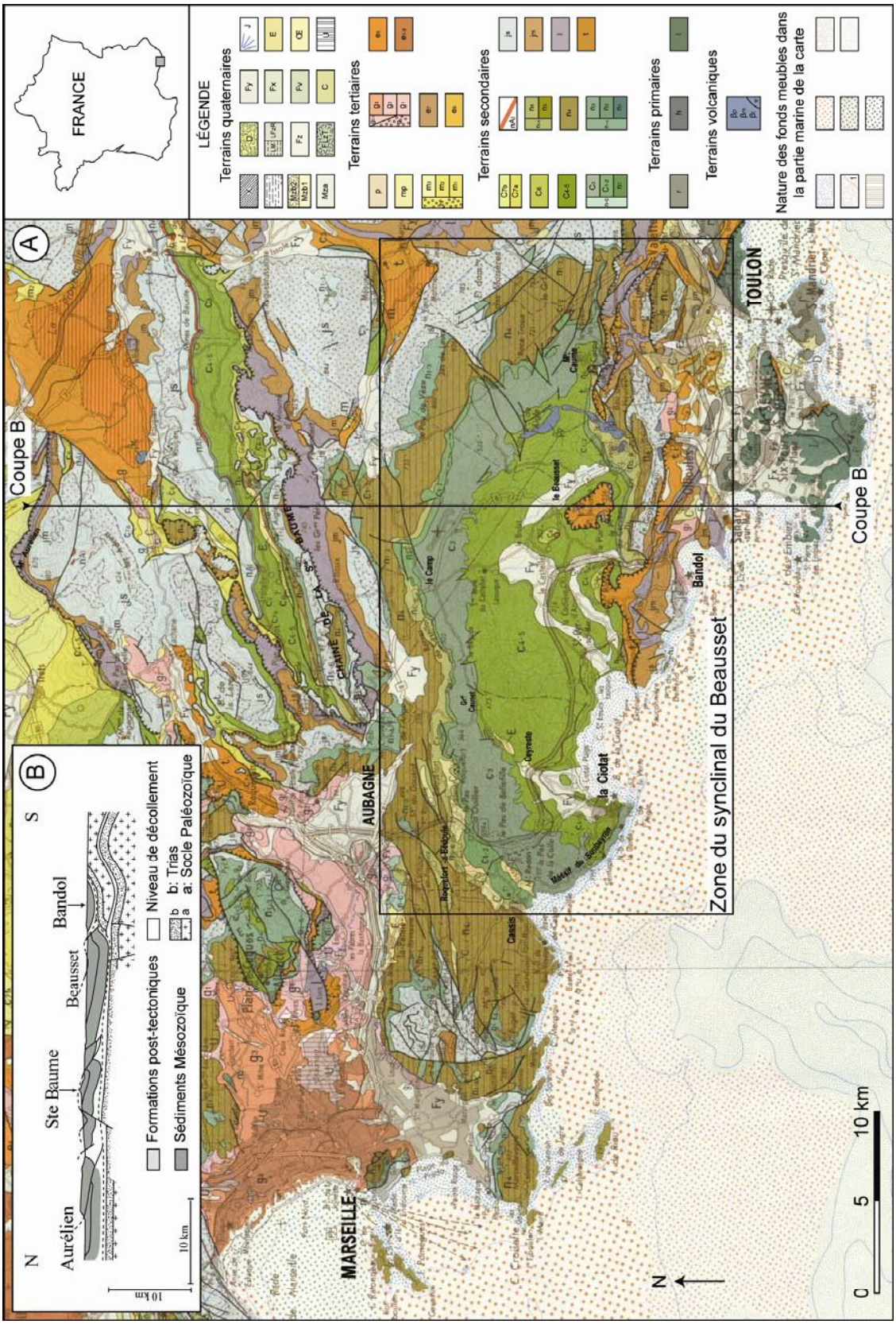

Figure i-1. *(**A**) Localisation du synclinal du Beausset sur la carte géologique de Marseille (carte géologique du BRGM au 1/250000). Légende pour les terrains d'âge Crétacé supérieur : C_{1-2} - Cénomanien : grès, marnes, calcaires à rudistes ; C_3 - Turonien : marnes, grès, calcaires marneux, calcaires à rudistes ; C_{4-5} - Coniacien-Santonien : grès, marnes gréseuses, calcaires à rudistes ; C_6 - Campanien : calcaires, argiles, lignites ; C_{7a} / C_{7b} - Maastrichtien : calcaires, argiles, grès, poudingues, brèches. (**B**) Coupe structurale de la Basse-Provence d'après Tempier (1987).*

- le contrôle des volumes et des enveloppes sédimentaires mis en évidence par les interprétations des études précédentes (cf. Ch. I) ;
- l'analogie des terrains avec des réservoirs carbonatés d'hydrocarbure tel que le Groupe Wasia de la Péninsule Arabique (Burchette, 1993 ; Van Buchen *et al.*, 1996).

3. Objectifs et méthodes

Il s'agit d'un travail méthodologique permettant de tester et de développer (1) des logiciels de modélisation et (2) des outils d'acquisition et de traitement de données numériques. Le but est également d'améliorer la compréhension des systèmes sédimentaires carbonatés en tant qu'enregistreurs de paramètres biologiques, de paramètres physiques globaux (exemple : eustatisme, climat) et/ou régionaux (exemple : tectonique, courants), et en tant que produits de processus géologiques à des échelles temporelles variables. Cette procédure nécessite l'interprétation géologique des affleurements dans leur domaine en trois dimensions afin d'établir les volumes sédimentaires réalistes (architecture stratigraphique 3D) mais aussi les paléo-profils sédimentaires.

La démarche principale a consisté à établir des modèles numériques tridimensionnels imbriqués ou « gigognes », à différentes échelles et résolutions afin de reproduire (1) l'agencement stratigraphique (géométrie des corps sédimentaires) (**figure i-2**) et (2) l'hétérogénéité faciologique. Pour construire des modèles réalistes, deux approches ont été développées en parallèle et de manière itérative : (1) l'acquisition de données numériques de terrain et de subsurface et (2) la modélisation géologique numérique 3D.

La première approche comprend l'acquisition à différentes échelles de données par mesures directes à partir d'une gamme d'outils tel que l'imagerie micro et macroscopique, le scanner laser, la sismique réflexion très haute résolution (THR), des forages ainsi que la cartographie stratigraphique et structurale haute résolution. Un des plus grands défis scientifiques est de formaliser l'intégration, dans un cadre géoréférencé, de données numériques mesurées et de données qualitatives naturalistes (tendances et attributs ponctuels) afin de calibrer les modèles numériques tridimensionnels (**figure i-3**). Cette approche est une nouveauté scientifique dans le domaine de l'étude des systèmes carbonatés et des

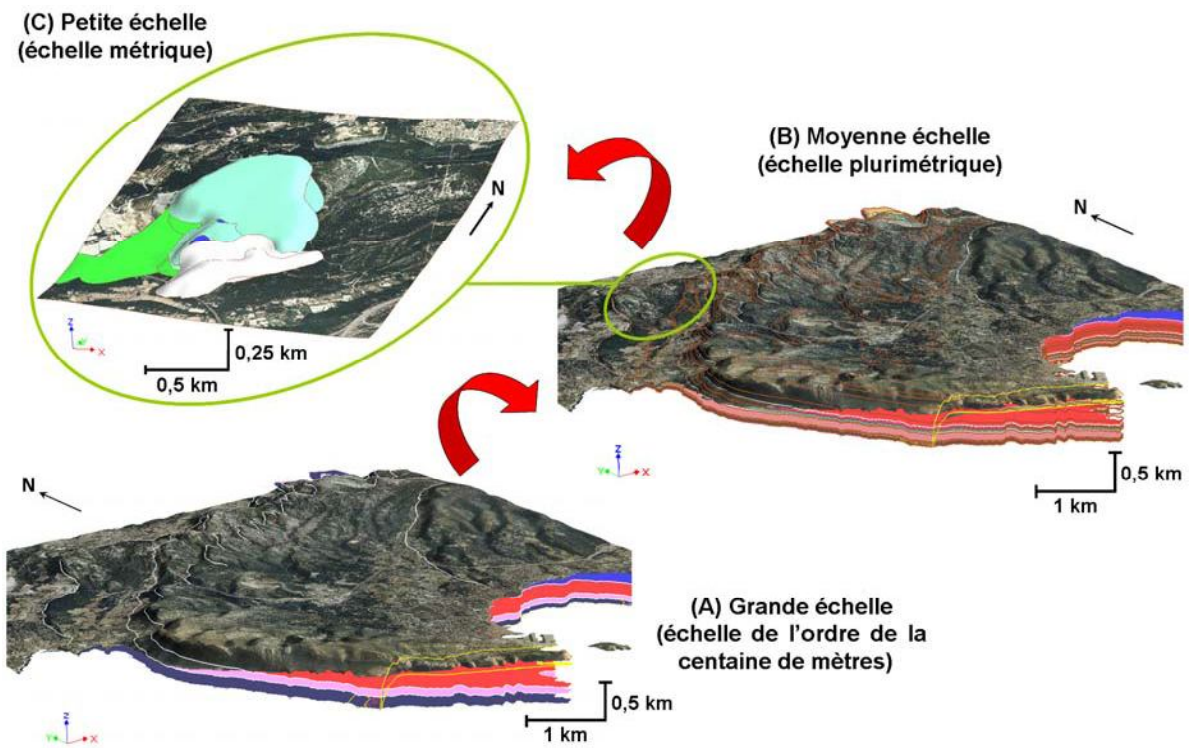

***Figure i-2**. Modèles numériques gigognes permettant de décomposer le modèle en différents objets de tailles décroissantes qui s'emboîtent les uns dans les autres.*

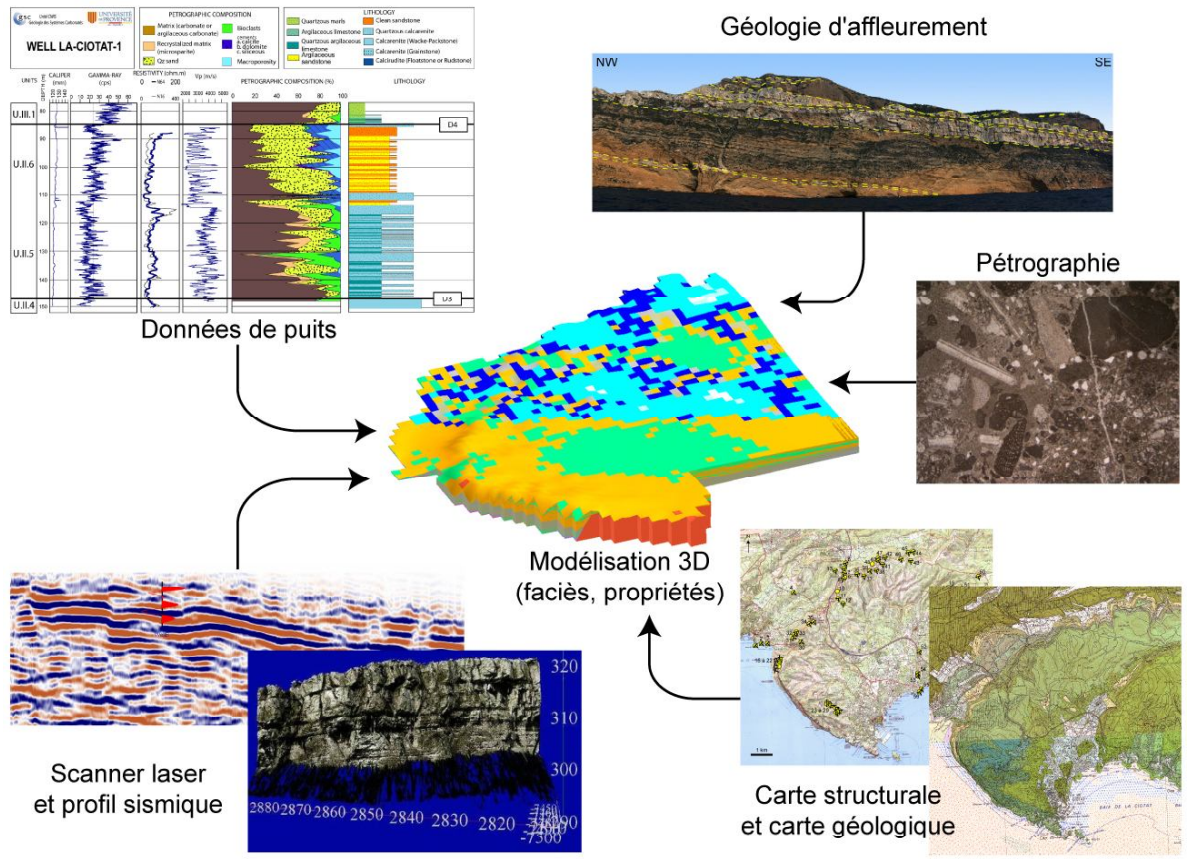

***Figure i-3.** Modèle numérique tridimensionnel de systèmes sédimentaires carbonatés établi à partir de l'intégration de données de surface et de subsurface. La carte géologique correspond à l'assemblage de la carte Aubagne-Marseille et de La Ciotat au 1/50000 (cartes géologiques du BRGM).*

affleurements géologiques en général. Elle nécessite de tester les approches déterministes et stochastiques ainsi que l'intégration de mesures à des résolutions et des échelles variées afin d'établir la distribution de propriétés à l'échelle du réservoir (entre les puits).

La deuxième approche de travail nécessite la mise en place d'un protocole de modélisation numérique stratigraphique 3D en s'appuyant sur le géomodeleur g*O*cad (*geological Object computer aided design*). Celui-ci a été choisi pour des raisons spécifiques liées aux besoins de la modélisation géologique :

- il présente le grand avantage de pouvoir réaliser informatiquement, dans un même logiciel, toutes les étapes nécessaires à la caractérisation d'un objet géologique en 3D depuis les données d'affleurement recueillies jusqu'aux simulations d'écoulement de fluides en passant par les modèles surfaciques, volumiques et de propriétés. Il est de ce fait un standard dans l'industrie pétrolière ;
- il permet d'importer des données géologiques très diverses (géophysiques, puits, données structurales ou cartes) et de formats très variés ;
- il offre la possibilité d'utiliser de nombreux outils intégrés dans le logiciel qui facilitent la création d'objets géologiques 3D, mais autorise aussi de développer des outils supplémentaires (modules) adaptés à notre jeu de données ou nos objectifs scientifiques ;
- il permet de modifier les modèles établis en fonction de nouvelles données acquises tout en préservant leurs cohérences.

Ultimement, l'objectif de ce travail est de tester des méthodes de modélisation basée-processus, à l'aide de logiciels tel que DIONISOS (Granjeon & Joseph, 1999), afin de générer des modèles de formations sédimentaires carbonatées de la MCBSP. Cette approche contribuera à identifier et quantifier le rôle respectif des facteurs de contrôle ayant présidé à la formation des dépôts et de comprendre les mécanismes selon lesquels ils agissent.

4. Organisation de la Thèse

Cette Thèse s'organise de la façon suivante (**figure i-4**) :

1. la première partie présente une synthèse stratigraphique régionale. Elle récapitule les résultats et les modèles sédimentaires des travaux antérieurs, et comprend aussi une

synthèse lithostratigraphique dans laquelle est proposé le découpage stratigraphique utilisé dans la modélisation.

2. la deuxième partie est consacrée à une description des données et des méthodes d'intégration des données.

3. la troisième partie traite de la construction des structures géologiques en trois dimensions (surfaces et volumes).

4. la quatrième partie comprend une synthèse des analyses faciologiques à partir des précédents travaux et la réalisation de modèles 3D des faciès à partir de différentes méthodes déterministes ou stochastiques.

5. la cinquième partie traite de la modélisation numérique basée-processus (*forward modelling*).

Cette organisation suit approximativement un protocole itératif de modélisation numérique 3D d'un réservoir pétrolier.

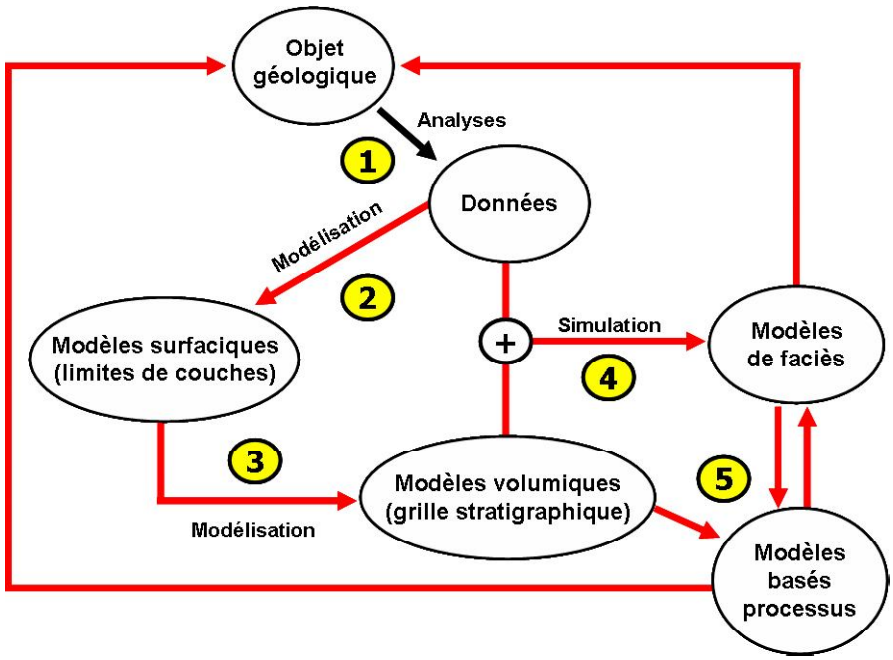

Figure i-4. *Approche méthodologique de l'étude. Protocole de modélisation réservoir utilisé dans le cadre de cette étude afin de reproduire l'objet géologique. Les principales opérations sont : (1) le traitement des données acquises ; (2) l'intégration des données pour construire des modèles surfaciques constitués d'interfaces géologiques ; (3) la construction de modèles volumiques à partir des interfaces sous forme d'une grille ; (4) le calcul d'attributs sur les grilles (faciès) avec la possibilité de réaliser des calculs volumiques ; (5) la construction de modèles sédimentaires reproduisant numériquement les phénomènes qui l'ont engendré.*

Les affleurements numérisés (**figure II-11**) sont localisés dans la zone de transition entre la plate-forme et le bassin afin d'imager en 3D l'organisation spatiale des corps sédimentaires au niveau de cette zone clef. Toutes les photographies numériques et les saisies laser acquises sont reportées en **annexe 3**.

Les caractéristiques de l'appareil utilisé sont :

- un rayon d'action maximum de 1000 mètres. Au-delà la réflectivité est trop faible ;
- un champ de vision de 40° × 40° ;
- un taux d'échantillonnage d'environ 2000 points par seconde ;
- une précision centimétrique ;
- un espacement minimum entre les points de 2,6 mm à 100 mètres.

Il est également possible d'utiliser cette technique à l'aide d'un hélicoptère. L'affleurement est ainsi numérisé de manière continue. Cette approche est aussi coûteuse, la précision est plus faible (5 cm en moyenne), l'espacement entre les points est plus grand (1 point/dm en moyenne) mais réalisée en seulement quelques heures (Richet *et al.*, 2007). En revanche, le drapage des photographies est très complexe. Cette méthode va être employée prochainement pour scanner les falaises Soubeyranes.

II.2.5. Sismique réflexion haute résolution

La zone d'étude a été couverte par 2 lignes sismiques (ligne 2 et 3) représentant une longueur cumulée d'environ 10 km (**figure II-13**), dont j'ai été en charge du positionnement et du suivi de l'acquisition. La ligne 2 a été subdivisée en cinq profils sismiques en raison des conditions de terrain rendant l'accès difficile (pente raide, escarpement ou végétation importante) et l'intersection avec l'autoroute (**figure II-13**) :

- ligne 2a, orienté N-S puis N25° ; elle mesure environ 1,1 km.
- ligne 2b, orienté N-S puis N40° ; elle mesure environ 1,7 km. Le forage La Ciotat 1 est localisé sur cette ligne.
- ligne 2c, orienté N-S ; elle mesure environ 1 km.
- ligne 2cN, orienté E-O ; elle mesure approximativement 700 m.
- ligne 2d, orienté N-S, elle mesure environ 4 km.

Le transect couplant la ligne 2a, 2b, 2c et 2d (**figure II-13**) est orienté suivant la direction plate-forme/bassin pour illustrer idéalement les géométries et les changements de faciès entre le domaine proximal et distal.

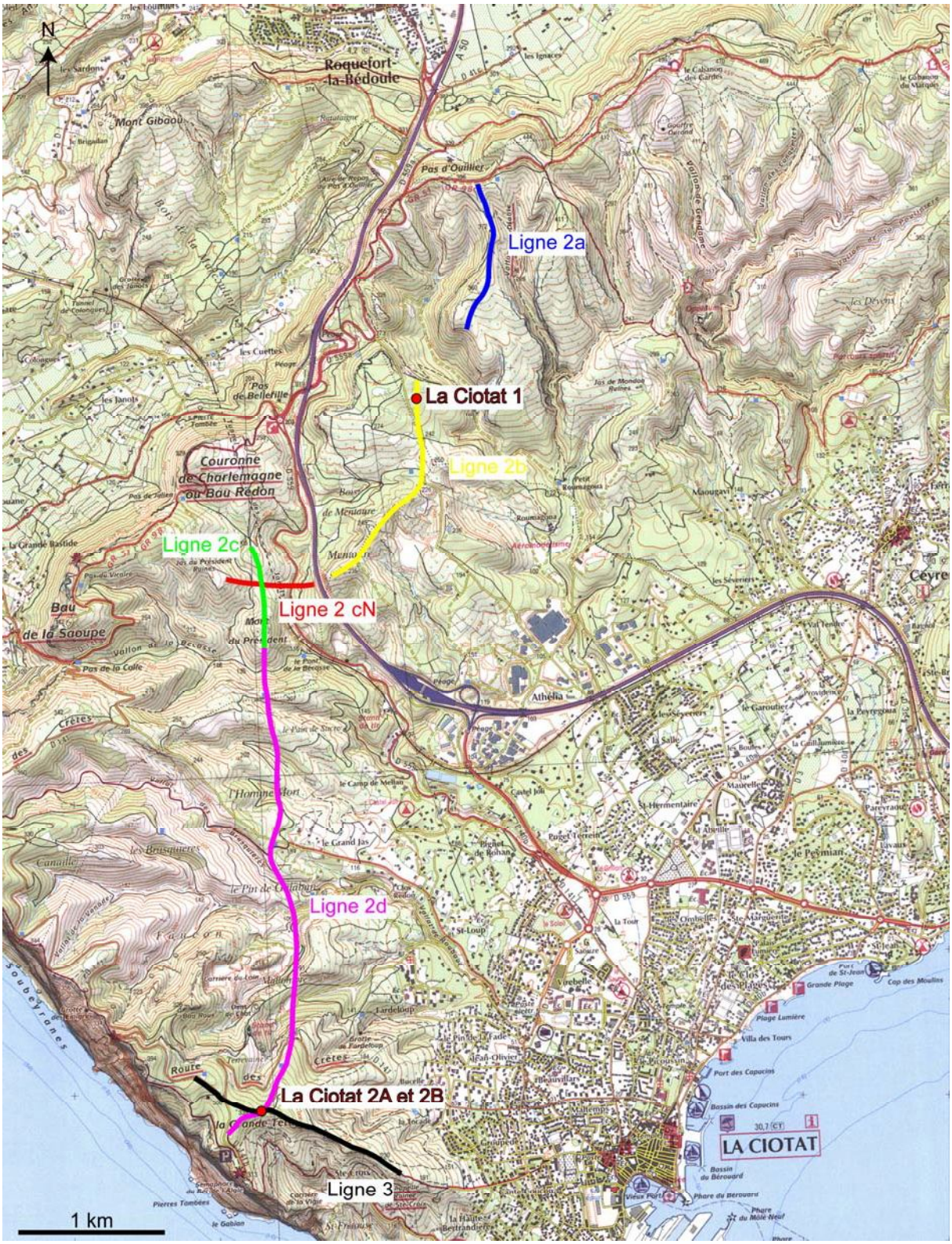

Figure II-13. *Carte de localisation des lignes sismiques et des forages.*

La ligne 3 d'environ 1,7 km de long est orientée N120°. Elle est plus ou moins parallèle à l'orientation des falaises Soubeyranes (équivalent de la **figure I-8**). Elle recoupe la ligne 2d où ont été implantés les forages La Ciotat 2A et 2B. Elle est orientée pour imager le contact entre les dépôts de bassin et l'édifice deltaïque.

La campagne d'acquisition a été menée par la société EOSYS d'Avril à Juin 2005 et a permis d'obtenir des données sismiques réflexions très haute résolution (THR). Le dispositif d'acquisition est représenté sur les **figures II-14A** et **II-14B**. Les profils sismiques ont été acquis en utilisant une source vibro-acoustique (**figure II-14C**) et de la dynamite. La dynamite a été uniquement employée pour la ligne 3 et une partie de la ligne 2d (sur 1,4 km ;

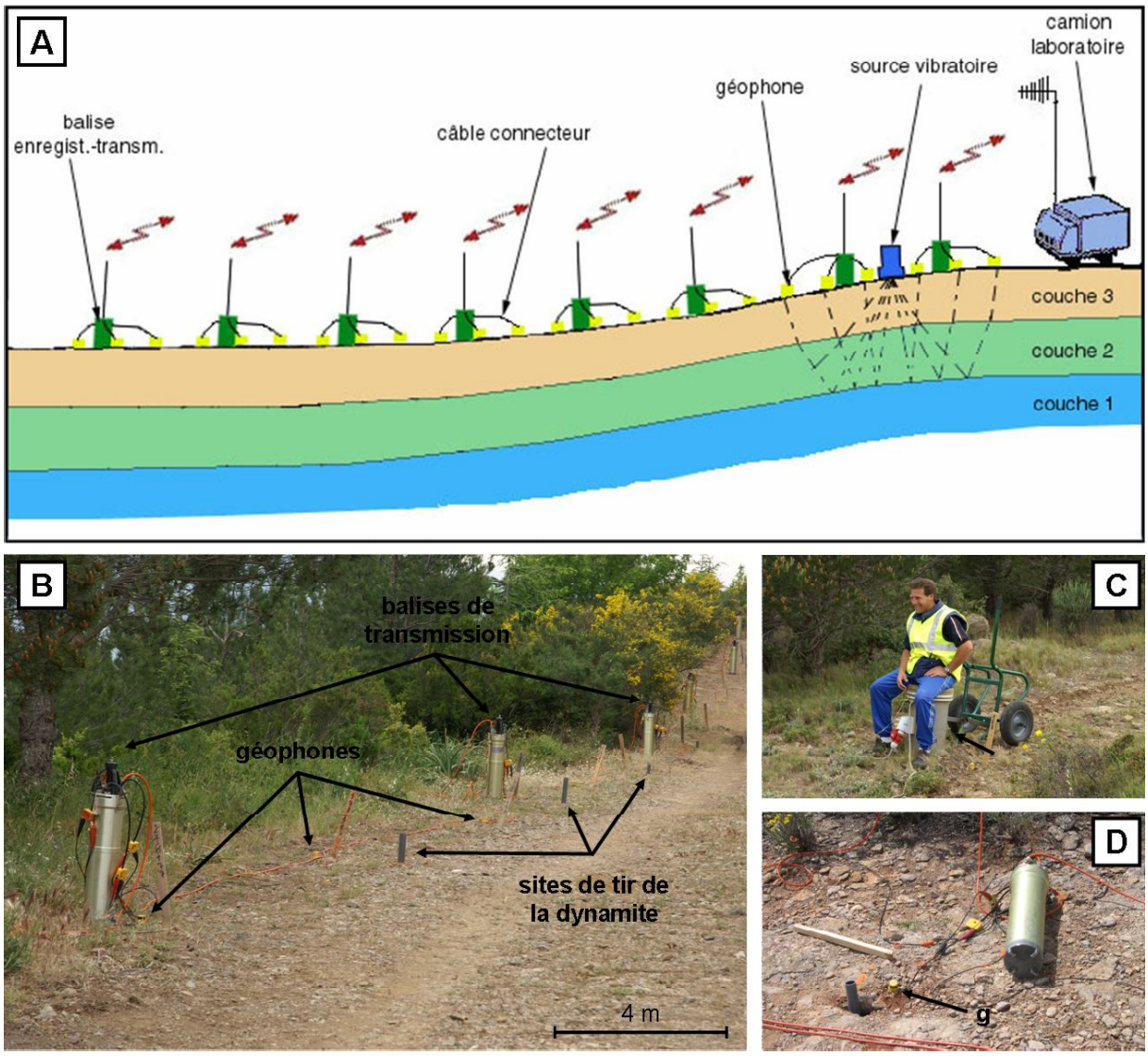

Figure II-14. *(**A**) Représentation schématique de la méthode d'acquisition (document d'EOSYS). (**B**) Dispositif d'acquisition mis en place sur le terrain. (**C**) Source vibro-acoustique. (**D**) Capteur (g : géophone) et balise de transmission.*

partie la plus au Sud). Les distances inter-traces sont de 4 mètres et l'acquisition a été réalisée avec un tir tous les 8 mètres (**figure II-14B**). Les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 150 Hz pour la source vibro-acoustique et 15 Hz à 180 Hz pour la dynamite, ce qui correspond, pour une vitesse voisine de 3000 m/s, à une résolution verticale comprise entre 5 et 37 mètres.

Les données générées par les points d'émission sont captées par les géophones (**figure II-14D**) et enregistrées dans le camion laboratoire (**figure II-14A**). Les images sismiques obtenues à partir des premières phases de traitement permettent d'avoir un aperçu de la géologie de subsurface sur une profondeur d'environ 600 mètres pour des fréquences comprises entre 20 Hz et 60 Hz (**figure II-15**).

Les séquences de traitement des données d'acquisition au canon vibro-acoustiques et à la dynamite comprennent :

- un traitement sur les collections de points de tir : (1) des corrections statiques pour éliminer le signal lié à la zone altérée de surface et aux effets topographiques ; (2) des déconvolutions pour éliminer les effets de la source ; (3) un traitement additionnel pour éliminer les ondes de réfractions ; (4) un contrôle du gain pour normaliser les amplitudes ;

- un traitement sur les collections de points milieux : (1) une analyse des vitesses ; (2) un *Normal Move Out* (NMO) pour verticaliser les hyperboles de réflexion ; (3) une sommation pour éliminer le bruit ; (4) des corrections statiques ; (5) une élimination des ondes linéaires réfractées en utilisant deux vitesses d'ondes : 1800 ms et 6000 ms ; (6) un filtrage des fréquences par une bande passante de 20-150 Hz ; (7) un contrôle du gain.

Remarque : La ligne 1 positionnée au Nord, perpendiculaire à la ligne 2 et parallèle à l'escarpement depuis le lieu dit le Cabanon des Gardes jusqu'au Bois de la Marcouline n'as pas été retenue lors de l'acquisition sismique pour des raisons budgétaires (**figure II-13**).

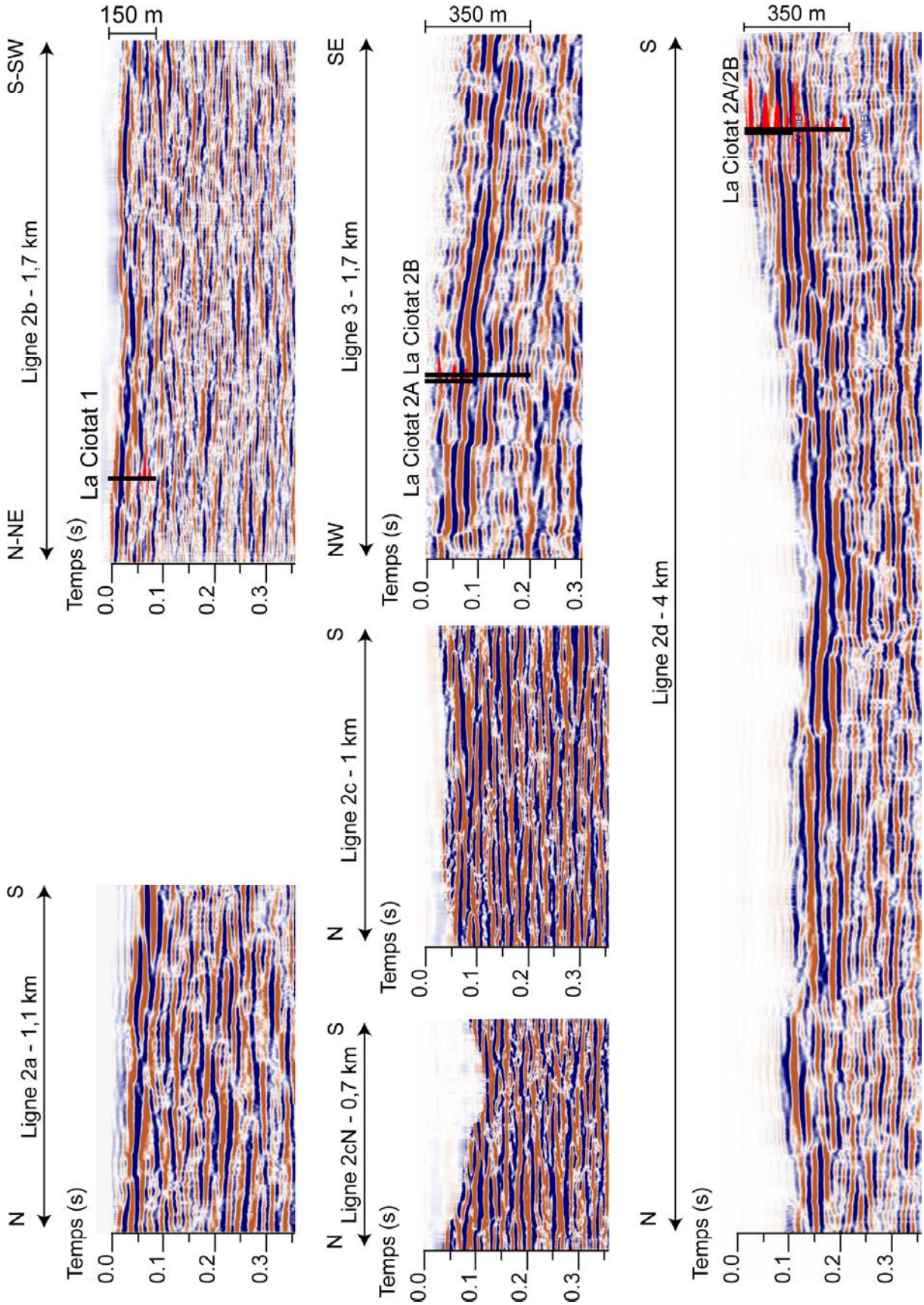

Figure II-15. *Profils 2D des lignes sismiques 2a, 2b, 2cN, 2c, 2d et 3.*