

Document public



Caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères carbonatés karstiques sous couverture

Méthodologie, Synthèse bibliographique et synthèse géologique régionale

Rapport final

BRGM/RP-56980-FR

Décembre 2008



3 5000 00058648 6





Caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères carbonatés karstiques sous couverture

Rapport final

BRGM/RP-56980-FR
Décembre 2008

Étude réalisée dans le cadre de la convention de recherche
AERMC- BRGM

N. Dörfliger, P. Fleury, P. Le Strat, L. Capar

Vérificateur :

Nom : Coueffé Renaud

Date : 27 mai 2009

Approbateur :

Nom : Pennequin Didier

Date : 12 juin 2009

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Karst, hydrogéologie, géologie, aquifères carbonatés sous couverture, profils sismiques, Languedoc-Roussillon

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Dörfliger N., Fleury P., Le Strat P., Capar L. (2008). - Caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères carbonatés karstiques sous couverture. Méthodologie, synthèse bibliographique et synthèse géologique régionale. Rapport final BRGM-RP-56980-FR, 90 ill., 3 ann., 157 pp

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les aquifères karstiques sous couverture représentent des aquifères potentiellement intéressants à caractériser et à évaluer les potentialités, afin de faire face aux besoins en eaux des décennies à venir sur le pourtour méditerranéen. A l'heure actuelle, du fait de la nécessité de réaliser des forages profonds et à cause du risque d'échec, ces ensembles sont peu exploités. Des recherches concernant le potentiel hydrogéologique de ces formations sont nécessaires et participent d'une part à l'amélioration de la connaissance et à la compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques et d'autre part à des développements méthodologiques. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre de la convention de recherche BRGM – Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse.

La synthèse bibliographique effectuée concernant l'étude des aquifères karstiques profonds sous couverture a montré qu'aucune méthode spécifique n'a été développée à ce jour par les hydrogéologues, en considérant les périodes favorables au sein de l'échelle géologique à la karstification, la définition des géométries et l'identification d'objets sismiques intéressants à partir de l'interprétation des profils sismiques. En revanche, l'interprétation de profils sismiques haute résolution et la réalisation de nombreux forages verticaux et obliques sont utilisées uniquement dans le cadre de la caractérisation de réservoirs pétroliers ; dans ce cadre, des paléokarsts ont été étudiés en détail, avec la mise en évidence de paléodolines avec remplissage.

Des profils sismiques pétroliers réalisés dans les années 1980 par les compagnies pétrolières ont été retraités par le BRGM, totalisant quelques 350km et concernant trois zones en Languedoc Roussillon ((Vallée de l'Hérault, Lez – Nord de Montpellier et Gardonnenque), dans le but de caractériser les aquifères karstiques profonds sous couverture est ainsi une première. Le retraitement de ces profils a permis d'améliorer l'identification des réflecteurs associés aux formations carbonatées et au remplissage sédimentaire tertiaire, ainsi que des principales failles de type listrique notamment. L'interprétation des profils sismiques en pointant les limites remplissage-formations carbonatées du Crétacé et/ou Jurassique a permis de dresser une carte de remplissage synrift au niveau de la vallée moyenne de l'Hérault, un des trois sites d'étude, pour lequel la densité de profils sismiques réinterprétés était suffisante et le calage à l'aide de forages présents.

L'interprétation géologique de neuf profils sismiques en identifiant des objets sismiques significatifs associés à des objets structuraux et des analogues de terrain d'un modèle gravitaire de mise en place de marges sur socle est une démarche originale. Les objets mis en évidence à l'affleurement sont des failles en fleurs, failles listriques, brèches sur roll-over, brèches associées aux failles listriques et brèches associées aux

diapirs de pieds de poussée gravitaire¹. Ces objets structuraux ont été reconnus sur le terrain, au niveau des gorges du Tarn, en Languedoc jusqu'à la plateforme continentale. Les brèches de manière générale peuvent être identifiées au niveau de zones dites sourdes présentes de manière structurée au niveau des profils, sans qu'elles aient pu être validées au niveau de forage. Certaines sont associées à des déformations de part et d'autre des réflecteurs. Pour d'autres, le pointage sismique n'est pas évident et nécessitera une validation ultérieure à l'aide d'investigations détaillées (géophysique et forage). Des zones de brèches associées à des failles en fleurs et des roll-overs sont présentes sur les parties septentrionales des profils d'orientation NO-SE. Des zones de brèches liées à des diapirs de pieds de poussée gravitaire sont quant à elles identifiées dans les parties plus distales de la marge, au niveau des parties méridionales des profils.

La confrontation des interprétations géologiques des profils sismiques effectuées à l'aide d'un modèle gravitaire de mise en place de la marge, avec les éléments issus de la synthèse géologique et paléogéographique du Sud-Est de la France et de la région languedocienne a permis de définir des zones cibles. Ces zones cibles concernent soit des têtes de blocs basculés des formations carbonatées, soit des zones de pieds de poussée gravitaire. Ces zones constituent des cibles pour implanter des forages de reconnaissance. L'implantation des forages de reconnaissance nécessitera des investigations complémentaires de type géophysique sur une surface restreinte de l'ordre du kilomètre. Ces investigations permettront d'imager de manière plus précise les objets structuraux à intercepter à l'aide d'un forage. Les profondeurs d'investigation restent importantes, comprises entre 400 et 800 m de manière générale sur la zone d'étude.

Cette méthodologie développée, formalisée et appliquée à la région du Languedoc est une méthodologie tout à fait transposable dans la région Sud-Est de la France, pour laquelle un modèle gravitaire de mise en place de la marge carbonatée sur marge de socle est vérifié à l'aide d'observations de terrains. Cette méthodologie doit être encore approfondie, en effectuant un travail approfondi sur les caractéristiques des objets sismiques identifiés pouvant se rattacher aux analogues de terrain (taille, forme, localisation stratigraphique, relation avec les failles, ...). La validation de la méthodologie devra passer dans une phase ultérieure par des investigations géophysiques détaillées de haute résolution et la réalisation de forages de reconnaissance. L'application de cette méthodologie dans un autre contexte devra passer par une synthèse détaillée de l'évolution géologique et géodynamique, afin de déterminer le modèle génétique permettant d'identifier les géométries des formations carbonatées sous couverture, ainsi que des reconnaissances de terrain.

¹ Les objets cités sont définis dans le rapport au paragraphe 4.4. du chapitre 4.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 15 |
| 1.1. ENJEUX DE LA RECHERCHE | 15 |
| 1.2. OBJECTIFS DU PROJET | 16 |
| 1.3. CONTENU DU RAPPORT | 17 |
| 2. Synthèse bibliographique concernant les aquifères karstiques profonds | 19 |
| 2.1. INTRODUCTION..... | 19 |
| 2.1.1. Rappel de quelques définitions concernant les mécanismes de la karstification | 19 |
| 2.1.2. Méthode de caractérisation des karsts sous couvertures par les pétroliers | 22 |
| 2.1.3. Méthode de caractérisation des karsts sous couverture et des karsts profonds par les hydrogéologues | 27 |
| 3. Synthèse régionale de l'histoire géologique du Sud-Est de la France et de la zone Languedocienne..... | 31 |
| 3.1. INTRODUCTION..... | 31 |
| 3.2. SECONDAIRE..... | 31 |
| 3.3. TERTIAIRE (-65 à -2 MA)..... | 50 |
| 3.4. QUATERNAIRE | 53 |
| 3.5. SYNTHÈSE..... | 53 |
| 4. Interprétation des profils sismiques..... | 61 |
| 4.1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE..... | 61 |
| 4.2. DONNEES UTILISEES ET CONSTITUTION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES..... | 61 |
| 4.2.1. La sismique réflexion disponible..... | 62 |
| Le retraitement sismique a consisté en : | 64 |
| 4.2.2. Les données géologiques disponibles | 65 |
| a) Constitution d'un SIG (cf annexe 1) | 65 |
| b) Forages pétroliers | 65 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. INTERPRETATION DES PROFILS SISMIQUES | 65 |
| 4.3.1. Pointé des horizons et des failles | 65 |
| a) Interprétation de la basse vallée de l'Hérault | 66 |
| b) Interprétation de la zone du Lez | 73 |
| c) Interprétation de la zone d'Uzès | 78 |
| 4.4. CARTOGRAPHIE DE LA BASE DU REMPLISSAGE SYNRIPT | 79 |
| 4.5. INTERPRETATION GEOLOGIQUE DES PROFILS SISMIQUES SELON LE MODELE GRAVITAIRE | 101 |
| 4.5.1. Introduction | 101 |
| 4.5.2. Secteur de la vallée moyenne de l'Hérault | 101 |
| 4.5.3. Secteur du Lez – Nord de Montpellier | 110 |
| 4.5.4. Secteur d'Uzès | 117 |
| 4.6. INTERPRETATION HYDROGEOLOGIQUE DES PROFILS SISMIQUES..... | 121 |
| 4.6.1. Zones cibles potentiellement karstiques de la basse vallée de l'Hérault | 122 |
| 4.6.2. Zones cibles potentiellement karstiques du bassin d'alimentation du Lez | 124 |
| 4.6.3. Zones cibles potentiellement karstiques de la zone d'Uzès | 125 |
| 5. Méthodologie géologique et hydrogéologique de caractérisation des aquifères karstiques sous couverture | 127 |
| 6. Conclusion et perspectives | 133 |
| 7. Principales références bibliographiques | 135 |
| Annexe 1 Constitution d'une base de données géoréférencées sur le Languedoc Roussillon..... | 141 |
| Annexe 2 Fiches des forages pétroliers..... | 147 |
| Annexe 3..... | 155 |
| Profils sismiques vierges et interprétés..... | 155 |

Liste des illustrations

| | |
|---|-----------|
| <i>Illustration 1 : Processus de karstification et développement des systèmes karstiques (Király, 1975 modifié)</i> | <i>20</i> |
| <i>Illustration 2 : Karst du Dévonien de Grosmont. (A) Localisation, (B) Reconstitution de l'histoire géologique, (C) Analyse des forages (Buschkuehle et al., 2007).</i> | <i>25</i> |
| <i>Illustration 3 : Karst de Rospomare. (A) Paléokarst voisin à l'affleurement, (B) Profil sismiques montrant la géométrie du toit du paléokarst, (C) Reconstitution de la position du toit du paléokarst, (D) Intreprétation des données sismiques et position du forage horizontal pour l'exploitation (Soudet et al., 1984).....</i> | <i>26</i> |
| <i>Illustration 4 : Schéma conceptuel de la méthodologie de caractérisation du développement de la karstification (Aunay et Le Strat, 2002)</i> | <i>29</i> |
| <i>Illustration 5 : Schéma structural du bassin mésozoïque du Sud-Est (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>31</i> |
| <i>Illustration 6 : Schéma de la série stratigraphique mésozoïque (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>32</i> |
| <i>Illustration 7 : Courbe eustatique d'après Haq et al. 1987 et épaisseur potentiellement karstifiée des fenêtres à karst en fonction des variations eustatiques (modifié à partir de Aunay et le Strat, 2003).</i> | <i>33</i> |
| <i>Illustration 8 : Vergence des dépôts sédimentaires (Rubino, 2002 ; Rubino, 2005) [sans échelle ; les flèches indiquent la direction des dépôts].....</i> | <i>34</i> |
| <i>Illustration 9 : Carte d'isopaques et d'environnement sédimentaire du Trias (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>36</i> |
| <i>Illustration 10 : Puissance et faciès des dépôts de l'Hettangien (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984).....</i> | <i>38</i> |
| <i>Illustration 11 : Carte d'isopaques et d'environnement sédimentaire du Lias calcaire (Lias moyen à supérieur) (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>39</i> |
| <i>Illustration 12 : Jurassique moyen, faciès du Bathonien (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984).....</i> | <i>41</i> |
| <i>Illustration 13 : Evolution des dépôts du Lias supérieur au Dogger (Dubois et al., 1975).....</i> | <i>42</i> |
| <i>Illustration 14 : Carte d'isopaques du faciès Terres Noires du Jurassique (Baudrimont et Dubois).....</i> | <i>43</i> |
| <i>Illustration 15 : Carte d'isopaques et environnement du faciès calcaire (Jurassique supérieur) (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>45</i> |
| <i>Illustration 16 : Carte d'isopaques et environnement sédimentaire au Néocomien supérieur (Baudrimont et Dubois, 1977).....</i> | <i>46</i> |
| <i>Illustration 17 : Carte d'isopaques et environnement sédimentaire du Crétacé supérieur anté-Campanien (Baudrimont et Dubois, 1977)</i> | <i>48</i> |
| <i>Illustration 18 : Puissance et faciès du Crétacé supérieur (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984).....</i> | <i>49</i> |
| <i>Illustration 19 : Schéma structural de la zone languedocienne.</i> | <i>50</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Illustration 20 : Puissance et facies de l'Oligocène (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984).....</i> | <i>52</i> |
| <i>Illustration 21 : Tableau de synthèse de l'évolution géodynamique et eustatique des formations carbonatées pour les Karsts du Languedoc du Crétacé supérieur au Quaternaire (tendance régressive du cycle alpin du 1^{er} ordre) (modifié d'après Aunay et Le Strat, 2002).....</i> | <i>57</i> |
| <i>Illustration 22 : Tableau de synthèse de l'évolution géodynamique et eustatique des formations carbonatées (modifié d'après Aunay et Le Strat, 2003) pour les Karsts du Languedoc au Mésozoïque inférieur.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Illustration 23 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symbole rouge) sur fond géologique simplifiés au 1/1 000 000.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Illustration 24 : Modèle d'extension par tectonique de couverture sur décollement (Maërtens, 1994).....</i> | <i>67</i> |
| <i>Illustration 25 : Modèle schématique de l'évolution du bassin de l'Hérault du Crétacé au Néogène (Serrano et Hanot, 2005).....</i> | <i>68</i> |
| <i>Illustration 26 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symboles en bleu) de la zone de la basse vallée de l'Hérault.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Illustration 27 : Section sismique H83N vierge et interprétée (légende : en bleu : Jurassique ; en vert : Crétacé et en jaune orangé : remplissage tertiaire syn/post rift).....</i> | <i>71</i> |
| <i>Illustration 28 : Section sismique H83D vierge et interprétée.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Illustration 29 : Section sismique H83C vierge et interprétée.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Illustration 30 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symbole en bleu) de la zone du Lez jusqu'à l'étang de l'Or.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Illustration 31 : Section sismique H83-M vierge et interprétée (légende bleu : Jurassique, en vert : Crétacé et en jaune : Tertiaire ; faille ligne rouge).....</i> | <i>75</i> |
| <i>Illustration 32 : Section sismique H83-J vierge et interprétée.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Illustration 33 : Section sismique H83-K vierge et interprétée.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Illustration 34 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers de la zone d'Uzès.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Illustration 35 : Carte d'isochrones de la base de la série synrift exprimées en temps (secondes). Projection : Lambert II étendu.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Illustration 36 : Carte d'isohypses de la base de la série synrift (équidistance 100 m). Projection : Lambert II étendu.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Illustration 37 : Carte d'isohypses de la base de la série synrift supérieur à 500 m. Projection : Lambert II étendu modèle gravitaire de marge et analogues de terrain.....</i> | <i>82</i> |
| <i>Illustration 38 : Coupe géologique Est-Ouest synoptique de la vallée du Tarn au niveau de Quézac (Le Strat et al. 2007)......</i> | <i>84</i> |
| <i>Illustration 39 : Schéma présentant le mode de déformation d'un décollement visqueux et de sa couverture fragile pendant le glissement sur une « marche de socle (Gauillier et al. 1993)......</i> | <i>85</i> |
| <i>Illustration 40 : Trois situations géologiques permettant la contraction distale requise pour l'extension d'un prisme sédimentaire. (A) Plis déformant une couverture distale</i> | |

| | |
|--|----|
| <i>faible et fine ; (B) Contraction de diapirs distaux préexistants ; et (C) contraction et gonflement d'une langue de sel préexistante (Vendeville, 2005).</i> | 86 |
| <i>Illustration 41 : Coupe dans un modèle assujéti à deux stades de dépôts de prismes sédimentaires. La progradation s'effectue de la droite vers la gauche. Le modèle comprend initialement une fine couche originelle (noire) recouverte par une fine couverture horizontale (trois couches les plus basses). Le dépôt du premier prisme (séquence comprenant les couches grises et blanches sur la droite, toutes déposées avant le départ de la déformation) déclenche la création de la première génération de graben (G1) près de la bordure de plate-forme et deux plis distaux au front du prisme (F1). Le dépôt du second prisme sédimentaire (gris n'ayant pas de couches internes) déclenche la création de la seconde génération de plis (F2) et des grabens (G2) prenant naissance sur la première génération de plis (F1 (Vendeville, 2005).</i> | 86 |
| <i>Illustration 42 : Drapage et gravitation de la Montagne de la Fage et de la Montagne des Cagnasses sur la marche de socle de Sumène évaluée à environ 500 m d'amplitude (épaisseur minimale occultée pour le Lias calcaire, le Lias marneux et une partie du Dogger).</i> | 87 |
| <i>Illustration 43 : Panorama vers le Nord de la vallée du Tarn au niveau de Quézac et d'Ispagnac montrant l'ampleur du roll over des Molines.</i> | 88 |
| <i>Illustration 44 : Niche d'arrachement dans le roll over de Molines avec à gauche la partie en place et à droite la partie gravitée avec les brèches.</i> | 89 |
| <i>Illustration 45 : Partie superficielle des failles en fleur jurassiques de la zone en aval immédiat de Quézac.</i> | 90 |
| <i>Illustration 46 : Failles en fleur dans le secteur du Point Sublime.</i> | 90 |
| <i>Illustration 47 : Failles en fleur du secteur de Montbrun.</i> | 91 |
| <i>Illustration 48 : Brèches gravitaires associées aux failles listriques du secteur de Montbrun.</i> | 91 |
| <i>Illustration 49 : Train de failles listriques dans le secteur du cirque de Pognadoires (vue vers le Nord- Ouest).</i> | 92 |
| <i>Illustration 50 : Panorama général du secteur de la Malène.</i> | 93 |
| <i>Illustration 51 : Tectoglyphes repris dans une brèche de collapse plus récente.</i> | 93 |
| <i>Illustration 52 : Mégabloc de la brèche de collapse repris dans un matériel plus lité et dolomitisé secondairement.</i> | 94 |
| <i>Illustration 53 : Roll over et brèche gravitaire associée</i> | 94 |
| <i>Illustration 54 : Détail de la brèche gravitée associée au roll over.</i> | 95 |
| <i>Illustration 55 : Vue générale de la vallée du Rieutord avec sur la partie droite le bourrelet bréchique de pied de poussée gravitaire.</i> | 95 |
| <i>Illustration 56 : Détail du bourrelet de la vallée du Rieutord et de son contenu bréchique.</i> | 96 |
| <i>Illustration 57 : Vue générale de la brèche du col de la Cardonille entre St-Martin-de-Londres et Ganges qui témoigne d'une diaclasation très pénétrative verticale et d'une brèche de collapse généralisée.</i> | 97 |
| <i>Illustration 58 : Détail de la brèche du col de la Cardonille. Les éléments sont décimétriques à pluridécimétriques et sont composés de calcaire récifaux et</i> | |

| | |
|--|-----|
| <i>périrécifaux du tithonien. Ils contiennent notamment des faciès d'avant-barrière pouvant eux-mêmes générer des brèches sédimentaires.</i> | 97 |
| <i>Illustration 59 : Vue générale vers le Nord du Cirque des Baumes où toute la série affleurante (Jurassique supérieur et sommet du Dogger) est dolomitisée et diaclasée verticalement</i> | 98 |
| <i>Illustration 60 : Profil sismique au large du Languedoc montrant des anomalies qui peuvent être rapportées à des objets karstiques sous couvertures (J. Lofi comm. pers.). Les déformations associées aux effondrements dans la couverture se font ressentir jusque dans le plioquaternaire (J. Lofi comm. pers.)</i> | 99 |
| <i>Illustration 61 : Panorama général vers l'Est du Gouffre de l'œil doux.</i> | 99 |
| <i>Illustration 62 : Extrait de la carte géomorphologique de Béziers (Ambert 1984) montrant la multiplication, dans les formations argilo sableuses du plioquaternaires, des dépressions éoliennes.</i> | 100 |
| <i>Illustration 63 : Vue générale du toit du diapir de Peyriac (Aude) avec sur la périphérie les couches du Miocène moyen calcaire basculées.</i> | 101 |
| <i>Illustration 64 : Interprétation sismique (coupe temps en haut) et géologique (coupe profondeur en bas) du profil sismique H83-C par Maërten, 1994</i> | 103 |
| <i>Illustration 65 : Interprétation sismique et géologique du Profil H83-D par Maërten 1994 (de haut en bas : version vierge, interprétation sismique (coupe-temps) et interprétation géologique (coupe profondeur)</i> | 104 |
| <i>Illustration 66 : Interprétation sismique et géologique du profil sismique H83-E par Maërten, 1994 (de haut en bas, version vierge, interprétation sismique (coupe temps) et interprétation géologique (coupe profondeur).</i> | 105 |
| <i>Illustration 67 : Légende des profils interprétés à l'aide du modèle gravitaire</i> | 106 |
| <i>Illustration 68 : Interprétation géologique du profil H83C sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.</i> | 107 |
| <i>Illustration 69 : Interprétation géologique du profil H83D sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.</i> | 108 |
| <i>Illustration 70 : Interprétation géologique du profil H83E sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.</i> | 109 |
| <i>Illustration 71 : Détails de l'interprétation géologique selon le modèle gravitaire du profil sismique H83 –C avec en arrière fond le profil sismique. La zone sourde sous l'absence de couverture maximale (triangle jaune) peut engendrer un artefact sismique.</i> | 110 |

| | |
|--|-----|
| <i>Illustration 72 : Interprétation sismique et géologique du profil H83-J (Zone du bassin des Matelles) par Benedicto (1996).</i> | 111 |
| <i>Illustration 73 : Interprétation sismique et géologique du profil H83-K par Benedicto (1996).</i> | 112 |
| <i>Illustration 74 : Interprétation géologique du profil H83J sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.</i> | 113 |
| <i>Illustration 75 : Interprétation géologique du profil H83K sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.</i> | 114 |
| <i>Illustration 76 : Détail de l'interprétation géologique selon le modèle gravitaire sur le profil sismique H83-K : (A) secteur occidental avec les brèches de pieds de poussées correspondant aux brèches du Col de la Cardonille, et (B) secteur oriental avec des brèches sur roll over avec faille listrique et/ou en failles en fleurs.</i> | 116 |
| <i>Illustration 77 : Transect NW-SE / N-S passant par le bassin d'Alès et la zone d'Uzès (Arthaud, Laurent, 1971).</i> | 117 |
| <i>Illustration 78 : Carte géologique simplifiée de la région d'Uzès</i> | 118 |
| <i>Illustration 79 : Section sismique M2026 vierge et interprétée</i> | 119 |
| <i>Illustration 80 : Section sismique M2028 vierge et interprétée</i> | 120 |
| <i>Illustration 81 : Zones cibles et élargies pour l'implantation de forages avec une estimation de la profondeur au niveau de la vallée moyenne de l'Hérault et du Lez</i> | 123 |
| <i>Illustration 82 : Identification des zones cibles pour la vallée de l'Hérault et la région Nord Montpelliérain, positionnées sur la carte de remplissage synrift.</i> | 124 |
| <i>Illustration 83 : Identification des zones cibles pour la zone d'Uzès.</i> | 126 |
| <i>Illustration 84 : Schéma de la méthodologie de caractérisation des aquifères karstiques profonds sous couverture.</i> | 128 |
| <i>Illustration 85 : Localisation des trois zones d'études et des lignes sismiques, les lignes rouges représentent les profils sismiques choisis pour retraitement dans le cadre de ce projet.</i> | 143 |
| <i>Illustration 86 : Exemple pour la zone Montpelliéraine et pour la zone gardoise des forages profonds utilisés et du log de ces forages.</i> | 144 |
| <i>Illustration 87 : Profondeur du toit du Lias calcaire pour la zone Languedocienne (Rapport Géotherma, 1981-1982).</i> | 144 |
| <i>Illustration 88 : Profondeur du toit de l'Aptien pour la zone Languedocienne (Rapport Géotherma, 1981-1982).</i> | 145 |
| <i>Illustration 89 : Profondeur du toit du Jurassique supérieur pour la zone des Garrigues (Rapport Géotherma, 1981-1982).</i> | 145 |

*Illustration 90 : Profondeur du toit du Lias calcaire pour la zone des Garrigues (Rapport
Géotherma, 1981-1982) 146*

1. Introduction

1.1. ENJEUX DE LA RECHERCHE

Les formations carbonatées voisines du golfe du Lion ont été soumises, à l'instar de tous les ensembles calcaires du pourtour de la Méditerranée, à d'importants processus de karstification, notamment lors des très bas niveaux marins observés au cours de l'évènement Messinien (jusqu'à -1500 m par rapport au niveau actuel de la Méditerranée). Elles ont été recouvertes ultérieurement (Pliocène dans un premier temps, Quaternaire ensuite) par d'épaisses formations sédimentaires qui ont notamment comblé les canyons fluviaux et/ou les incisions résultant des reculées karstiques.

Il résulte de ces très bas niveaux de base la présence potentielle de formations carbonatées, karstifiées sur des épaisseurs très importantes (plusieurs centaines de mètres), sous couverture sédimentaire, au sein des plaines littorales du Languedoc.

Les principaux aquifères karstiques actuellement fonctionnels (aquifère du Lez, aquifère des Corbières d'Opoul et du synclinal du Bas Agly, aquifères de la vallée de l'Hérault – Clamouse, Fontanilles, Cent Fonts, Source de la Vise, ..., Fontaine de Nîmes, etc.) se situent, selon leur contexte géologique (géométrie des formations carbonatées, distance par rapport aux incisions messiniennes, etc.), à plus ou moins grande distance de ces formations carbonatées actuellement sous couverture et en plus ou moins bonne continuité géologique avec elles. Il est probable, mais non encore démontré de manière directe (par forage), que certains de ces aquifères actuellement fonctionnels se prolongent sous cette couverture (et accessoirement que la karstification ait pu se développer sous des bassins oligo-miocènes, dont on considèrerait jusqu'à présent qu'ils constituaient la limite aval imperméable de certains de ces aquifères karstiques). Par ailleurs, certains compartiments carbonatés non connectés à ces aquifères actuellement fonctionnels peuvent avoir été dotés d'une karstification et constituer actuellement des aquifères karstiques sous couverture, non fonctionnels (aquifère karstique s.s. et/ou épikarst sous couverture) renfermant d'importantes réserves en eau.

Ces aquifères karstiques sous couverture représentent des aquifères potentiellement intéressants pour faire face aux besoins en eaux des décennies à venir sur le pourtour méditerranéen. Aujourd'hui, du fait de la nécessité de réaliser des forages profonds (> 350 ou 500 m) et également à cause du risque d'échec au niveau de la productivité (important dans un milieu calcaire potentiellement karstifié et hétérogène) ces ensembles sous couverture sont peu ou pas exploités. Une méthodologie de caractérisation des aquifères potentiellement karstiques et d'identification des zones productives en profondeur doit donc être développée et testée.

La définition et la localisation des réservoirs sous couverture nécessitent de confronter les interprétations de profils sismiques disponibles dans le domaine public, les

données concernant les forages profonds renseignés notamment dans la Base de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, les reconstitutions géologiques existantes ainsi que les autres résultats publiés dans des revues scientifiques nationales et internationales. Cette confrontation permettra de préciser les structures géologiques (géométrie des principaux ensembles carbonatés sous couverture notamment) et de localiser des surfaces de référence telles que des surfaces d'incision associées à des chutes de niveau marin au cours des temps géologiques.

La karstification d'une formation carbonatée est régie d'une part par l'abaissement du niveau de base (différence de potentiel hydraulique entre la zone d'alimentation de l'aquifère et l'exutoire) et, d'autre part, par l'existence d'un flux de solvant au sein de la roche encaissante (fonction des conditions climatiques, de l'existence ou non de sol, de la production de CO₂).

La reconstitution synthétique, depuis le dépôt des formations carbonatées actuellement sous couverture, des événements géologique, tectonique, climatique et eustatique permettra de préciser la structure de la karstification et, dans une moindre mesure, le fonctionnement de ces réservoirs.

1.2. OBJECTIFS DU PROJET

Les objectifs du projet réalisé dans le cadre de la convention BRGM-AERM&C sont les suivants :

- (i) définir la géométrie des formations géologiques, notamment les formations carbonatées, et des surfaces de référence à partir de l'interprétation de profils sismiques calée sur des forages existants,
- (ii) localiser des paléo-exutoires des réservoirs karstiques (paléovallées, paléoreculées karstiques),
- (iii) sur cette base et sur la base de la connaissance des systèmes karstiques actuellement fonctionnels, proposer un schéma d'ensemble du fonctionnement des aquifères karstiques lors des bas niveaux marins et en déduire les relations éventuelles existant entre les aquifères actuellement fonctionnels et les aquifères présents sous couverture,
- (iv) déterminer l'épaisseur potentiellement karstifiée, en considérant notamment les périodes de développement verticaux du karst liés aux périodes de chute de niveau eustatique et les périodes de stabilité (développement horizontal des réseaux de drainage souterrain). Il faut reconnaître ici l'importance des réseaux verticaux qui peuvent être fonctionnels pendant les phases de chute du niveau de base, mais aussi lors du réennoiment, comme des exutoires « per ascensum » du système karstique (Mocochain, (2006-a, 2006-b) en voie d'être barré par les formations nouvellement déposées,

(iv) identifier d'éventuelles anciennes surfaces épikarstiques situées actuellement sous couverture et pouvant y constituer des aquifères relativement continus,

(iv) confronter ces résultats à la connaissance hydrogéologique de systèmes possédant des exutoires aériens (volume des réserves, degré de karstification...) et en déduire des orientations quant aux propriétés des aquifères sous couverture.

Ainsi, le postulat suivant peut être posé : les réservoirs cibles potentiels sous couverture peuvent être identifiés à partir d'une étude des structures et des géométries géologiques et de la mise en perspective des évolutions paléogéographiques, des niveaux de base régionaux à l'origine des paléo-écoulements karstiques et de la connaissance hydrogéologique sur des sites tests. Le principal objectif du projet de recherche est de viser à démontrer ce postulat et à mettre au point cette méthodologie.

Cette méthodologie participe ainsi à l'amélioration de la connaissance et à la compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes karstiques, une des orientations du 9ème programme de l'agence de l'eau RM&C (3.1. Connaissance, suivi et évaluation). Si la méthodologie est développée et testée sur des sites pilotes situés en Languedoc Roussillon, elle sera transposable à d'autres sites de la région LRO et à d'autres ensembles situés en PACA (bassin d'Aix Gardanne, bassin du Beausset par ex.), pour lesquelles des données géophysiques sont notamment disponibles.

Les résultats du projet feront aussi l'objet de publications scientifiques.

1.3. CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport est le rapport final du projet « Caractérisation des karsts profonds sous couverture », réalisé dans le cadre de la convention de recherche AERMC et BRGM. Il est organisé selon 6 principaux chapitres. Après un chapitre d'introduction, le deuxième chapitre présente les principaux résultats issus d'une synthèse bibliographique concernant le développement de la karstification, les études de caractérisation des aquifères karstiques profonds dans le cadre d'investigation pétrolière et les études hydrogéologiques. Un troisième chapitre est consacré à la synthèse régionale de l'histoire géologique du Sud-Est de la France et de la zone languedocienne, mettant en évidence les périodes propices au développement de la karstification ainsi que la présence d'indices de paléo-exutoires. Un quatrième chapitre présente les profils retraités, totalisant 350km de linéaire, leur interprétation sismique, géologique et hydrogéologique et l'identification de zones « cibles » pour implanter des forages de reconnaissance suite à des investigations complémentaires. Le cinquième chapitre décrit la méthodologie développée concernant la caractérisation des aquifères karstiques profonds sous couverture. Le dernier chapitre dresse la conclusion ainsi que des perspectives en matière de recherche et de validation de la méthodologie développée dans le cadre de ce projet.



2. Synthèse bibliographique concernant les aquifères karstiques profonds

2.1. INTRODUCTION

Les recherches bibliographiques ont portées d'une part sur les processus d'altération et de karstification et d'autre part sur les méthodes de caractérisation des karsts sous couverture. Les méthodes de caractérisation des karsts ont fait l'objet de recherche dans le cadre de l'exploration de gisements pétroliers avec des techniques d'interprétation de profils sismiques et des vérifications à l'aide de forages. Les méthodes de caractérisation hydrogéologique de la littérature sont plus classiques avec l'interprétation de données des forages, l'interprétation de données géochimiques et piézométriques.

2.1.1. Rappel de quelques définitions concernant les mécanismes de la karstification

Le processus de karstification est un processus lié à la dissolution des roches karstiques par les eaux souterraines (Dreybrodt, 1996 ; Dreybrodt et al. 2002, 2005). La dissolution apparaît lorsqu'une circulation d'eau prend place au sein d'un massif rocheux, empruntant le système interconnecté des discontinuités et des vides constituant la perméabilité primaire. Un certain nombre de conditions doit être réuni pour initier le processus. La notion de processus et de potentiel de karstification ont ainsi été décrites par plusieurs auteurs (Király, 1984 ; Mangin, 1978 ; Bakalowicz, 1986) et détaillée dans le paragraphe ci-dessous. Les différents types d'altération sont exposés également.

a. Processus de karstification

Le processus de karstification est un processus dynamique conditionné par deux facteurs : un facteur "géologique" lié à l'état du massif carbonaté (porosité primaire et secondaire, joints de stratification, fractures avec ouverture sous l'effet d'une tension ou d'un relâchement [Király, 1984]) et un facteur "hydrogéologique-hydrogéochimique", à savoir le potentiel de karstification (Illustration 1).

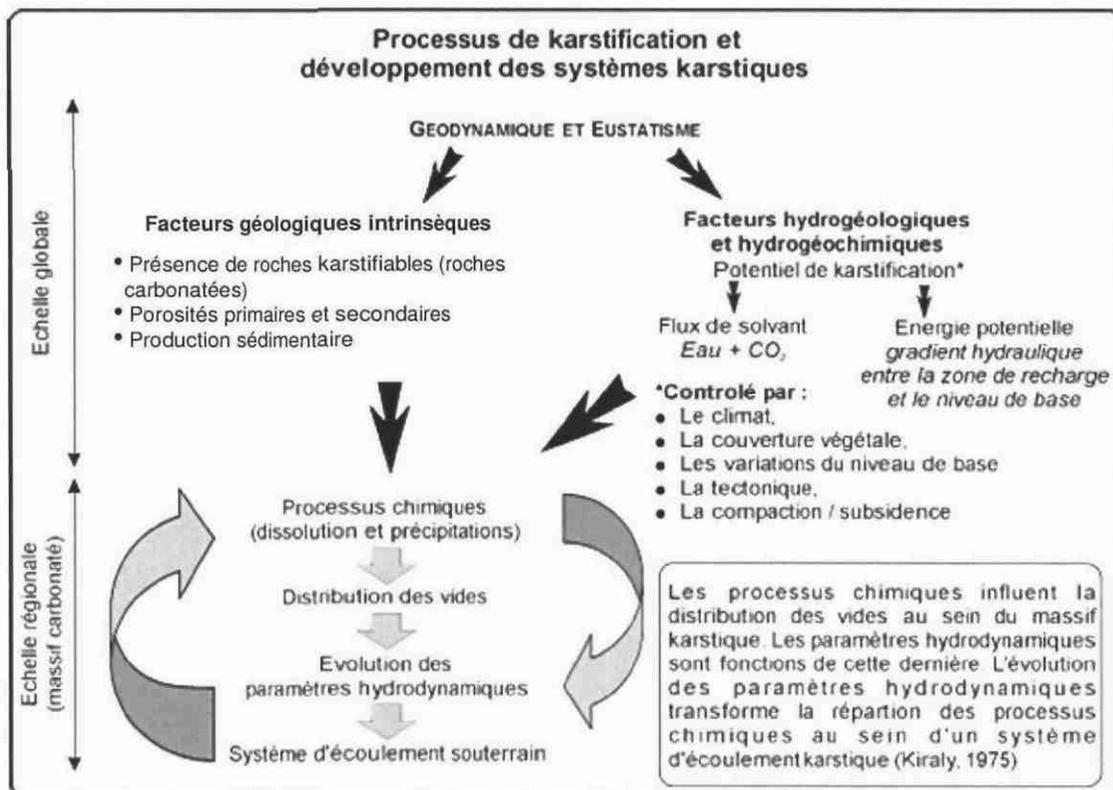


Illustration 1 : Processus de karstification et développement des systèmes karstiques (Kiraly, 1975 modifié)

b. Potentiel de karstification

Le potentiel de karstification est défini par (i) une différence de potentiel hydraulique entre la zone d'alimentation de l'aquifère ou du système karstique (gradient hydraulique important) et le point d'émergence (qui correspond au niveau de base des écoulements souterrains), et (ii) par l'existence d'un flux de solvant de la roche encaissante (eau et présence de CO₂) [Mangin, 1978 ; Bakalowicz, 1986].

Le développement de la karstification est ainsi fonction en partie de la gravité, et par conséquent de la différence d'altitude entre la zone d'infiltration et le niveau de base. D'autres facteurs tels que le gradient thermique et le gradient chimique interviennent dans le processus de karstification. Ces derniers contribuent à l'augmentation du développement d'une karstification déjà contrainte par les réseaux structuraux ou par d'anciens niveaux de base.

Le système karstique est l'unité hydrogéologique de base à laquelle un potentiel de karstification s'applique pour créer un réseau karstique, c'est-à-dire un réseau de conduits en milieu non saturé et saturé en eau permettant l'évacuation rapide d'eau souterraine stockée dans des cavités ou dans des parties poreuses ou fissurées connectées aux conduits avec de fortes pertes de charge hydraulique.

Une variation de la position du niveau de base du karst conduit à un changement du fonctionnement du réseau karstique (Delannoy, 1997). Suite à une chute ou à une remontée du niveau de base, le réseau s'organise afin d'établir un nouvel équilibre avec le niveau de base (création *per descensum* ou *per ascensum*) ; l'ancien réseau perd sa fonctionnalité. Le niveau de base karstique correspond au niveau de base de l'écoulement [Gèze, 1965], c'est-à-dire le niveau de l'émergence topographiquement la plus basse vers laquelle peuvent se diriger des eaux de l'ensemble calcaire considéré. Si le karst est noyé suite à une remontée du niveau de base, l'aquifère karstique devient non fonctionnel, sans possibilité d'évacuation des eaux par de nouveaux exutoires. L'aquifère possède alors une structure karstique (réseau et vides karstiques) qui n'est plus soumise aux écoulements rapides organisés vers un exutoire unique, mais possède une capacité de stockage pouvant être considérable.

c. Typologie d'altération

L'attaque chimique des roches carbonatées karstifiables peut se développer selon trois modes :

- (i) l'attaque chimique ou corrosion ;
- (ii) la cryptoaltération ;
- (iii) la fantômisation.

La **corrosion** agit directement sur la roche nue via une phase liquide, l'eau en contact avec une phase solide. Les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} de la roche sont ainsi évacuées par l'eau (Picknett et al. 1976 ; Roques 1967). Ce processus aboutit à la formation d'un système karstique, pour autant que les conditions de karstification soient réunies : énergie potentielle avec un gradient hydraulique entre la zone de recharge et le niveau de base, énergie chimique dépendant du potentiel chimique (CO_2 et autres acides à l'entrée du système) et de l'énergie mécanique (fracturation du massif) (White, 1988).

La **crypto-altération** est définie comme une attaque chimique du toit du massif calcaire sous une formation de couverture perméable par les eaux d'infiltration ; les formations résultantes sont des dépressions dans lesquelles la formation de couverture s'enfonce petit à petit. Le crypto-karst désigne ainsi les formes karstiques qui se développent sous une couverture permettant l'action de la corrosion à l'interface roche – couverture. L'existence d'un processus de corrosion sous couverture est un processus qui a fait l'objet d'étude dès le début du 20^{ème} siècle (Katzner, 1909 et Penck, 1924). Ce type d'évolution a été décrite depuis par de nombreux auteurs, en considérant le climat, la nature de la roche et de la couverture (Lamouroux, 1972 ; Fabre et Nicod, 1982 ; Ford, Salomon et Williams, 1996). Ces phénomènes ont été étudiés notamment dans un contexte de karst pyrénéen dans le massif des Arbailles (Vanara, 2000). Les couvertures considérées sont formées d'altérites ou de séries pédo-altéritiques. L'altération des formations carbonatées massives se développe par un ensemble de fissures colmatées. Les micro-fissures, joints de fracture, stylolites sont élargis par la pénétration de l'eau puis des solutions pédologiques formant des microcavités et des micro-puits. La karstification se développe au contact des altérites

et des formations pédologiques. La dissolution sous couverture de calcaires marneux se déroule quant à elle au contact des calcaires avec les formations d'altération. Les formations d'altération sont généralement argilo-limoneuses, pouvant renfermer des quartzs et micas issus de l'altération de filons quartziques situés dans la région (notamment pour les karsts des formations primaires développés à proximité des socles anciens). Entre les altérites et les calcaires sains, se développe un horizon renfermant des roches calcaires « flottant » dans une matrice, à la manière des boules de roches de socle pouvant aboutir à des chaos granitiques, les altérites ayant été érodées. Les crypto-karsts peuvent renfermer d'importants gisements (ex. fer, bauxite), liés à une géochimie particulière (solubilité de la silice et de l'alumine dans des milieux à pH très faibles) (Quinif, 1999).

La **fantômisat**ion est définie comme une altération isovolumique in situ du calcaire par des eaux d'infiltration très lentes. Les formes résultantes sont de grands volumes altérés où il ne subsiste que le squelette insoluble et une grande porosité. La structure initiale du massif est conservée. La roche devient non cohérente, par disparition d'éléments solubles et conservation in situ des éléments moins solubles (Quinif, 1999). Ce processus se déroule à partir de la surface *per descensum*, se traduisant par la formation de couloirs parallèles qui se réunissent pour donner lieu à de vastes volumes en forme d'entonnoirs. Ces processus peuvent se dérouler à des profondeurs supérieures à 100 m sous la surface du sol. Dans une phase évolutive ultérieure, le résidu d'altération se tasse et provoque un vide au toit de la pseudo-galerie (Vergari, 1998 et Quinif, 1999). Dans un contexte d'évolution géologique, ces pseudo-endokarsts peuvent être soit fossilisés lors d'une transgression ou au contraire lors d'une régression associée à une surrection, soit repris par la karstification. Ces pseudo-karsts correspondent à des paléokarsts avec remplissage, notamment de type bauxitique.

Dans le contexte méditerranéen, ces types de karstification ont pu prendre place à partir du moment où les formations carbonatées ont été émergées, soumises à l'érosion puis à des transgressions. Les crypto-karsts donnent lieu à des formations de micro-puits pouvant constituer le siège d'un fonctionnement hydrogéologique de type épikarstique. Si la fantômisat

2.1.2. Méthode de caractérisation des karsts sous couvertures par les pétroliers

Les méthodes de caractérisation sont illustrées à partir de différents exemples issus de la littérature concernant plusieurs gisements pétroliers en milieu carbonaté.

Le **réservoir carbonaté de Malampaya** sur la marge philippine (Sud-Ouest de l'archipel et plus particulièrement de l'île de Palawan) (Illustration), situé à 3000 m sous le niveau de la mer, a été caractérisé à l'aide de forages profonds et de l'interprétation de profils de sismique réflexion (Fournier et Borgomano, 2007). Ce champ pétrolier est constitué d'une couche à huile de 56 m d'épaisseur et d'une colonne de gaz de 650 m.



Illustration 1. Localisation géographique du gisement de Malampaya en Asie du Sud-Est

Les propriétés de ce réservoir sont d'après les auteurs, principalement pilotées par la nature et l'intensité de la diagenèse des formations carbonatées. La genèse des vides au sein de ces formations calcaires du Tertiaire provient de la karstification suite à la mise à l'air libre des formations (épikarstification principalement, donc). La sismique réflexion permet de mettre en évidence les surfaces structurales et les surfaces d'érosion, des discordances (Vail et al., 1977). Cette méthode a été utilisée pour localiser le sommet du réservoir carbonaté.

Les formations du Dévonien supérieur de la **plateforme carbonatée de Grosmont** au Canada (100 km de large sur 400 km de long) renferment d'importantes réserves de pétrole estimées à plusieurs dizaines de millions de m³, ce qui en fait un des plus grands réservoirs pétroliers de la planète (Illustration 2.a). Ces calcaires sont enfouis sous 200 à 400 m de sédiments peu perméables. Les études géologiques ont permis de reconstituer la formation de ce réservoir (Illustration 2.b). Les calcaires dévoniens ont été karstifiés à la fin du Jurassique et au début du Crétacé suite à une phase d'émersion. La caractérisation du réservoir a été réalisée à partir de l'étude d'une quarantaine de forages (Illustration 2.c), l'épaisseur de roches fortement karstifiée dans laquelle s'accumule le pétrole peut atteindre quelques dizaines de mètres et serait donc là aussi de type épikarstique. Toutefois du fait de l'hétérogénéité des aquifères karstiques, les informations ponctuelles déduites des forages ne permettent pas encore d'obtenir la géométrie spatialisée du réservoir, ni la puissance du gisement pétrolier de façon précise à l'échelle régionale.

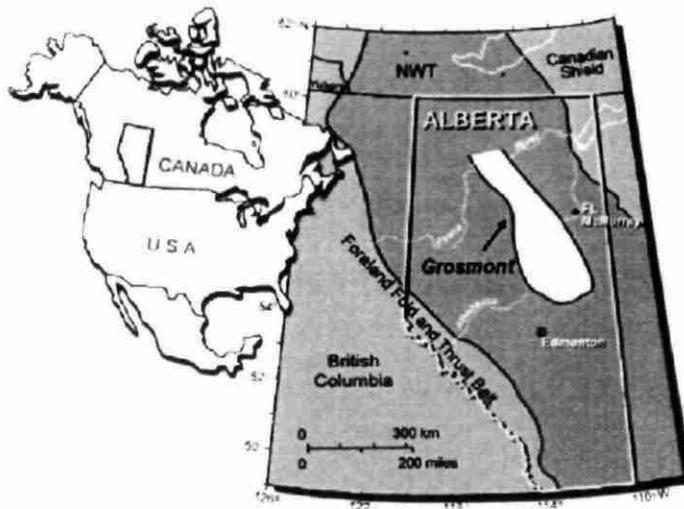
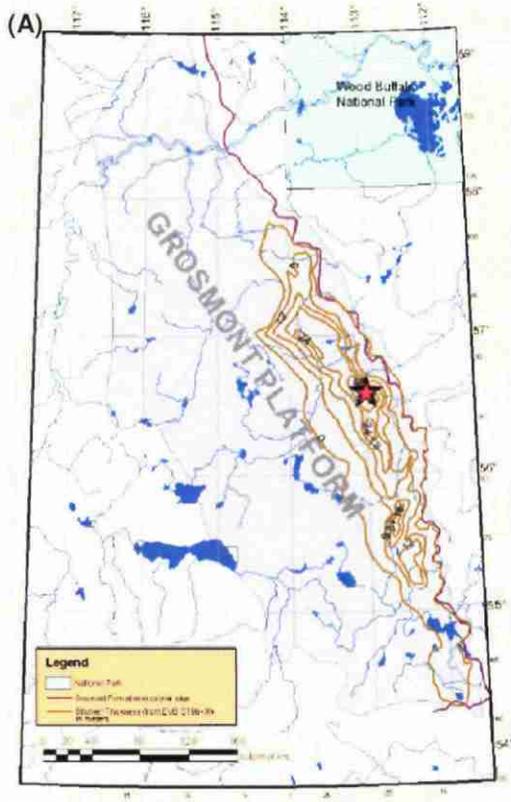


Illustration : Localisation géographique en Alberta au Canada de la plateforme de Grosmont (B. E. Buschkuhle, Frances J. Hein and Matthias Grobe, 2007).



(B)

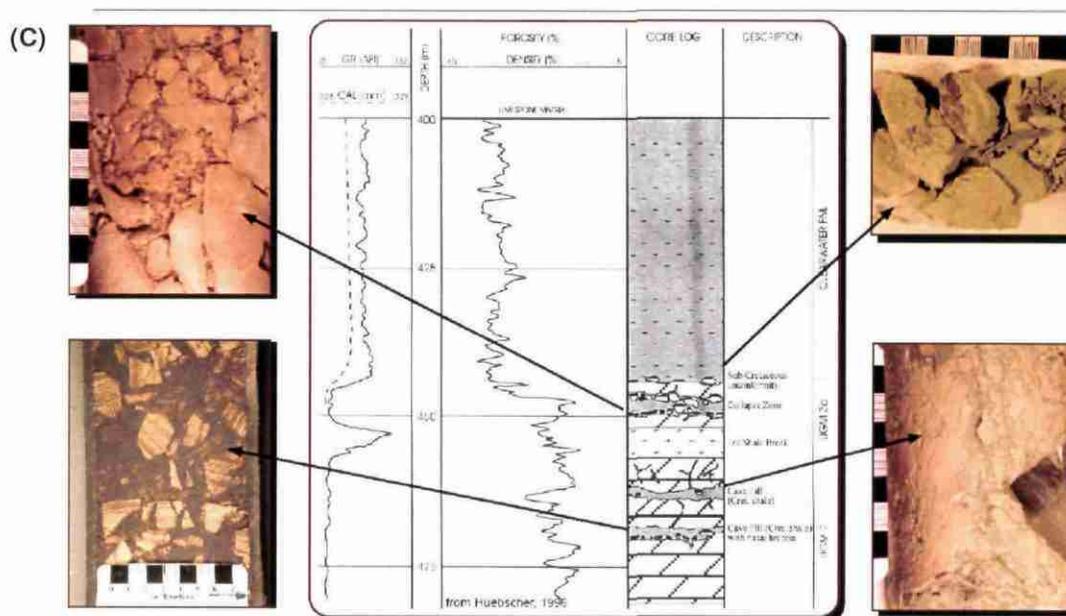


Illustration 2 : Karst du Dévonien de Grosmont. (A) Localisation, (B) Reconstitution de l'histoire géologique, (C) Analyse des forages (Buschkuehle et al., 2007).

Le **gisement pétrolier de Rospo Mare** est situé en Adriatique à 20 km des côtes italiennes. Tout comme les deux précédents exemples, le réservoir correspond à un paléokarst développé au dépend des calcaires crétacés. Il est situé à 1300 mètres de profondeur dans les calcaires crétacés. La karstification de ces calcaires est datée de l'Oligo-Miocène. Le paléokarst est imprégné d'hydrocarbures sur une hauteur de 140 mètres ; il est recouvert par 1200 mètres de terrains mio-pliocène (argiles et silts). Ce réservoir karstique a été étudié dans un premier temps à l'aide de 11 forages verticaux permettant d'analyser les différentes formes de dissolution et de remplissage, révélant ainsi une organisation typique de karst de plateau (Soudet et al., 1994). La morphologie d'érosion du toit du réservoir carbonaté karstifié est très irrégulière et comporte des paléo vallées et de nombreuses dolines-puits. Les caractéristiques concernant la partie supérieure du réservoir ont été comparées à celle d'un paléokarst voisin de même âge affleurant en carrière (Illustration 3.a). Aussi, grâce aux campagnes de géophysique (Illustration 3b), il a été possible d'établir une cartographie du toit du paléokarst à partir de l'interprétation de profils sismiques (Illustration 3.c) et ainsi d'optimiser l'exploitation du champ par des puits horizontaux (Illustration 3.d). Les auteurs se sont principalement focalisés sur le paléo-épikarst et n'ont pas cherché à comprendre la dynamique de constitution d'un éventuel karst « profond ».

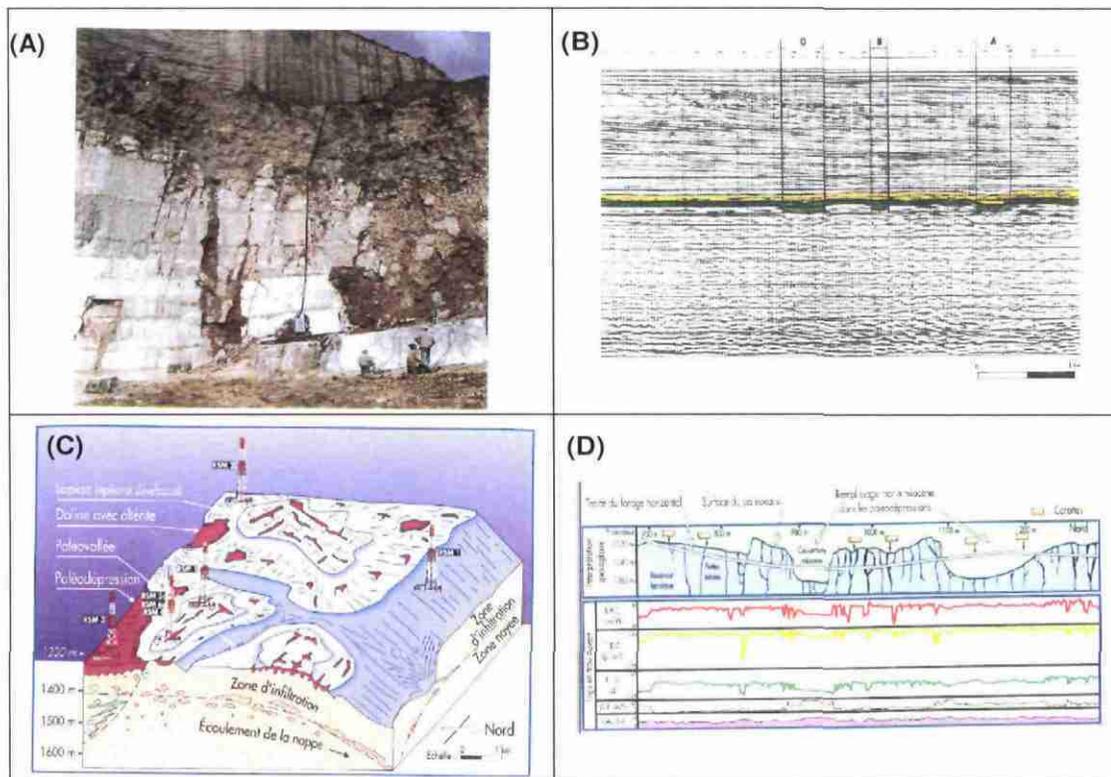


Illustration 3 : Karst de Rospomare. (A) Paléokarst voisin à l'affleurement, (B) Profil sismiques montrant la géométrie du toit du paléokarst, (C) Reconstitution de la position du toit du paléokarst, (D) Intéprétation des données sismiques et position du forage horizontal pour l'exploitation (Soudet et al., 1984).

Ces réservoirs pétroliers sont ainsi des paléokarsts partiellement colmatés, sous couverture de roches sédimentaires peu perméables. Dans le cadre de l'exploitation pétrolière, les recherches se concentrent sur la caractérisation des vides et sur une localisation fine du toit des formations carbonatées karstifiées à épikarstifiées et donc du réservoir. Elles sont basées sur la mise en œuvre de forages et de mesures géophysiques (sismique réflexion).

Ainsi l'étude des gisements pétroliers situés dans les paléokarsts, tant à l'échelle du puits qu'à celle du gisement, a permis la construction de modèles statiques en ayant recours à des méthodes géostatistiques. Les phénomènes géologiques tels que les inter-bancs, les stylolites, les fractures et les phénomènes karstiques (vides) sont observables à partir de l'utilisation des techniques d'imagerie en forage. L'interprétation de profils sismiques en imagerie 3D combinée à de l'imagerie en forages a été appliquée à un gisement développé dans des formations paléozoïques d'Asie orientale (Mer de Barents), récemment décrit par Wang, 2005 (Kneppers et al., 2006). Les images électriques obtenues sur 3 forages horizontaux et 5 forages verticaux ont permis la caractérisation de la densité et de l'orientation du réseau de fractures ainsi que la mise en évidence de différentes zones karstiques. La cartographie en 3D a permis d'identifier les fractures dans la zone épikarstique, les conduits verticaux de la

zone non saturée ainsi que de larges conduits et brèches d'effondrement de cavités au sein de la zone noyée (Hunt et al. 2003).

2.1.3. Méthode de caractérisation des karsts sous couverture et des karsts profonds par les hydrogéologues

En hydrogéologie, les études des aquifères karstiques sous couverture sont restées « classiques » avec une méthodologie comparable à celle des karsts affleurants, c'est-à-dire basée sur l'analyse de l'hydrogramme et des variations hydrochimiques au niveau de l'exutoire lorsque celui-ci est connu et, de plus, lorsque cela est possible, sur le suivi hydrologique et hydrogéochimique de forages ou piézomètres. Le réservoir profond est caractérisé par des méthodes indirectes basées généralement sur les analyses géochimiques.

Une analyse globale a été conduite sur l'aquifère Jurassique du Maestrazgo en Espagne (Mejías et al., 2007). Il s'agit d'un vaste aquifère de près de 2000 km², avec seulement un affleurement des calcaires sur 30% de la surface totale. Cet aquifère a été caractérisé à partir de la piézométrie et d'analyses géochimiques. Une particularité de cette étude est l'utilisation de la géophysique avec la réinterprétation de données sismiques pour préciser les géométries profondes.

Concernant les karsts profonds, différentes études ont été conduites afin de caractériser la structure interne des aquifères et surtout préciser les profondeurs de karstification. Les systèmes suivant ont été étudiés par différents auteurs :

• Karst du Bas Agly dans les Corbières

Ce karst côtier s'est développé dans les calcaires jurassiques et crétacés. Il est situé dans les Pyrénées Orientales et est bordé par l'étang côtier de Salses Leucate. Ses deux exutoires principaux, cumulant un débit moyen de 2 m³/s, sont les sources de Font-Estramar et de Font Dame. Le réseau karstique se développe en profondeur, le conduit a été repéré par plongée jusqu'à une profondeur de -164 m (Brandt, 1997). Aussi, l'eau des sources, caractérisée par une anomalie de température (+ 2 à +2,5 °C par rapport aux températures des eaux souterraines régionales), indique des circulations profondes dans l'aquifère. L'utilisation du géothermomètre de la silice a révélé une profondeur maximale de circulation de l'ordre de 400 m (Ladouche et al, 2004). Ce karst messinien développé en profondeur s'est retrouvé barré par les sédiments du Plio-Quaternaire. Les sources principales sont ainsi des sources de trop plein. Les études hydrogéologiques réalisées (Dörfliger et al., 2008 soumis) ont montré qu'une partie de l'eau de l'aquifère karstique s'évacue au travers de cette couche sédimentaire peu perméable, le débit de fuite a été estimé à 500 l/s.

• Almyros d'Héraklion en Crète, Grèce

La source côtière de l'Almyros d'Héraklion est situé 1 km à l'intérieur des terres. Cette source est caractérisée par un débit compris entre 2 et 30 m³/s et par une eau saumâtre. La salinité de l'eau est attribuée à un mélange avec l'eau de mer. Le travail

de modélisation réalisé par Arfib (2001a, b) a révélé que l'intrusion d'eau de mer s'effectuait à une profondeur de l'ordre de 500 m.

• Port-Miou dans le massif des Calanques

La source sous-marine de Port-Miou s'écoule en mer à 12 mètres de profondeur. Son débit est compris entre 1 et 10 m³/s. Le conduit a été reconnu par plongée jusqu'à une profondeur de 172 mètres (Arfib et al., 2006 ; Cavallera et al., 2006). Le Canyon sous-marin de Cassidaigne situé à 6 km au sud de Port-Miou, offre l'aspect d'une reculée karstique ceinturée de falaises de plus de 200 m de puissance et qui ne se raccorde pas à une vallée de surface. Ce canyon aurait pu être creusé par les eaux d'un paléooxutoire du système karstique de Port-Miou (Blavoux et al., 2004).

• Système de Thau

Ce système se développe dans les formations carbonatées du Jurassique supérieur et du Jurassique moyen lesquelles totalisent une épaisseur de plus de 1000 m (Dörfliger et le Strat, 2001). Dans la partie Nord, les calcaires sont affleurant alors que dans la partie Sud les terrains calcaires sont enfouis en profondeur sous une épaisse couche de sédiment post éocène. Les études hydrogéologiques ont révélé l'existence de deux grands types de circulation. Grâce aux études géochimiques mais aussi à partir de la connaissance de la géologie profonde, il a été possible de caractériser ces circulations. La première concerne des circulations proches de la surface. Elle est caractérisée par des temps de transfert courts. La seconde concerne des circulations hydrothermales avec des circulations profondes (supérieure à 1000 m) et des temps de séjour très longs de l'ordre de 100 000 ans.

• Partie occidentale du massif du Mouthoumet, Pyrénées orientales

Ce secteur présente une superficie de 150 km², l'analyse litho-stratigraphique a révélé l'existence d'un ensemble carbonaté dévono-carbonifère de 400 à 450 m d'épaisseur pris entre deux séries détritiques gréso-péltiques (Bouchaala, 1991). L'examen structural montre que le système a subi de nombreuses déformations (déformation hercynienne puis tectonique pyrénéenne). De ce fait, l'ensemble carbonaté présente une structure très compartimentée, mais une certaine continuité hydraulique est assurée en profondeur grâce aux fortes épaisseurs de la série. Dans ces formations carbonatées, deux types d'aquifères ont été distingués : les aquifères profonds qui alimentent les sources thermo-minérales (température de 20 à 50 °C) et les aquifères peu profonds. Ces derniers représentent l'essentiel des systèmes karstiques avec des réserves importantes. Quant aux aquifères profonds, les communications avec les aquifères sus-jacents sont réduites. Ces réserves thermo-minérales peuvent être mobilisées par des forages profonds.

Les études d'aquifères karstiques réalisées sur le pourtour Méditerranéen font état de karstification profonde atteignant plusieurs centaines de mètres. Ces karsts sont à mettre en relation avec l'assèchement de la Méditerranée au moment de la crise de salinité du Messinien, créant ainsi un potentiel de karstification exceptionnel. Cet épisode sera caractérisé dans la partie concernant la reconstitution de l'histoire

géologique (chapitre 3). Concernant la mise en place de la karstification, on peut citer les travaux de Mocochain (2006-a, 2006-b) qui, à partir d'une analyse géomorphologique des réseaux de drainage, caractérise l'influence messinienne au niveau de la vallée du Rhône.

La méthodologie de caractérisation de la mise en place de la karstification développée pour les systèmes karstiques méditerranéens (Aunay & Le Strat, 2002 ; Aunay et al., 2003 ; Dörfliger et al., 2006) et appliquée aux systèmes karstiques des Corbières Orientales peut également être citée.

Le postulat de départ du développement de cette méthodologie repose sur le positionnement d'un système karstique dans un environnement géodynamique de bassin sédimentaire. Du point de vue géologique, l'approche descriptive d'un massif karstique a pour objectif la localisation de cavités fossiles ou actives (avec circulation d'eau). Cette approche ne peut être mise en œuvre que lorsqu'il existe des données spéléologiques nombreuses. Liés à l'évolution du niveau de base, certains réseaux karstiques restent inaccessibles, noyés ou enfouis sous des formations plus récentes. Une approche géologique à l'échelle régionale s'impose ainsi pour retracer le cadre de l'évolution dans laquelle s'inscrit le développement du karst. Le karst est ainsi replacé dans un contexte de géodynamique de bassin sédimentaire (Illustration 4).

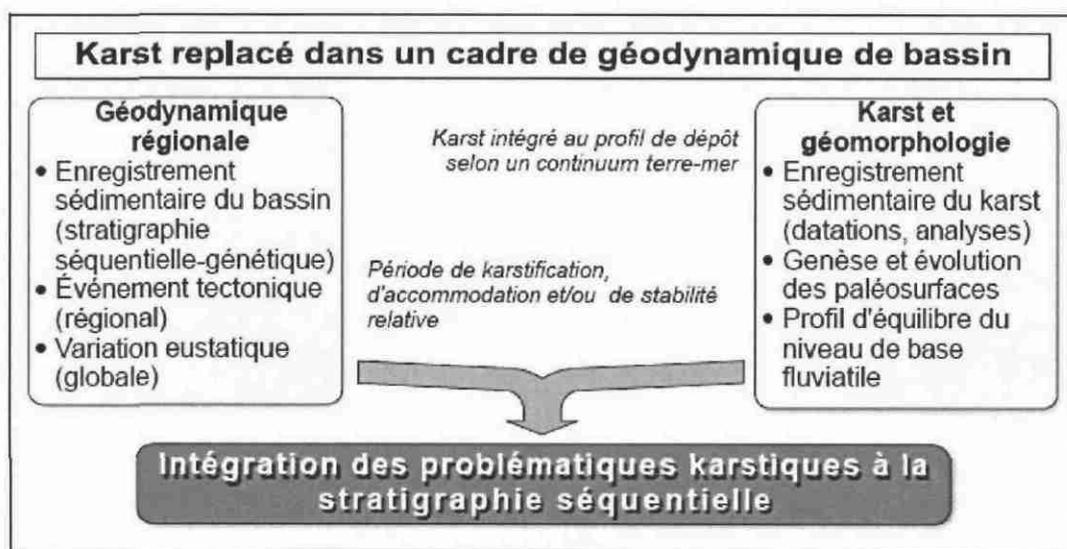


Illustration 4 : Schéma conceptuel de la méthodologie de caractérisation du développement de la karstification (Aunay et Le Strat, 2002)

La méthodologie d'étude géologique des karsts de la Méditerranée occidentale repose sur l'analyse, d'une part de la variation globale du niveau marin à partir de la courbe eustatique globale et, d'autre part, de l'évolution des phénomènes structuraux liés à la géodynamique pyrénéenne et alpine.

A l'échelle régionale, l'étude des paléosurfaces et leur datation relative permettent de reconstituer l'évolution des paysages au cours des temps géologiques. L'identification

des paléosurfaces s'effectue d'une part à l'aide du traitement de données informatiques : (i) création d'une carte des orientations des pentes afin d'identifier les surfaces de même orientation ; classification des pentes exprimées en pourcentage en différentes classes (0-1%, 1-3%, 3-5%, 5-7%, 7-10%, 10-15%, 15-20%, 20-30%, 30-40% et 40-100%) ; (ii) extraction et représentation des cartes dont les pentes sont égales à 1-3% et 3-5%, les paléosurfaces étant caractérisées par des pentes comprises entre 1 et 5% ; (iii) classification des paléosurfaces par pente et par altitude ; (iv) superposition des paléosurfaces à la topographie (MNT) : les paléosurfaces situées en fonds de vallée sont supprimées, seules les paléo-surfaces de type plan sub-horizontal perché en altitude sont conservées ; (v) les paléosurfaces retenues sont reportées sur un fonds topographique et/ou géologique ; l'étude de terrain permet d'identifier et de relier les morphologie entre elles et de repérer des gisements potentiellement fossilifères des pédiments piégés sur ces surfaces.

A l'échelle locale, l'étude des sédiments associés à la karstification fournit des éléments de datation relative et de mise en place de la karstification. Une typologie des remplissages karstiques et une analyses des sédiments par diffractométrie des rayons X et par l'observation au microscope électronique à balayage, permet d'identifier les formes de transport des éléments et d'érosion, ainsi que la nature. Ces sédiments sont soit au niveau des paléosurfaces, soit dans les réseaux de conduits karstiques.

A l'aide de cette méthodologie, le potentiel théorique de karstification ainsi que l'accommodation karstique peuvent être déterminés.

A partir de cette recherche bibliographique concernant les aquifères karstiques sous couverture, il ressort qu'aucune méthode spécifique n'a été développée à ce jour par les hydrogéologues, prenant notamment en considération la mise en évidence des périodes propices à la karstification, mis à part les travaux d'Aunay et al., concernant une partie de la région du Languedoc (région des Corbières et région nîmoise).

La géométrie des formations carbonatées, dont celles des surfaces marquées par des phénomènes karstiques (dolines, paléo-vallées), constitue un élément important pour la caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères karstiques profonds. La reconstitution de l'évolution paléogéographique des dépôts à l'échelle de la région étudiée est nécessaire afin de pouvoir identifier l'existence ou non des formations carbonatées, leur position et leur géométrie actuelle, les périodes d'émersion passées favorables au développement de la karstification, ainsi que les positions des paléo exutoires et des paléo-réculées en lien avec la vergence des dépôts au sein des bassins sédimentaires. Ce travail est de grande ampleur et n'a pas été mis en œuvre dans sa globalité dans le cadre de ce travail de recherche. Néanmoins, un travail de synthèse géologique régionale et la reprise d'une charte indiquant les principales phases propices à la karstification, le potentiel de karstification et le développement à tendance verticale et horizontales font l'objet du chapitre 3 de ce rapport.

3. Synthèse régionale de l'histoire géologique du Sud-Est de la France et de la zone Languedocienne

3.1. INTRODUCTION

La synthèse de l'histoire géologique de la région du Languedoc constitue un élément important pour l'interprétation géologique et hydrogéologique des profils sismiques retraités dans le cadre de ce projet. Cette synthèse débute au Secondaire et s'achève au Quaternaire. Elle a été rédigée à partir notamment de la description de cartes d'isopaques et d'environnements de dépôts des différentes formations réalisées dans le cadre de synthèses antérieures datant de la fin des années 1970-1980 (Synthèse Sud-Est, BRGM 1985).

3.2. SECONDAIRE

Un grand bassin sédimentaire se développe entre le Trias et le Crétacé supérieur sur le socle érodé. Ce bassin de forme triangulaire (Illustration 5) est délimité par des accidents hérités du Paléozoïque : à l'Ouest par les faisceaux cévenol et ardéchois de direction NE-SW, par des faisceaux duranciens de direction NW-SE et au Sud par une zone continentale élevée (zone haute méridionale) de direction W-E, au niveau de l'actuel Golfe du Lion (Benedicto, 1996). La zone Languedocienne, qui nous intéresse plus particulièrement, est délimitée par la faille des Cévennes et la faille de Nîmes.

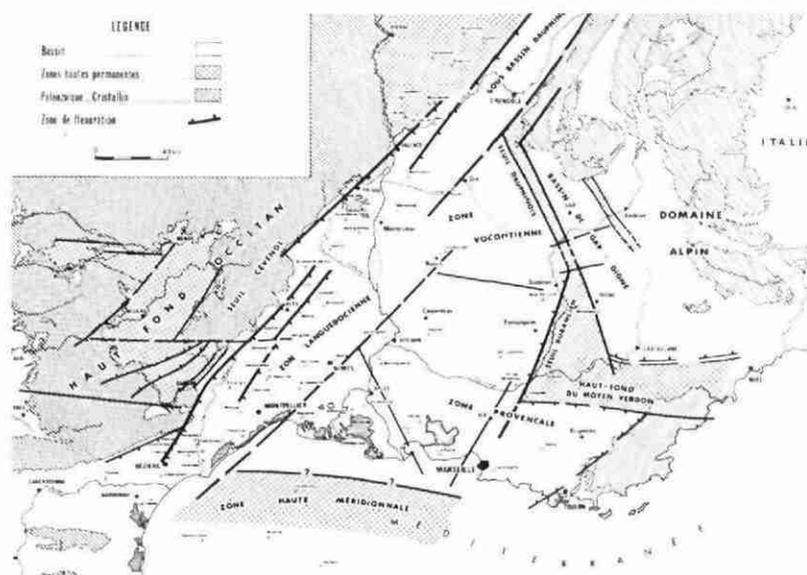


Illustration 5 : Schéma structural du bassin mésozoïque du Sud-Est (Baudrimont et Dubois, 1977).

Une coupe composite schématique (Illustration 6) présente l'ensemble de la série sédimentaire, distinguant les principales unités lithostratigraphiques reconnues sur les bordures et dans le centre du bassin (Baudrimont et Dubois, 1977).

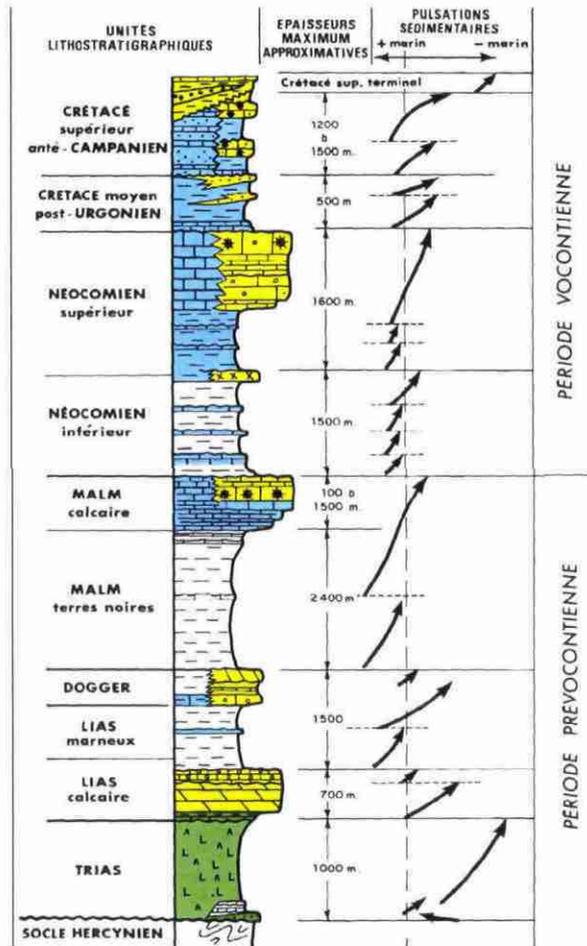


Illustration 6 : Schéma de la série stratigraphique mésozoïque (Baudrimont et Dubois, 1977).

Il s'agit d'une série stratigraphique pratiquement continue du Trias à la fin du Crétacé déposée durant 160 Ma. La puissance des dépôts dépasse 10 000 m dans les zones les plus subsidentes du bassin et se réduit à 2 500 – 3 000 m sur les bordures. La sédimentation est de type plate-forme – bassin avec des phases d'émersions au niveau de la plate-forme. Les phases d'émersion sont le plus souvent absentes dans le bassin profond.

La distribution des variations eustatiques est telle que le niveau de la mer varie entre 0 m et 220 m du Trias au Sénonien, c'est-à-dire dans la partie transgressive du cycle alpin, et de +220 m à -1500 m du Sénonien au Messinien dans la partie régressive du même cycle alpin. La genèse des karsts qui est essentiellement fonction de l'évolution du niveau de base dispose donc d'une « fenêtre à karsts » qui se positionne entre les

niveaux de base -1500 m et +220 m NGF sur le seul critère eustatique. Par ailleurs, il est clair que les karsts sont formés pendant les périodes de chute du niveau de base, et sont fossilisés pendant les périodes de montée du niveau de base (Illustration 7). La « fenêtre à karst », sur le seul critère eustatique, représente la somme des accommodations karstiques créées dans une série sédimentaire. Elle peut bien sûr évoluer notamment en fonction du paramètre structural qui peut enfouir ou surélever les séries sédimentaires, et donc amplifier ou atténuer l'épaisseur potentiellement karstifiable.

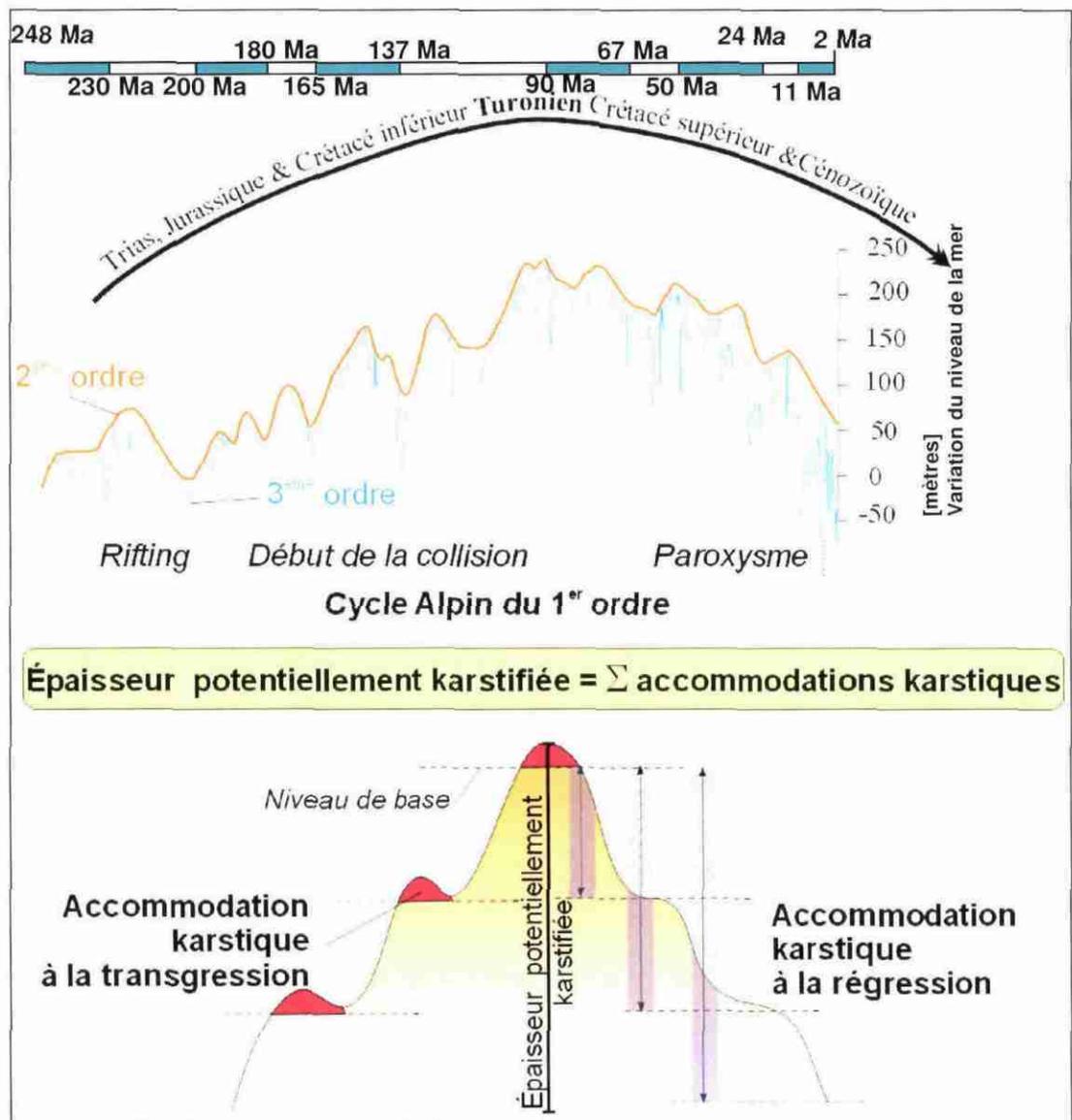


Illustration 7 : Courbe eustatique d'après Haq et al. 1987 et épaisseur potentiellement karstifiée des fenêtres à karst en fonction des variations eustatiques (modifié à partir de Aunay et le Strat, 2003).

Explication des termes de l'illustration ci-dessus :

Accommodation karstique : L'accommodation est définie comme étant l'espace disponible entre le niveau de base d'un système karstique à un âge donné et la paléosurface associée (surface d'érosion continentale des calcaires affleurants du massif calcaire du système karstique) pour une même séquence élémentaire tectono-eustatique. Elle peut être également définie comme étant l'espace disponible pour déposer des sédiments en période d'ennoyage dans les vides karstiques d'un système karstique à un âge donné.

Niveau de base : du point de vue géologique, il s'agit de l'altitude d'une couche imperméables ou moins perméable sur laquelle le développement du réseau karstique vient buter et d'un point de vue géographique, le niveau de base correspond au niveau d'un cours d'eau ou de la mer, où se déverse les eaux souterraines du système karstique.

Fenêtre à karst : localisation verticale d'une zone correspondant possédant un potentiel de karstification important, par analogie à la fenêtre à huile en exploration pétrolière des bassins sédimentaires. L'extension verticale de cette fenêtre est fonction de l'amplitude de variations eustatiques ; elle peut être amplifiée ou réduite en fonction du rôle de la tectonique (uplift ou effondrement).

Globale : intégration de l'eustatisme (court terme $\approx 10^4 - 10^5$ ans) ; **Locale** : intégration de l'eustatisme et de la tectonique (long terme $\approx 10^6 - 10^7$ ans)

Par ailleurs, les dépôts de sédiments s'effectuent depuis le Sud vers le Nord en ce qui concerne la sédimentation téthysienne (soit du Trias au Crétacé supérieur), témoignant d'un continent au Sud pourvoyeur de matériaux détritiques et d'un approfondissement du bassin vers le Nord (Rubino, 2002). Par contre en ce qui concerne le Paléogène, le Néogène et le Quaternaire, la tendance s'inverse. La vergence des dépôts dans le bassin sédimentaire est alors vers le Sud, accompagnant l'ouverture du Golfe du Lion (Illustration 8).

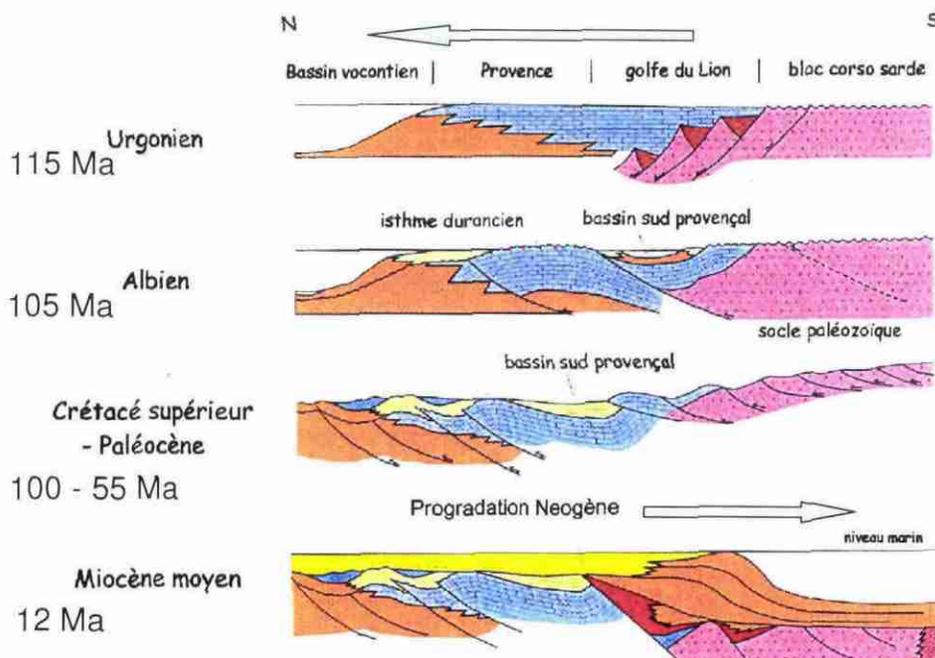


Illustration 8 : Vergence des dépôts sédimentaires (Rubino, 2002 ; Rubino, 2005) [sans échelle ; les flèches indiquent la direction des dépôts].

Trias (-250 à -203 Ma)

Régionalement, la transgression de la mer triasique sur la pénéplaine anté-triasique vient de l'Est. On assiste donc à une reprise de la sédimentation au Trias moyen et supérieur grâce à la transgression du Trias moyen qui parvient à envoyer la bordure languedocienne en discordance sur le Permien. A noter que le Trias inférieur est absent régionalement. Le point haut se situe au Sud, en tant que zone haute méridionale ou protozone (Illustration 9).

La présence de roches volcaniques (ophites du Trias pyrénéen) témoigne en la faveur de la mise en place d'un rift avorté au Trias (point haut au Sud). Un haut-fond existe donc dès le Trias au Sud.

Pendant tout le Permien et le Trias inférieur, le niveau marin est relativement constant compris entre 0 et + 50 m. La bathymétrie est relativement stable (l'eustatisme et la tectonique se compensent). Cette évolution qui se caractérise par une stabilité relative du niveau de base se traduit par le développement d'altérites sous l'action du climat associées à la création de paléosurfaces. En effet la genèse d'altérites associées aux paléosurfaces continentales nécessite de longues périodes de non incision avec comme unique moteur le climat qui joue un rôle majeur dans l'érosion des roches.

Les dépôts dans le bassin dit sub-alpin sont essentiellement des argilites sulfatées et des sulfates de calcium. Il existe également une couche carbonatée déposée au Trias moyen, appelée barre carbonatée médiane.

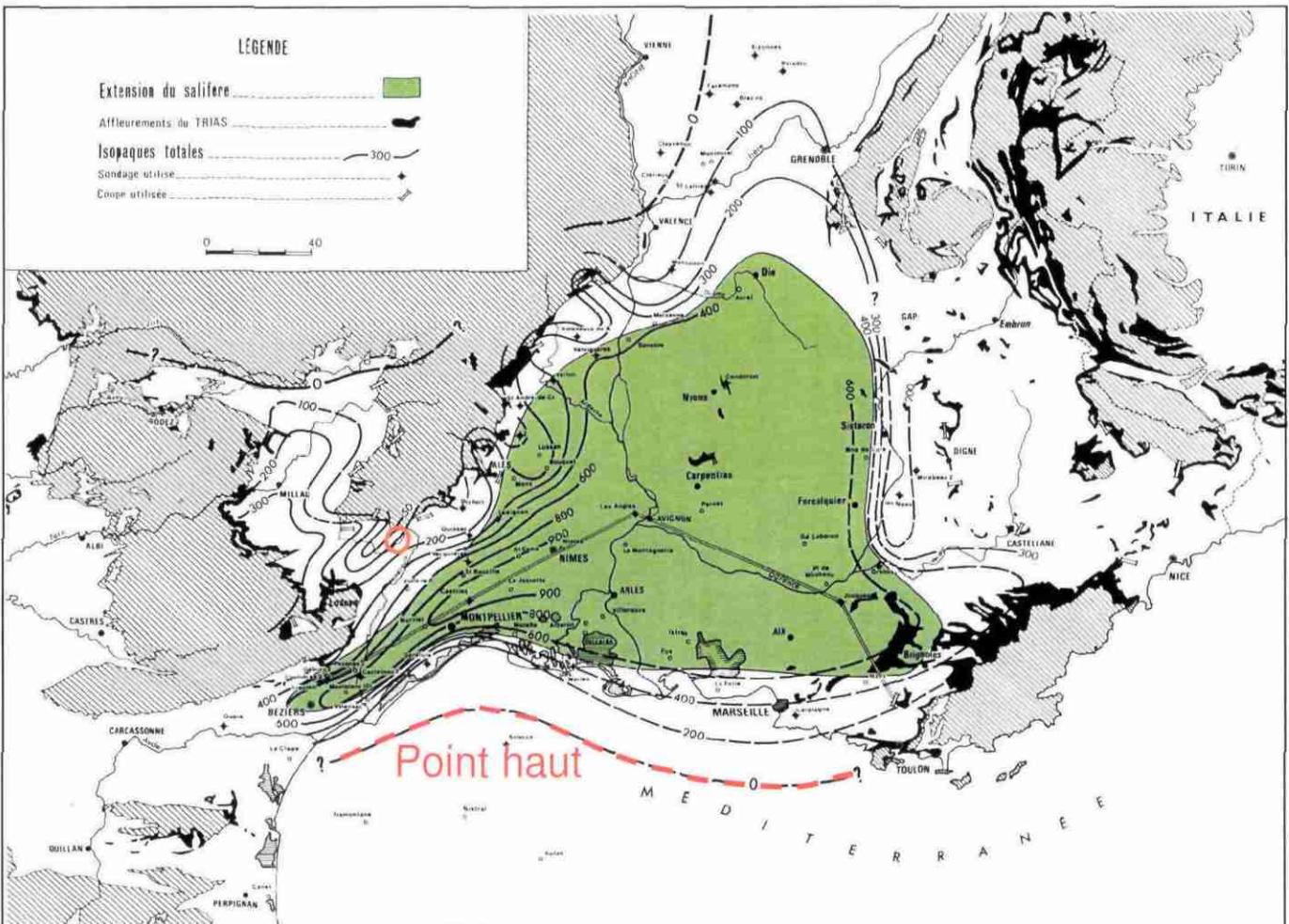


Illustration 9 : Carte d'isopaches et d'environnement sédimentaire du Trias (Baudrimont et Dubois, 1977).

Du fait de l'absence de variations importantes de la bathymétrie et du faible dépôt de roche calcaire, le Trias se caractérise par un faible développement de systèmes karstiques. Toutefois une karstification anté-Trias moyen a pris place sur les roches carbonatées cambriennes au niveau du haut-fond des Malines situé au Sud des Cévennes (cercle orange sur l'illustration ci-dessus). Par ailleurs, les dépôts d'argilites constituent une couche d'épaisseur assez constante comprise entre 100 et 300 m sur les bordures qui s'épaissit pour atteindre rapidement 500 à 600 m et dépasser 1000 m dans le centre du bassin (Illustration 9). Ces roches sédimentaires imperméables sont propices aux décollements structuraux et servent de « couches savons » lors des grandes phases structurales pyrénéennes ou alpines.

Jurassique (-200 à -135 Ma)

Durant tout le Jurassique, la forte subsidence du bassin permet l'accumulation des dépôts, installant dans le centre du bassin plus de 12 km de roches sédimentaires, alors qu'elles sont évaluées à 1,5 km sur la plate-forme languedocienne.

Lias

A l'Hettangien, la partie sud du bassin est circonscrite par un haut-fond, témoin de la persistance de la « zone haute méridionale ». La phase transgressive se poursuit lentement, la mer recouvre tout le bassin. On assiste aux dépôts de dolomie et marnes à anhydrite (Illustration 10), sous une faible bathymétrie. Du fait d'une grande homogénéité des épaisseurs de cette formation dolomitique à l'échelle de la plate-forme languedocienne, on peut parler, pour cette période, d'une phase de subsidence thermique. L'épaisseur de ces sédiments peut atteindre 300 m. Généralement elle évolue entre 200 et 250 mètres.

De l'Hettangien au Sinémurien, la transgression continue, passant d'un domaine de plate-forme interne à un domaine plus ouvert, avec des tranches d'eau plus importantes. En bordure de bassin, plusieurs phases d'émersion se succèdent suite à des régressions mineures. On assiste au développement d'une karstification dite superficielle associée à des dépôts minéralisés (Pb, Zn, ...) sur les bordures (Pérrissol, 1990). Aussi des remontées d'eaux thermales provenant des roches de socle s'effectuent au gré des failles. Les minéralisations se déposent dans les karsts dits pelliculaires situés sur les hauts fonds.

Le continent au Sud s'efface à la fin du Sinémurien suite à la crise Lotharingienne, responsable de l'approfondissement du bassin, dû à une subsidence tectonique. A partir du Sinémurien, la sédimentation est de type marine franche. Il se dépose alors des calcaires, des calcaires argileux et des marnes (Illustration 11).

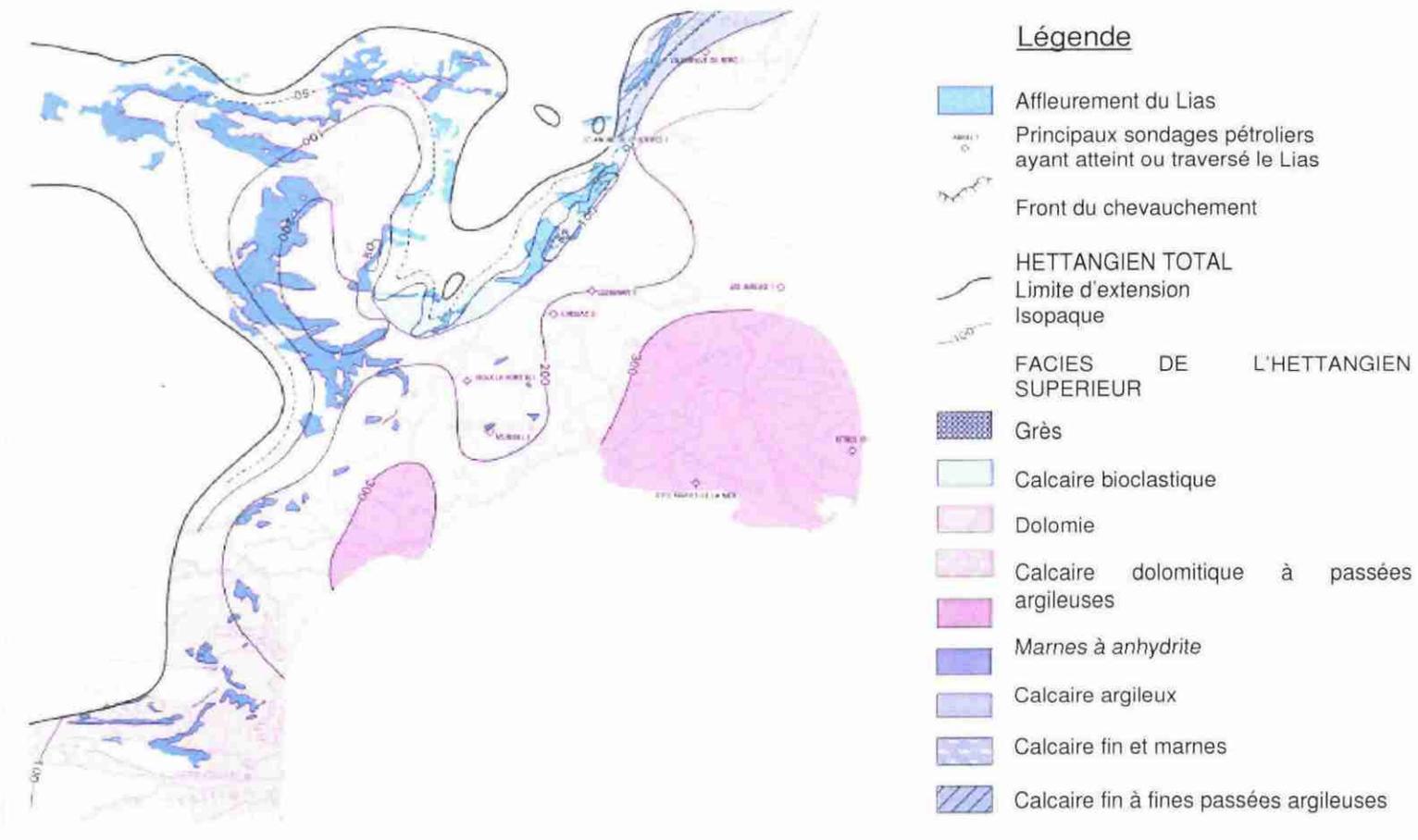


Illustration 10 : Puissance et faciès des dépôts de l'Hettangien (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984)

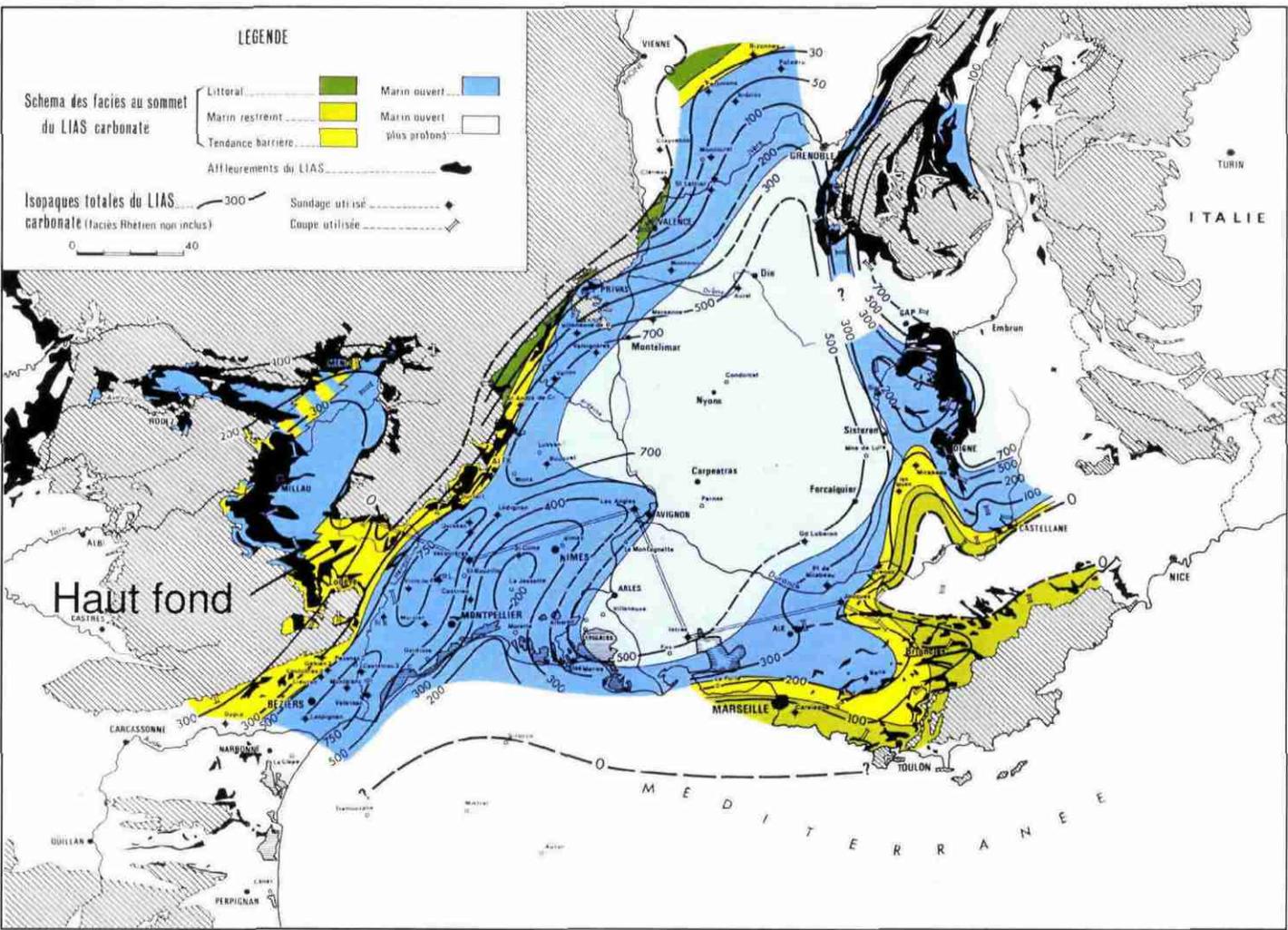


Illustration 11 : Carte d'isopaques et d'environnement sédimentaire du Lias calcaire (Lias moyen à supérieur) (Baudrimont et Dubois, 1977)

Dogger

La plate-forme se reconstitue au Dogger et on retrouve le continent au Sud. Une sédimentation de type calcaires et dolomies se met en place sur la plate-forme. Dans le bassin profond on assiste à des dépôts de marnes et argiles « Terres noires » (Illustration 12).

Au Bajocien-Bathonien, des phases d'émersions se produisent au niveau des haut-fonds. Elles sont accompagnées de karstifications intenses associées à des remplissages sédimentaires fortement minéralisés. Au Callovo-Oxfordien, une nouvelle émigration est localisée sur le haut-fond occidental, au niveau du seuil Causseard (dépôt des stipites du Larzac, dolomitisation des calcaires bajo-bathoniens).

Entre le Lias et le Dogger et plus particulièrement au Bathonien moyen la zone localisée au voisinage de l'actuelle faille des Cévennes est marquée par une phase de distension liée au rifting de la Téthys (Giot et al., 1991). Par ailleurs, la bordure Cévenole est ainsi nommée « seuil causseard » ou seuil cévenol au niveau de Madières et de sa ride sédimentaire (Gottis 1957). Elle est caractérisée par une morphologie particulière dissymétrique très caractéristique (Illustration 13). Du Lias supérieur au Jurassique moyen la sédimentation est caractérisée par des domaines sédimentaires très différenciés (Dubois et al. 1975) :

- le domaine de bassin (situé au niveau de l'actuelle faille de Nîmes) est caractérisé par la très forte épaisseur des dépôts et des successions de séquences régressives marnes – calcaires marneux ;
- le domaine plate-forme externe, avec des épaisseurs plus réduites, présente des séquences de même type ;
- Le seuil cévenol se marque par une forte dénivellation, assurée par le jeu des failles de la Bordure cévenole. En position haute ce seuil présente des érosions du Lias inférieur, la lacune du Lias supérieur et la forte réduction du Dogger.

En arrière du seuil Cévenol, le bassin des Causses présente un Lias inférieur bien développé et de type marin ouvert.

A la fin du Dogger, on souligne la présence d'une oolithe ferrugineuse associée à une dalle nacrée.

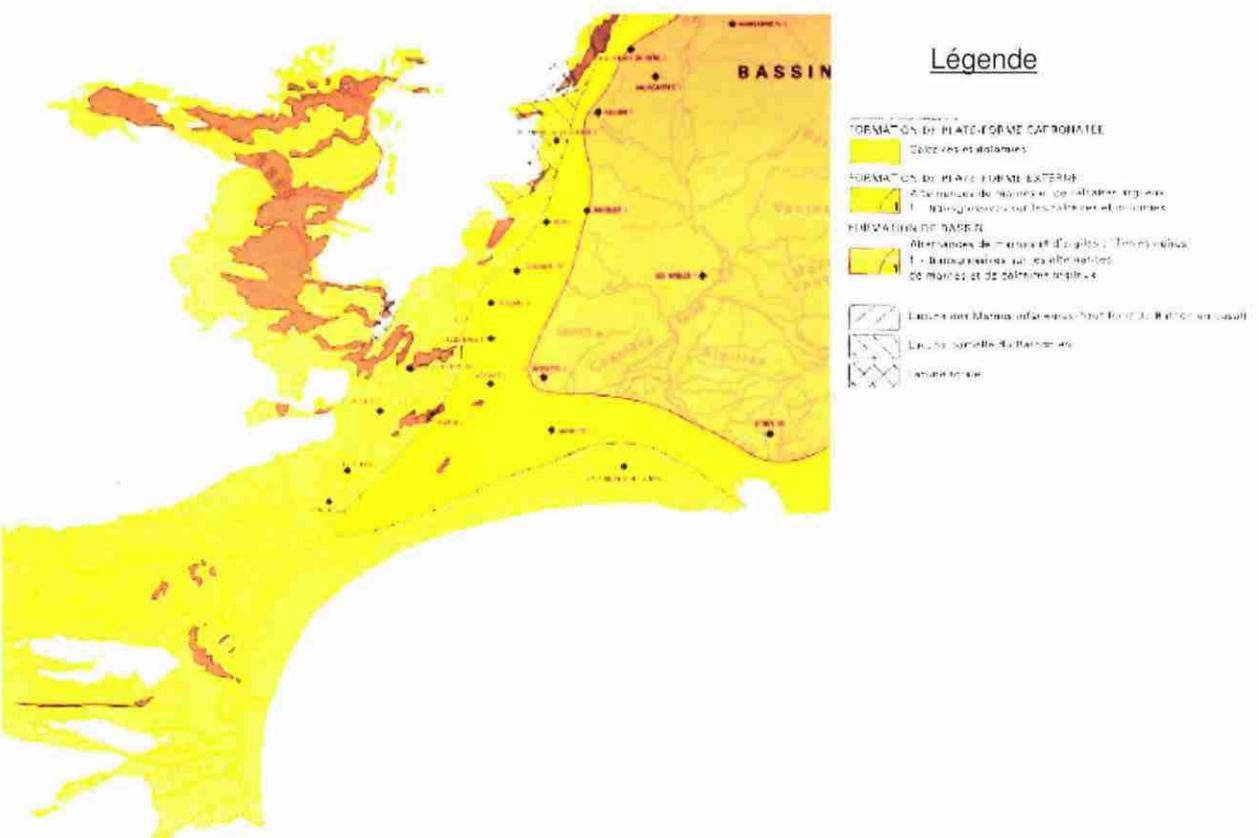


Illustration 12 : Jurassique moyen, faciès du Bathonien (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984)

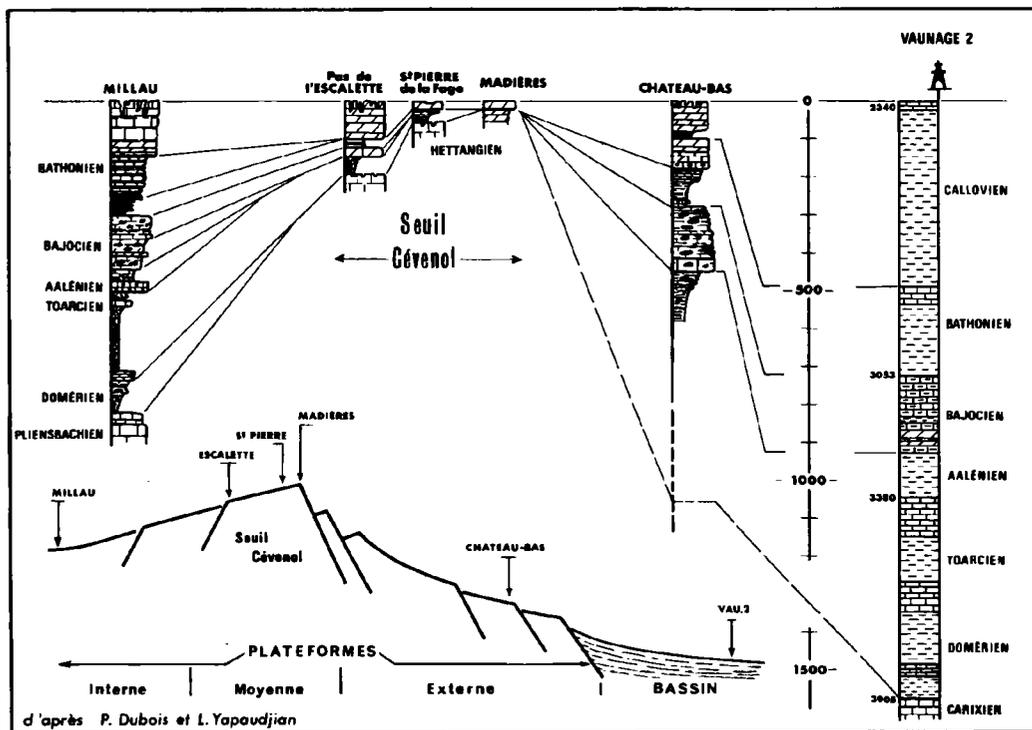


Illustration 13 : Evolution des dépôts du Lias supérieur au Dogger (Dubois et al., 1975).

Malm

La base du Jurassique supérieur (Oxfordien inférieur) est constituée, dans le bassin, de marnes (faciès Terres Noires) pouvant atteindre des épaisseurs considérables de plus de 2 000 m au cœur du bassin alpin (Illustration 14). Cette période s'est en effet accompagnée d'une forte subsidence tectonique. A l'Oxfordien moyen s'effectue le passage d'une subsidence tectonique à une subsidence thermique. La sédimentation devient alors de type plate-forme avec des calcaires, des marno-calcaires et des calcaires argileux. Les épaisseurs sont également conséquentes (Illustration 15).

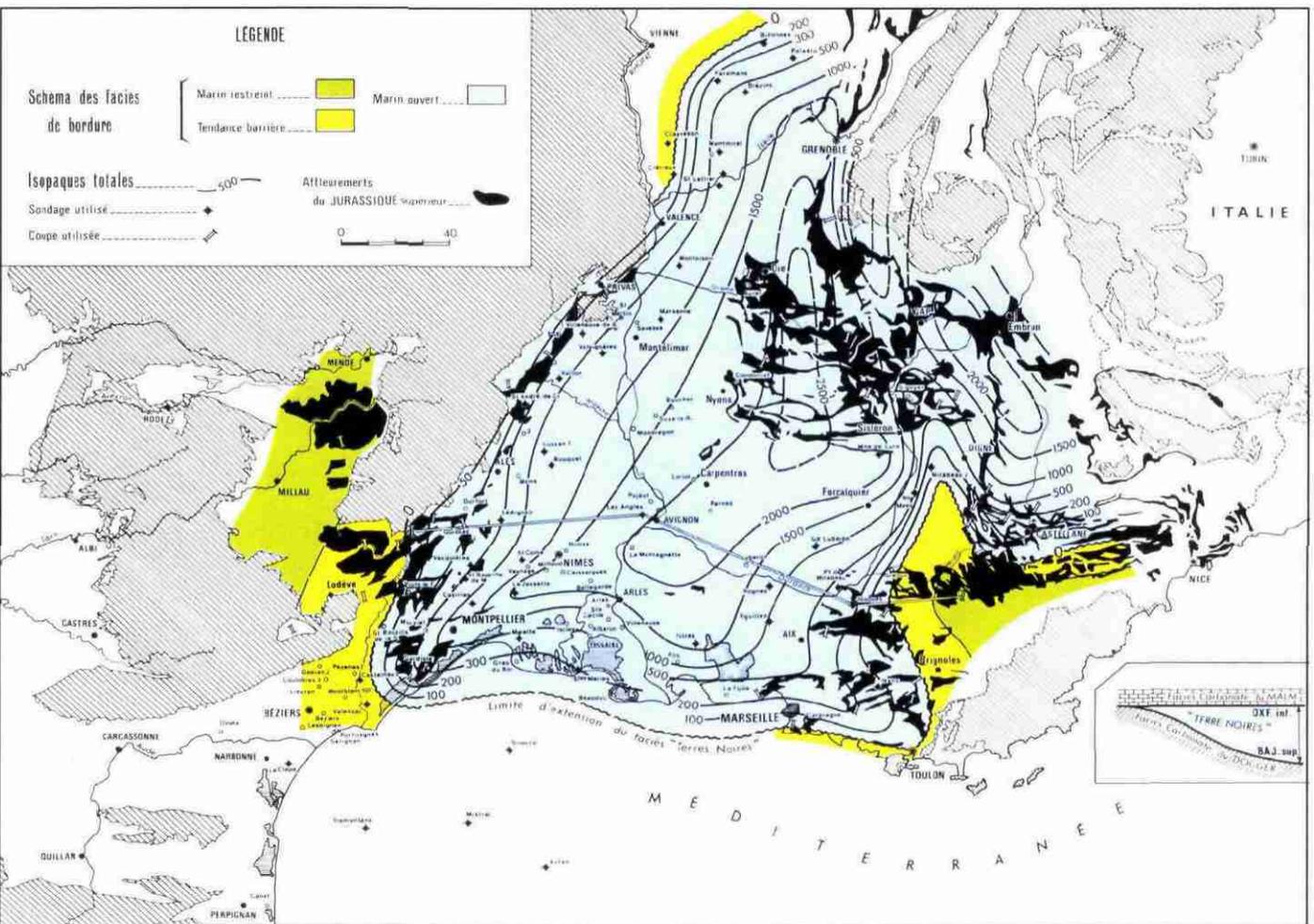


Illustration 14 : Carte d'isopaques et de faciès Terres Noires du Jurassique (Baudrimont et Dubois).

A l'Oxfordien moyen, le passage de la subsidence tectonique à la subsidence thermique est marqué par l'existence de blocs basculés qui émergent localement et donc qui ont pu être soumis à karstification ponctuellement.

Le Jurassique supérieur se caractérise, notamment au Tithonien, par la présence d'un récif corallien qui se développe sur tout le pourtour du bassin sub-alpin. Il souligne par la même occasion toutes les structures de haut-fond existantes à la périphérie du bassin, notamment au Sud, sur l'emplacement actuel du Golfe du Lion.

Crétacé (-135 à -65 Ma)

Crétacé inférieur

L'orientation du bassin, la localisation des dépôts centres et le fonctionnement sédimentaire du bassin sont modifiés. Il y a un passage du bassin sub-alpin au bassin dit Vocontien. Ce dernier s'individualise suite à un approfondissement, et à un début de réduction du bassin du Sud-Est. En Languedoc, la sédimentation est en aggradation verticale caractérisée par des faciès calcaires et calcaréo-marneux alternant, sous une bathymétrie n'excédant pas 150 m (hauteur de la dune hydraulique² de l'Hortus (Causse situé au Nord de Montpellier) au Valanginien).

La région des Causses (située en position de plateforme interne au Jurassique) est désormais pratiquement aérienne, avec les premières bauxites (Berriasien) dans la région de Bédarieux.

Il s'agit d'une période calme, le niveau marin relatif est stable. Il n'y a pas d'incision majeure sur le continent. On assiste à la formation d'altérites à partir des roches du Crétacé inférieur et probablement du Jurassique terminal, notamment au niveau de Bédarieux.

A l'Est, dans le bassin profond, les séries argilo-calcaires peu épaisses s'empilent (épaisseur totale inférieure à 500 m). Le domaine de plate-forme externe est constitué par des niveaux argileux à la base et, au sommet, des calcaires.

La zone située à l'Ouest de Montpellier (vallée de l'Hérault, Villeveyrac) pourrait avoir été émergée. Elle présente une lacune sédimentaire (érosion ou non dépôt). Cette région est ainsi marquée, dès le Crétacé inférieur, par une lacune des roches sédimentaires du Crétacé inférieur (lacune par non dépôt vraisemblable) et du Jurassique (lacune par érosion). La karstification des calcaires jurassiques dans cette zone est ainsi rendue possible dès le Crétacé. Des karsts avec remplissage de bauxite attribués à un intervalle stratigraphique entre l'Albien et le Cénomaniens ont été retrouvés notamment au niveau du bassin de Villeveyrac où ces remplissages de bauxite ont été préservés de l'érosion grâce aux dépôts de sédiments postérieurs dans le bassin continental.

² Dune hydraulique : dune formée non sous l'action du vent, mais par celle des courants marins sous la mer.

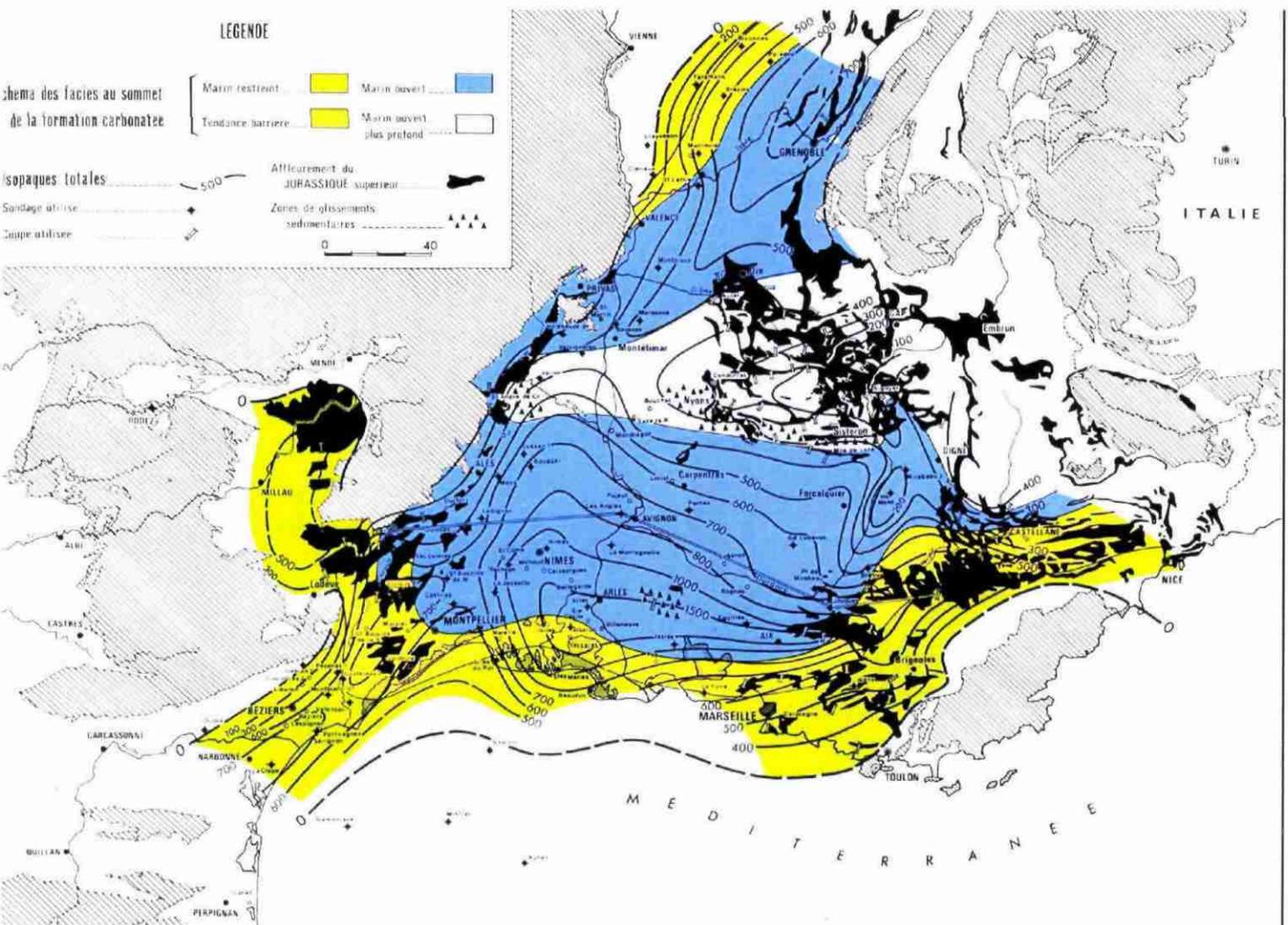


Illustration 15 : Carte d'isopaches et environnement du faciès calcaire (Jurassique supérieur) (Baudrimont et Dubois, 1977).

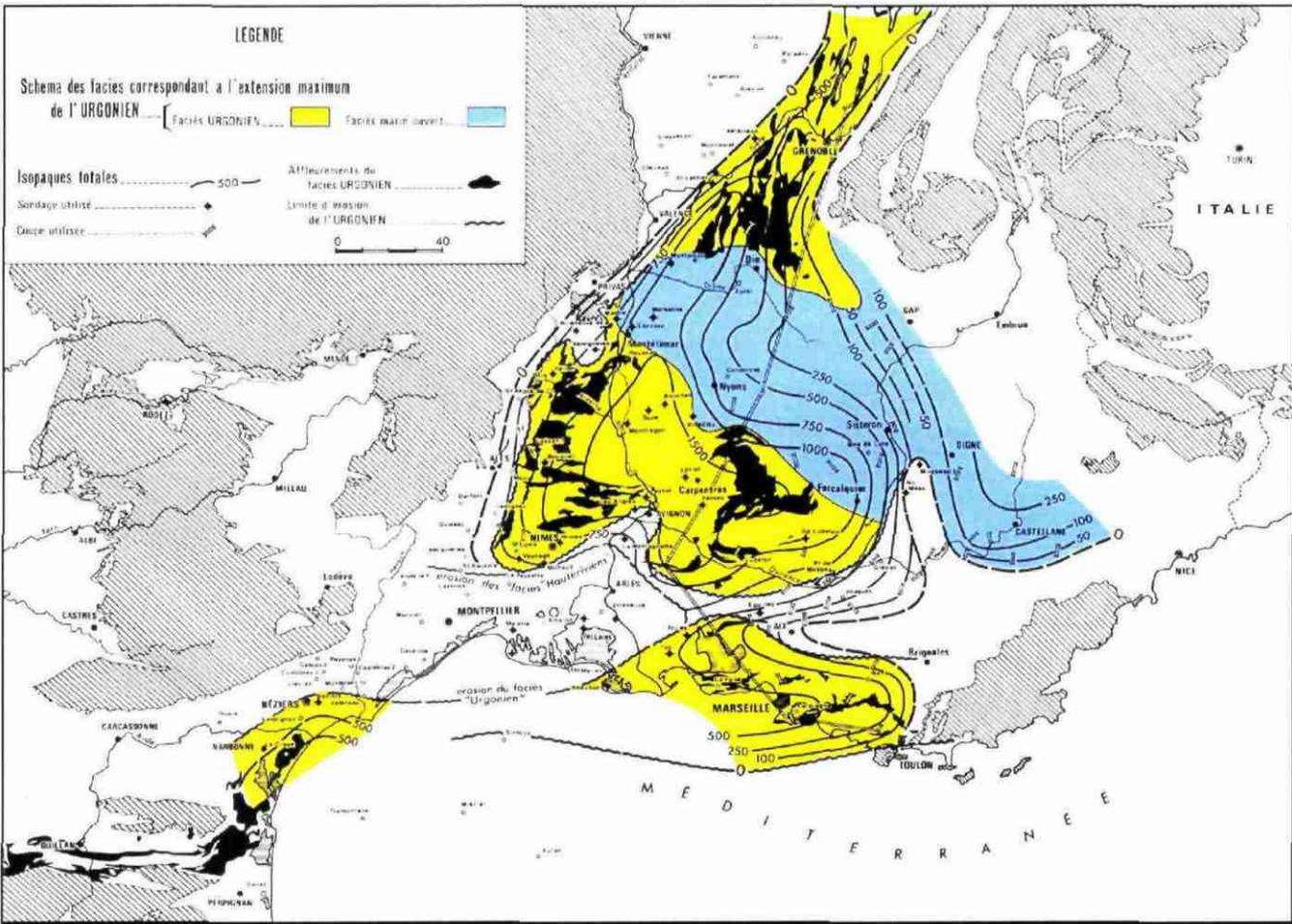


Illustration 16 : Carte d'isopaques et environnement sédimentaire au Néocomien supérieur (Baudrimont et Dubois, 1977)

La région est ainsi constituée de deux zones de « bassin » séparées par l'Isthme durancien émergé : au Sud, la zone sud-provençale, et, au nord, la zone vocontienne (Illustration 16). L'épaisseur des dépôts est faible dans les deux secteurs (moins de 600 m). La sédimentation est de type carbonaté dans la zone de plate-forme externe et argileuse dans le bassin.

A la fin du Crétacé « moyen », on assiste à un relèvement de la marge sud interrompant la sédimentation de type marin ouvert dans la zone sud-provençale. Le domaine marin persiste dans la zone vocontienne.

Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur est marqué par le début de la phase pyrénéenne. Elle fait suite à la collision entre les plaques ibérique et indo-européenne. On assiste alors à l'émergence du domaine pyrénéen (situé au Sud). Durant tout le Crétacé supérieur, la partie sud de la zone languedocienne est émergée (région Nîmes-Montpellier), permettant l'érosion et la karstification des roches sédimentaires du Jurassique et du Crétacé.

Une importante sédimentation se poursuit dans le bassin vocontien. La partie Nord de la zone Languedocienne est concernée. Plus de 1 500 m de dépôts de milieu de plate-forme externe et de bordure littorale sont piégés.

Une sédimentation continentale se produit au niveau des bassins syn-orogéniques (bassin de Villeveyrac et synclinal de l'Arc). Ces bassins (notamment celui de Villeveyrac) se remplissent de sédiments du Rognacien, de type « conglomérats et cônes alluviaux » provenant de l'érosion de la zone pyrénéenne située au Sud.

Au Crétacé supérieur, le bassin vocontien apparaît comme un bassin en cours de tectonogenèse dont la phase de paroxysme, datée du Bartonien en Languedoc, entraîne l'émergence définitive (Illustration 17). A ce sujet, de nouvelles découvertes de période de karstifications au Dano Sélandien (62-65 Ma) sont en cours d'étude (Séranne et al. 2008), qui rappelleraient dans bien des points la crise de salinité messinienne, avec cependant des amplitudes de variations du niveau de base moindres (de l'ordre de 300 m) liées à la fermeture du sillon nord-pyrénéen.

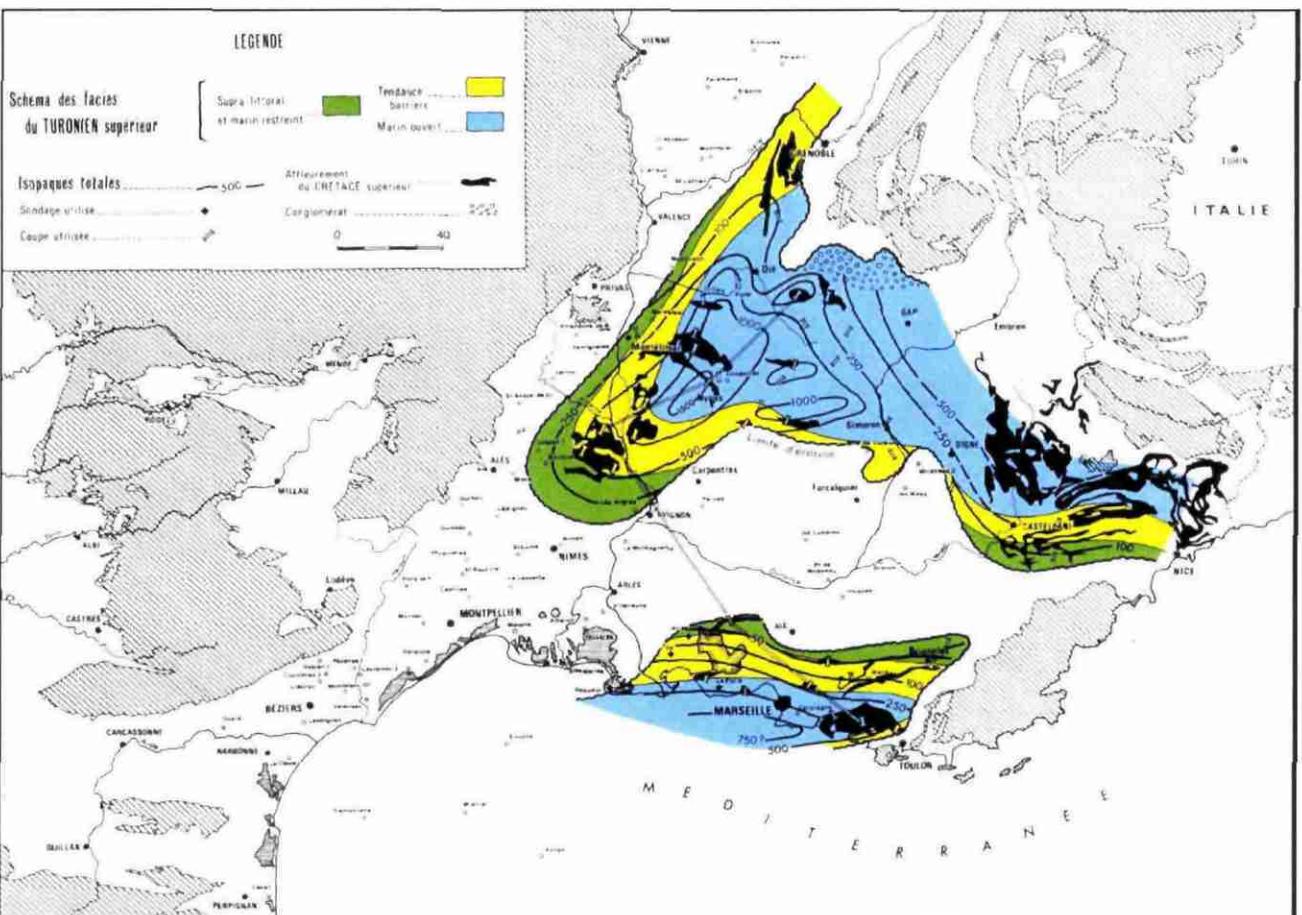


Illustration 17 : Carte d'isopaches et environnement sédimentaire du Crétacé supérieur anté-Campanien (Baudrimont et Dubois, 1977)

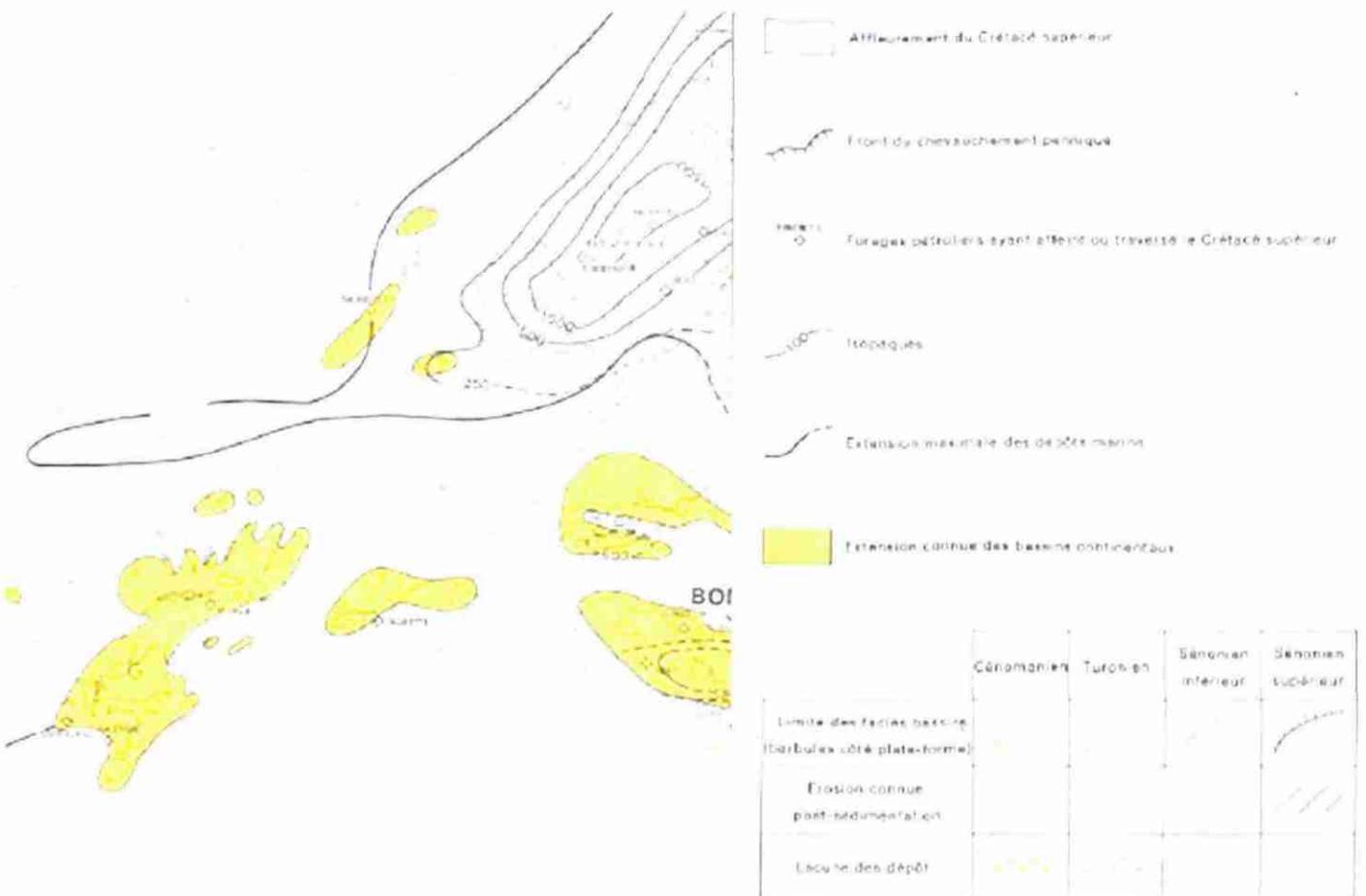


Illustration 18 : Puissance et faciès du Crétacé supérieur (Debrant-Passard et Courbouleix, 1984).

Cependant, au Sénonien, l'eustatisme global est à son plus haut niveau soit + 220 à + 250 m NGF (Illustration 9). Le toit du Causse présente des « restites » à environnements littoraux du Sénonien, attestant ainsi que la position du toit du Causse à cette époque était au moins à cette altitude. Cette remarque est importante quand on sait qu'actuellement la surface des Grands Causses du Languedoc Roussillon évolue entre + 700 et + 900 m NGF (Illustration 18).

3.3. TERTIAIRE (-65 à -2 MA)

L'ère tertiaire, contrairement à l'ère secondaire, va être marquée de grands bouleversements tectoniques associés à la structuration des Pyrénées, des Alpes et à l'ouverture du Golfe du Lion. Par ailleurs, cette période s'accompagne d'une diminution constante du niveau marin qui passe de + 220 m NGF à la fin du Crétacé aux environs de 0 m NGF à la fin du Tertiaire. Par ailleurs, il ne faut pas oublier la crise messinienne qui fait chuter le niveau de base à -1500 m et les différentes phases glaciaires qui voient le niveau de base chuter à plusieurs périodes vers -120 m NGF.

Paléocène

A partir du Paléocène, toute la zone est émergée, les sédimentations sont de type continental. L'érosion et la karstification de l'ensemble de la zone languedocienne est donc possible.

Eocène

L'Eocène est marqué régionalement par le « chevauchement dit de Montpellier » (décollement au niveau des sédiments du Trias) et par la formation de plis d'axe Est-Ouest. La faille des Cévennes joue également à cette époque (jeu éocène-oligocène moyen, Bodeur 1976). Il faut penser que la tectonique compressive accompagnée de la diminution du niveau marin est responsable de l'accroissement du potentiel de karstification sur cette région, en particulier au niveau de la zone pyrénéenne (Illustration 19).

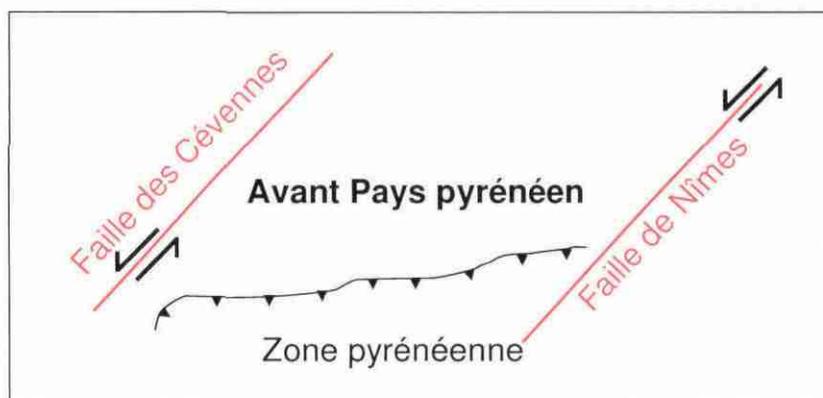


Illustration 19 : Schéma structural de la zone languedocienne.

Oligocène

L'Oligocène se caractérise par l'ouverture du Golfe du Lion. Il s'agit d'une phase extensive (rifting). Les failles compressives de l'Eocène jouent en failles normales de type listrique. Cette phase de rifting engendre la création de bassins adjacents aux accidents majeurs (bassin de l'Hérault, plaine de la Vistrenque). Le remplissage des bassins s'effectue en même temps qu'ils subsident sous l'action de la tectonique et du poids des sédiments (= remplissage synrift). La subsidence tectonique laisse ensuite place à une subsidence thermique. La plaine de la Vistrenque est ainsi constituée de 5000 m de remplissages sédimentaires déposés sous faible tranche d'eau (Illustration 20).

A l'Oligo-Miocène, existe, sur la bordure du Causse, un « Uplift » qui a pour conséquence la remontée des Causses qui passe de + 250 m NGF (Crétacé supérieur) à 400 m à la fin du Miocène moyen. Cette estimation est calculée en soutirant à l'altitude actuelle des Causses (+700 à +900 m NGF) l'uplift de la phase tortonienne soit 300 m (Ambert, 1984).

Miocène

L'évènement eustatique majeur du Miocène en matière de karstification et d'évolution du niveau de base est la crise de salinité du Messinien. Elle est liée à la fermeture structurale du détroit entre l'Atlantique et la Méditerranée suite à la remontée de la plaque Africaine. L'apport des fleuves au bassin méditerranéen étant inférieur à l'évaporation sur le plan d'eau, l'isolement de la Méditerranée a conduit à son assèchement. Ceci s'est traduit par une chute du niveau marin supérieure à 1 500 m (Ryan, 1976 ; Clauzon, 1982). La communication avec l'Atlantique est rétablie 500 000 ans plus tard, grâce à la réouverture du détroit de Gibraltar. La durée de cet épisode et les conditions climatiques de l'époque étaient favorable au développement de la karstification.

L'abaissement de plus de 1 500 m, a ainsi créé un potentiel de karstification exceptionnel qui non seulement a créé des réseaux karstiques, mais a aussi réactivé tous les réseaux karstiques développés sur les calcaires téthysiens depuis le Trias, voire les réseaux paléozoïques.

Cette crise est ainsi responsable du creusement de canyons, des changements d'orientation des drains et des galeries et des creusements de réseaux verticaux profonds dans le karst (Blanc, 1995).

La zone languedocienne a ainsi été soumise à cet énorme potentiel de karstification. Les calcaires jurassiques et crétacés ont donc pu être karstifiés à d'importantes profondeurs jusqu'à des distances en mer très éloignées du rivage actuel.

La remontée de la Méditerranée à la fin de la crise conduit tout d'abord à l'ennoiement de certains réseaux et également à leur colmatage partiel.

Enfin, on assiste aussi, en Languedoc, au poinçonnement de la couverture sédimentaire mésozoïque par le massif des Cévennes au Miocène supérieur (décalage de la paléosurface fondamentale) et à un uplift généralisé évalué entre 200 et 300 m selon les endroits (Ambert 1984).

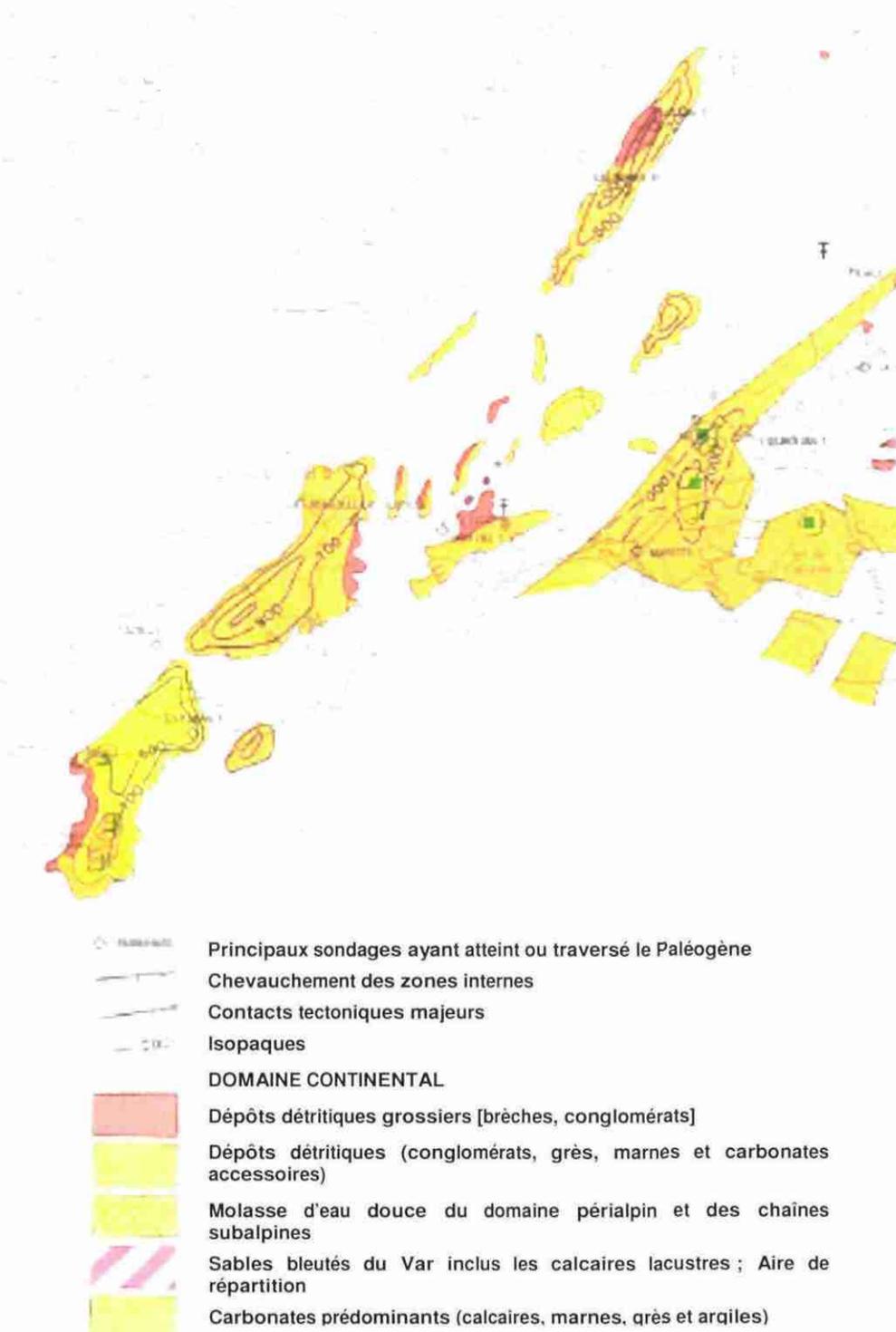


Illustration 20 : Puissance et faciès de l'Oligocène (Debrand-Passard et Courbouleix, 1984)

3.4. QUATERNAIRE

Le Quaternaire est marqué par des oscillations climato-eustatiques cycliques induisant de fréquentes chutes eustatiques pouvant atteindre – 120 m NGF. Elles permettront la mise en place de karstifications récentes ou la réactivation de réseaux profonds hérités de la crise messinienne.

3.5. SYNTHÈSE

Du Trias au Jurassique, la zone Languedocienne est entièrement submergée. Les variations eustatiques sont faibles et la région connaît une période tectonique calme, essentiellement subsidente. Les dépôts d'argilites sulfatées et à sulfate de calcium du Trias moyen et supérieur interviennent en discordance sur le Permien. Leur épaisseur est comprise entre 100 et 300 m sur les bordures et dépassent 1 000 m au cœur du bassin sub-alpin. Au Jurassique, les dépôts sont de type calcaire, dolomie et calcaire argileux au niveau de la plate-forme et marneux dans le bassin profond. La forte subsidence permet l'accumulation de plus de 12000 m de sédiments au cœur du bassin. Du Trias au Jurassique, les variations eustatiques sont de faible amplitude. Seules les zones proches des hauts-fonds sont affectées par des émergences lors des régressions marines (de faibles amplitudes). Il s'ensuit une érosion et une **karstification** sur ces zones. Elles restent **faiblement développées spatialement**.

Au Crétacé, la position du bassin est modifiée, on passe du bassin sub-alpin au bassin dit Vocontien. La sédimentation est de type argilo-calcaire. Les zones des Causses et sud-Languedocienne sont émergées. Il se produit alors de l'érosion et un développement de la **karstification** sur ces zones. Des bassins continentaux se mettent également en place au Crétacé supérieur. Dans le bassin, la sédimentation se poursuit. On assiste à une migration vers le nord du bassin au Crétacé supérieur. La région Nîmoise est ainsi submergée au Crétacé inférieur puis émergée au Crétacé supérieur, permettant le développement de la karstification des calcaires du Crétacé dès cette période. **A la fin du Crétacé, le bassin est totalement émergé.**

Le Tertiaire est caractérisé par de grands bouleversements **tectoniques**, avec d'abord à l'Eocène une phase compressive associée à la structuration des Pyrénées. Elle aura pour conséquence d'abord la formation de reliefs et ensuite le **développement de la karstification des roches jurassiques et crétacées**. Il s'ensuit une phase de rifting à l'Oligocène liée à l'ouverture du Golfe du Lion, durant laquelle les bassins sédimentaires se remplissent.

Au **Miocène**, suite aux événements tectoniques alpins et à la crise de salinité du Messinien, le **potentiel de karstification atteint son paroxysme**. Il laisse entrevoir la formation et la réactivation des karsts très profonds sous le niveau de la mer actuel et sur toute la région, jusque probablement très loin du rivage actuel.

Enfin, au **Quaternaire**, les variations eustatiques liées aux glaciations ont également permis le **développement de la karstification de cette région**. Cette dynamique

réactive sans aucun doute **les anciens réseaux karstiques**, notamment ceux hérités de l'événement messinien.

En ce qui concerne les karsts, il faut souligner qu'au-delà de l'importance de la crise messinienne dans le rôle qu'elle a joué pour la création ou réactivation de karsts (il faut 10000 ans pour créer un Karst, Bakalowicz, 1986, et la crise messinienne a duré 500000 ans), la disposition des géométries calcaires est tout aussi majeure. En effet, les calcaires, qu'ils soient paléozoïques (cambriens ou dévoniens) ou mésozoïques, sont tributaires directement de leur disposition à l'intérieur des différents bassins et ensembles lithotectoniques que l'on examine. La disposition spatiotemporelle des karsts est fonction non seulement des « fenêtres à karsts » ou potentiel d'accommodation karstique, mais aussi des géométries des formations carbonatées. Il apparaît donc nécessaire : (i) d'identifier les intervalles de temps durant lesquels se sont développées des plate-formes carbonatées, (ii) d'évaluer leur répartition spatiale et les variations latérales et verticales des faciès et (iii) de comparer les périodes de formation des plateformes calcaires et les périodes à « fenêtres à karsts ».

Une question se pose ainsi pour la compréhension des aquifères karstiques sous couverture : où et comment s'expriment leurs paléo-exutoires ? Un début de réponse nous est donné par l'analyse de la sismique offshore du Golfe du Lion où l'on peut voir (Lofi comm. orale) des surfaces d'effondrement au niveau du substratum calcaire (cavités karstiques s'effondrant sous le poids de la charge sédimentaire (entre autres facteurs car une influence géothermale n'est pas à exclure)) en générant dans la couverture paléogène et néogène des déformations synchrones de leurs dépôts. Ces structures pourraient correspondre à d'anciens exutoires de ces karsts actuellement sous couverture. A terre, ces objets peuvent s'apparenter à des effondrements comme celui de l'œil doux sur la Clape et générer des dépressions dans la couverture sédimentaire qui peuvent encore être soulignées géo-morphologiquement par des dépressions quaternaires gravitées, accusées par les déflations éoliennes (étang de Montady par exemple). A ce titre, il est très intéressant de consulter les cartes géomorphologiques d'Ambert 1994 qui soulignent en Languedoc et en Provence l'ensemble des dépressions éoliennes quaternaires pouvant potentiellement être liées à des effondrements initiés par des karsts dans le mésozoïque et ayant des conséquences gravitaires dans les séries sur-incombantes.

Des tableaux de synthèse de l'évolution du karst intégrant les variations eustatiques (courbe eustatique mondiale) ainsi que des événements géodynamiques, permettent d'identifier des périodes en faveur du développement de réseaux karstiques ; ils viennent compléter la synthèse décrite ci-dessus concernant l'évolution paléogéographique. Ces tableaux sont extraits des travaux menés par le BRGM dans les Corbières Orientales et sur la région nîmoise. L'examen des tableaux de synthèse concernant l'évolution des systèmes karstiques languedociens au Mésozoïque inférieur ainsi que du Crétacé inférieur au Quaternaire (Illustration 21 et Illustration 22), permet d'identifier les périodes de karstification concernant les dépôts sédimentaires calcaires présents et identifiables au niveau des profils sismiques réinterprétés. Le potentiel de karstification théorique est de +120 m à +150 m, ce qui correspond aux variations du niveau de base en lien avec les variations de niveau eustatique, pour la période du Jurassique supérieur (Malm). Au Crétacé supérieur, le potentiel de karstification

théorique est de +250 m. La karstification est associée aux immersions sur l'isthme durancien, particulièrement en fin de la période du Crétacé. Au Tertiaire inférieur (Paléocène), les réseaux de conduits karstiques se développent de manière préférentielle verticalement, le potentiel de karstification théorique est de +80 m. Le niveau de base varie entre +170 et +210 m. A l'Oligocène, le potentiel de karstification théorique est de +40 à 50 m, le développement de réseaux horizontaux est préférentiel. Au Miocène supérieur, des chutes du niveau marin prennent place, avec notamment la fermeture du détroit de Gibraltar et la crise de salinité. Les réseaux karstiques se développent dans la verticalité. Le potentiel de karstification théorique maximale est de -1500 m.



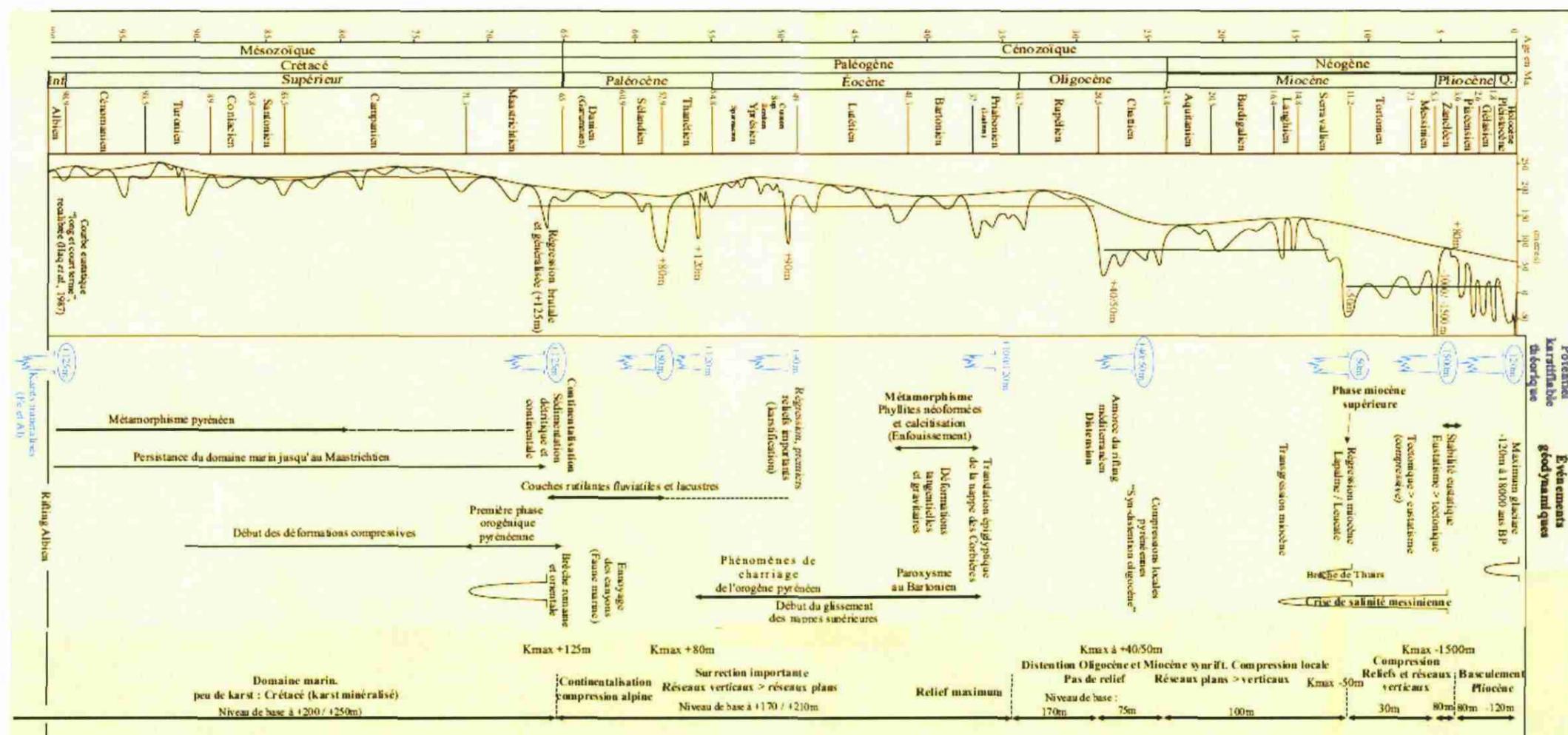


Illustration 21 : Tableau de synthèse de l'évolution géodynamique et eustatique des formations carbonatées pour les Karsts du Languedoc du Crétacé supérieur au Quaternaire (tendance régressive du cycle alpin du 1^{er} ordre) (modifié d'après Aunay et Le Strat, 2002)



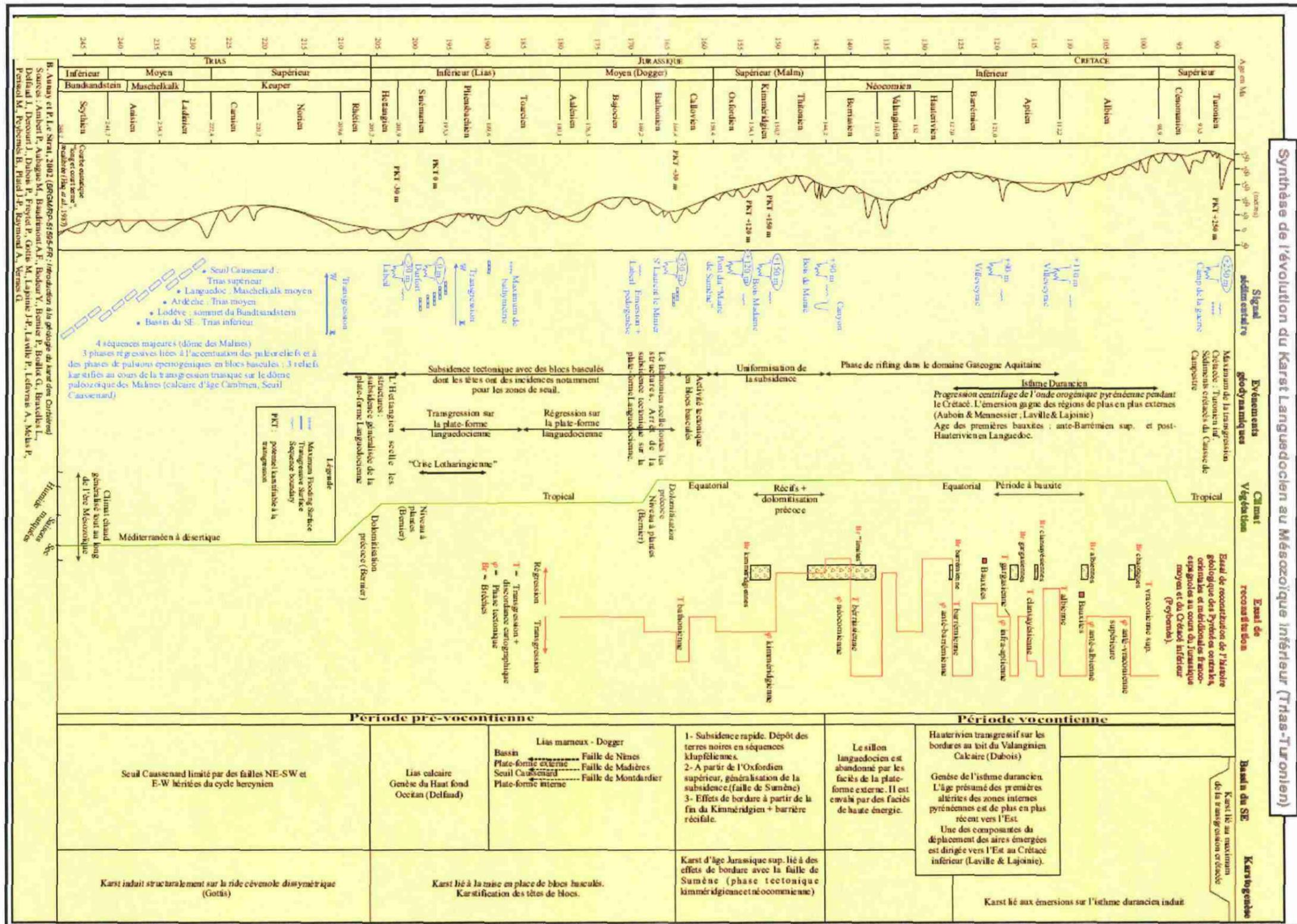


Illustration 22 : Tableau de synthèse de l'évolution géodynamique et eustatique des formations carbonatées (modifié d'après Aunay et Le Strat, 2003) pour les Karsts du Languedoc au Mésozoïque inférieur

4. Interprétation des profils sismiques

4.1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique utilisée pour l'interprétation des profils sismiques retraités a pour objectifs :

- d'une part de reconstituer la géométrie du toit des formations carbonatées et d'identifier les principaux accidents à partir du pointé sismique calé sur des données de forages et sur la base des travaux antérieurs disponibles faisant référence à des modèles structuraux de mise en place de la marge carbonatée, et
- d'autre part de pouvoir réaliser une carte du remplissage sédimentaire synrift.

En complément, une nouvelle interprétation géologique est proposée sur un total de 9 profils, en prenant pour hypothèse de base un modèle gravitaire de mise en place de marge sur socle ainsi qu'à des analogues de terrain observés du Nord au Sud de la région, c'est-à-dire des Cévennes jusqu'au domaine offshore au niveau d'Agde. La recherche d'objets géologiques étayant l'hypothèse d'un modèle gravitaire est une piste de recherche nouvelle et intéressante pour l'identification de zones favorables à la présence des karsts sous couverture. Ces objets situés à proximité d'accidents structuraux importants sont très probablement caractérisés par une amplification de la fracturation, favorable à une karstification.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche ; si les résultats sont validés par l'observation d'analogues sur le terrain, notamment au droit de certains profils sismiques, ils devront faire l'objet d'observations complémentaires au niveau de forages de reconnaissance sur des sites « cibles » proposés. L'implantation des forages devra être définie à partir d'investigations géophysiques détaillées complémentaires (par ex. sismique réflexion haute résolution sur un carré de 1km x 1km).

4.2. DONNEES UTILISEES ET CONSTITUTION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES

Les données disponibles sur le secteur d'étude sont de quatre types (Illustration 23) :

- les cartes géologiques fournissant un inventaire des formations à l'affleurement et des principaux accidents reconnus en surface ;
- les forages profonds (forages pétroliers), peu nombreux, permettent une reconnaissance de la succession géologique et servent de base pour le calage stratigraphique des horizons reconnus sur les profils sismiques ;

- les profils sismiques : ils donnent une image réelle en temps de la géométrie des formations géologiques ;
- la bibliographie existante sur des profils sismiques déjà étudiés au préalable.

Nous avons utilisé l'ensemble de ces données dans cette étude. Les profils sismiques des campagnes Hérault 1983, 1984 et 1985 ont fait l'objet d'un retraitement qui a permis une amélioration considérable de l'image sismique et de mieux appréhender l'évolution et la mise en place du Bassin de l'Hérault. Les profils analogiques, seules données disponibles dans le secteur d'Uzès, et mis sous format numérique ont été pour la première fois retraités. Malgré la faible couverture de ces anciens profils, l'image obtenue a permis d'avoir une information sur ce secteur.

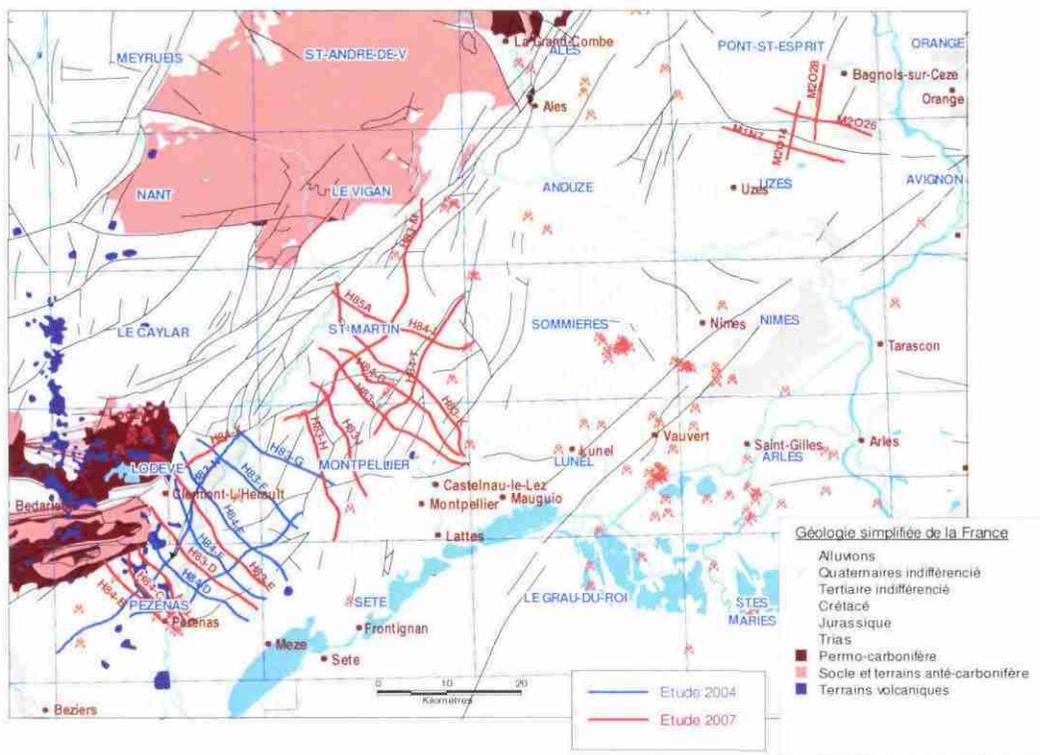


Illustration 23 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symbole rouge) sur fond géologique simplifiés au 1/1 000 000.

4.2.1. La sismique réflexion disponible

Principes généraux de l'acquisition sismique

Le dispositif d'acquisition se compose d'une source acoustique et d'une chaîne de géophones qui servent de capteurs à la réponse acoustique. A partir de la surface, une source (en général des camions vibrateurs, parfois des petites charges d'explosif) génère des ondes acoustiques qui pénètrent dans le sous-sol. Ces ondes :

- se propagent de haut en bas à travers les différentes couches ;
- se réfléchissent sur certaines couches (en général, les principales discontinuités lithologiques) ;
- remontent en surface où elles sont reçues par un dispositif constitué de capteurs (géophones) et transmises à un camion laboratoire.

Historique

Le Languedoc dispose d'un dispositif pétrolier significatif (gisement de Gabian (30 000 tonnes de réserves estimées dans le Trias moyen), indices du bassin d'Alès (Saint-Jean-de-Maruejols)) et de ce fait a fait l'objet de nombreuses recherches. C'est dans cette région qu'est foré en 1938 le premier forage rotary profond en France sur la structure du Pic Saint-Loup.

Pendant la deuxième guerre mondiale, l'équipe de Pechelbronn repliée en zone libre va créer en 1941, la SREMI qui deviendra en 1944 l'active SNPLM (Société nationale des Pétroles du Languedoc Méditerranéen). L'exploration repose au départ sur la géologie de surface et s'appuiera sur la sismique à partir de 1951. La SNPLM réalise jusqu'en 1954, 40 forages montrant de petites venues d'huiles sur Gabian et Saint-Jean-de-Maruejols et des venues de méthane et de CO₂ ainsi que des réservoirs compacts dans les parties plus profondes (forages de Vaunage et Lussan). Il convient cependant de noter que de nombreux forages sont arrêtés pour des raisons techniques avant d'avoir atteint les objectifs et que la définition de la sismique reste ainsi incertaine, non calée. A la suite, en 1962, l'exploration du bassin de Lodève n'aura pas plus de succès.

L'exploration redémarre au début des années 80 sur les permis Languedoc opérés par SNEAP et le permis Hérault opéré par TOTAL. Ces acquisitions sismiques modernes de bonne qualité sont un apport majeur qui éclaire les structures profondes du Mésozoïque qui sont les objectifs pétroliers. Les résultats peu encourageants des forages exécutés sur ces prospects conduiront à l'abandon des permis d'exploration.

Le BRGM dispose et gère depuis quelques années la base de données des profils sismiques enregistrés sur le territoire français (environ 350 000 kilomètres). Ces profils opérés pour la plupart dans le cadre de l'exploration pétrolière permettent après retraitement d'obtenir une coupe temps en continu des niveaux géologiques superficiels (à partir de 50 mètres de profondeur). Elle précise l'image structurale (déformations, failles) et contraint le modèle géologique dans les zones complexes.

Le profil sismique fournit une image temps de la géométrie des terrains, qui ne reproduit pas fidèlement la configuration spatiale du sous-sol. Afin de disposer d'une coupe géologique, il faut procéder à la conversion des temps en profondeur par le biais des vitesses sismiques (vitesse de propagation des ondes acoustiques dans les terrains, variables selon la lithologie).

Le statut des données sismique est public au terme d'une période de 10 ans à partir de la date d'enregistrement mais porte uniquement sur les données brutes (tirs bruts non

additionnés enregistrés sur le terrain). Ces données terrain nécessitent d'être retraitées pour obtenir une section sismique interprétable. Le BRGM dispose des compétences (personnel et station d'interprétation) pour :

- organiser et superviser les retraitements sismiques ;
- interpréter les profils sismiques.

Le retraitement sismique a consisté en :

- la sélection des profils représentatifs des zones complexes et structurées (failles, déformations) sachant que , sur la zone du projet, la quantité de profils récents disponibles est d'environ 1000 kilomètres ;
- le déstockage des données brutes (enregistrements des tirs, et documents terrain) auprès des opérateurs pétroliers ;
- le retraitement suivant une séquence comprenant entre autre la validation des corrections statiques, dynamiques, des mutes, de la déconvolution ;
- la supervision du retraitement par nos soins.

Le traitement a pour but d'additionner les tirs unitaires enregistrés sur bandes magnétiques au niveau du camion laboratoire. Après traitement dans un centre de calcul spécialisé, on obtient une section sismique qui donne une image du sous-sol à la verticale du profil. Les phases principales du traitement sont :

- la saisie des coordonnées des géophones et points de tir ;
- la mise en collection des points miroirs : un même point miroir théorique est atteint par différents trajets qu'il convient de sommer (principe de la couverture multiple) ;
- la déconvolution dont le but est de « nettoyer » le signal ;
- le calcul des corrections statiques. Elles corrigent l'effet des variations verticales et latérales de vitesses des terrains de surface et ramènent les temps à un plan horizontal appelé datum plane. On distingue les corrections statiques primaires calculées à partir des mesures de vitesse sur la mission (carottages VT) et les corrections statiques résiduelles calculées à partir de logiciels spécialisés ;
- les corrections dynamiques qui corrigent les réflexions générées par les couches géologiques de la courbure liée à l'éloignement entre le point d'émission et le capteur ;
- la migration qui replace les réflexions en position vraie.

Les produits finaux comprennent :

- les sections papiers dans leur version migrée ;
- les fichiers SEG Y des versions migrées utilisables sur station d'interprétation.

Les sections sismiques ont été calées à partir des forages existants, pointées et intégrées dans la cartographie.

4.2.2. Les données géologiques disponibles

a) Constitution d'un SIG (cf annexe 1)

Un système d'information géographique et géologique a été constitué à l'aide du logiciel Mapinfo. Ce SIG contient les informations relatives aux forages pétroliers (profondeur, lithologie), les isobathes des formations carbonatées issues d'études antérieures, des coupes géologiques interprétatives issues de la littérature ainsi que la position des profils sismiques, le tout sur un fond cartographique géologique.

b) Forages pétroliers

Dans la région étudiée, une quinzaine de forages pétroliers ont permis le calage de certaines lignes sismiques. Cependant, l'ensemble des données disponibles sur la profondeur du niveau cartographié a été utilisé dans la réalisation de la carte d'iso valeurs produite.

Le peu d'information sur les vitesses des séries recoupées en forage constitue également un facteur limitant dans la conversion du pointé en temps des horizons sur la sismique en profondeur. Le calage des autres forages a été réalisé en prenant en première approche les vitesses moyennes déduites du forage de Lieuran1, ou une courbe Temps/Profondeur était disponible.

Les fiches récapitulatives de certains forages sont données en annexe 1.

Les forages disponibles sont:

Lieuran1, Coulobres1, Sevian1, Pézenas2, Pézenas3, Castelnaud3, Saint Saturnin de Caux1, Saint Bazille de la Sylve1, Murviel1, Viols le Fort101, Saint Loup1, Saint Loup2, Vacquières1, Saint Hyppolyte du Fort1D, Lodève2, Lussan1 et Bouquet1.

4.3. INTERPRETATION DES PROFILS SISMIQUES

4.3.1. Pointé des horizons et des failles

L'ensemble de l'interprétation sismique s'est focalisé sur le pointé de la base tertiaire, et des failles affectant cet horizon, zone cible de l'étude. Nous avons également réalisé un écorché anté-tertiaire en différenciant le Jurassique et le Crétacé.

L'interprétation est basée sur : (i) les affleurements à partir de la carte géologique (1/50 000 et 1/250 000) afin de localiser les bassins tertiaires, les plis, failles et vallées ; (ii) les puits profonds (avec ou sans calage du temps en profondeur) afin d'identifier la succession lithostratigraphique, les failles, discordances et signatures acoustiques ; (iii) la géométrie des principaux réflecteurs et relations géométriques afin d'identifier les

failles et discontinuités et (iv) la comparaison avec les interprétations publiées auparavant.

Les lignes sismiques retraitées font clairement apparaître le remplissage synrift en discordance et en onlap sur les séries mésozoïques. Ce remplissage contraste fortement avec son substratum. Il est caractérisé par des réflecteurs sismique continus, de forte amplitude alors que l'encaissant présente un caractère plus chaotique et de continuité latérale faible. L'ensemble prérift/synrift est affecté par de nombreuses failles.

Tous les forages présents dans la zone ont été utilisés pour le calage des différents horizons identifiés. Certaines interprétations proposées par Maërtén (1994), Serrano et Hanot (2005) pour la basse vallée de l'Hérault, ou Benedicto (1996) pour la zone du Lez, ont été prises en compte lors de l'interprétation des profils sismiques.

a) Interprétation de la basse vallée de l'Hérault

La zone de la basse vallée de l'Hérault est couverte par 13 profils (Illustration 26), dont 7 précédemment interprétés par Serrano et Hanot en 2005, (profils H83F, H83G, H83N, H84D, H84E, H84F, H84W) lors de l'étude BRGM/RP – 53733-FR (Le bassin Oligo-Miocène de l'Hérault : un exemple de rétro charriage des structures pyrénéennes. Implications hydrogéologiques) et 4 interprétés par Maërtén en 1994 (H83C, H83D, H83E, H83N). Ces profils sont transverses au bassin et montrent sa structure asymétrique.

La tectonique pyrénéenne affecte deux ensembles lithologiques superposés de propriétés mécaniques très différentes : il s'agit d'une part du socle paléozoïque et d'autre part d'une couverture sédimentaire principalement mésozoïque. Les deux ensembles sont séparés par un niveau de décollement constitué d'argiles évaporitiques du Trias (Arthaud et Séguret, 1981).

Les profils sismiques, de direction NW-SE recoupent les accidents de la faille des Cévennes au Nord, et les structures chevauchantes du pli de Montpellier au Sud. La partie centrale des profils traverse le bassin tertiaire de l'Hérault. Les chevauchements représentés sur les coupes sont des rampes latérales qui s'enracinent dans le Trias plastique. Certaines rampes latérales des chevauchements pyrénéens ont été reprises en failles normales. Ces failles normales listriques³ à pendage SE s'enracinent dans des paliers au niveau du Trias et du Lias marneux. Le style tectonique de la coupe H83-E diffère de celui des autres coupes. Un pallier dans les séries du Lias marneux au Sud de la faille des Cévennes est observé. Ce pallier est relié vers le SE, au décollement dans le Trias par l'intermédiaire d'une rampe dans les séries hettangiennes. Le remplissage sédimentaire oligo-miocène est en « onlap » sur le flanc NW du bassin, plusieurs discordances sont visibles dans le remplissage sédimentaire.

³ Faille listrique : Une faille listrique est une faille normale de grande extension spatiale (plusieurs kilomètres) qui est concave en profondeur. Cela implique un niveau de cisaillement en profondeur. La forme de ces failles est à relier au concept de bloc basculé.

La géométrie du bassin synrift est compatible avec une faille normale en rampes et paliers (Illustration 24).

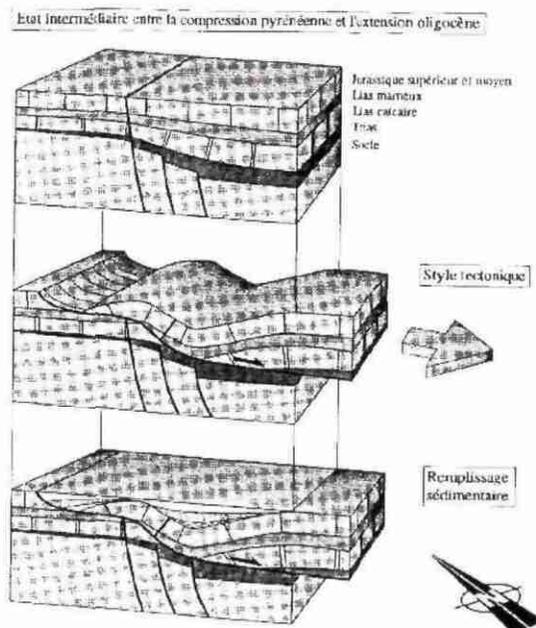


Illustration 24 : Modèle d'extension par tectonique de couverture sur décollement (Maërtens, 1994)

Les décollements et la formation des rampes sont contemporains à la formation du bassin et provoquent d'importantes variations d'épaisseurs dans les séries synrifts. L'interprétation donnée par Maërtens est la suivante : une zone de transfert de direction NE-SW sépare le bassin tertiaire en deux sous-bassins de structure tectonique différente. La formation du sous-bassin nord est due à un décollement dans les séries du Lias marneux relié à un décollement dans le Trias par l'intermédiaire d'une rampe dans les séries calcaire liasiques. La formation du sous-bassin sud est due à une extension par tectonique de couverture, par une série de failles listriques s'enracinant dans le Lias marneux et le Trias.

Les interprétations réalisées des différents profils de la vallée de l'Hérault par Serrano et Hanot en 2005 (BRGM RP-53733-FR) mettent en évidence la présence de grandes failles listriques au niveau des séries jurassiques. Ces failles affectent les séries synrift de l'Oligo-Miocène. La structure profonde n'est toutefois pas interprétée.

Cette interprétation prend en considération selon Maërtens (1994), à la fois la tectonique compressive (pré-rift) et une tectonique extensive (synrift). L'épisode compressif a structuré les séries jurassiques avec la mise en place de plis et chevauchements en direction du Nord (Illustration 25). L'évolution de la zone s'est ensuite faite en extension, ayant pour effet de réactiver les anciens plans de chevauchements pyrénéens en faille normale. La structure en rampe et palier annoncée par Maërtens, n'a pas été identifiée pas Serrano et Hanot à partir du pointé sismique.

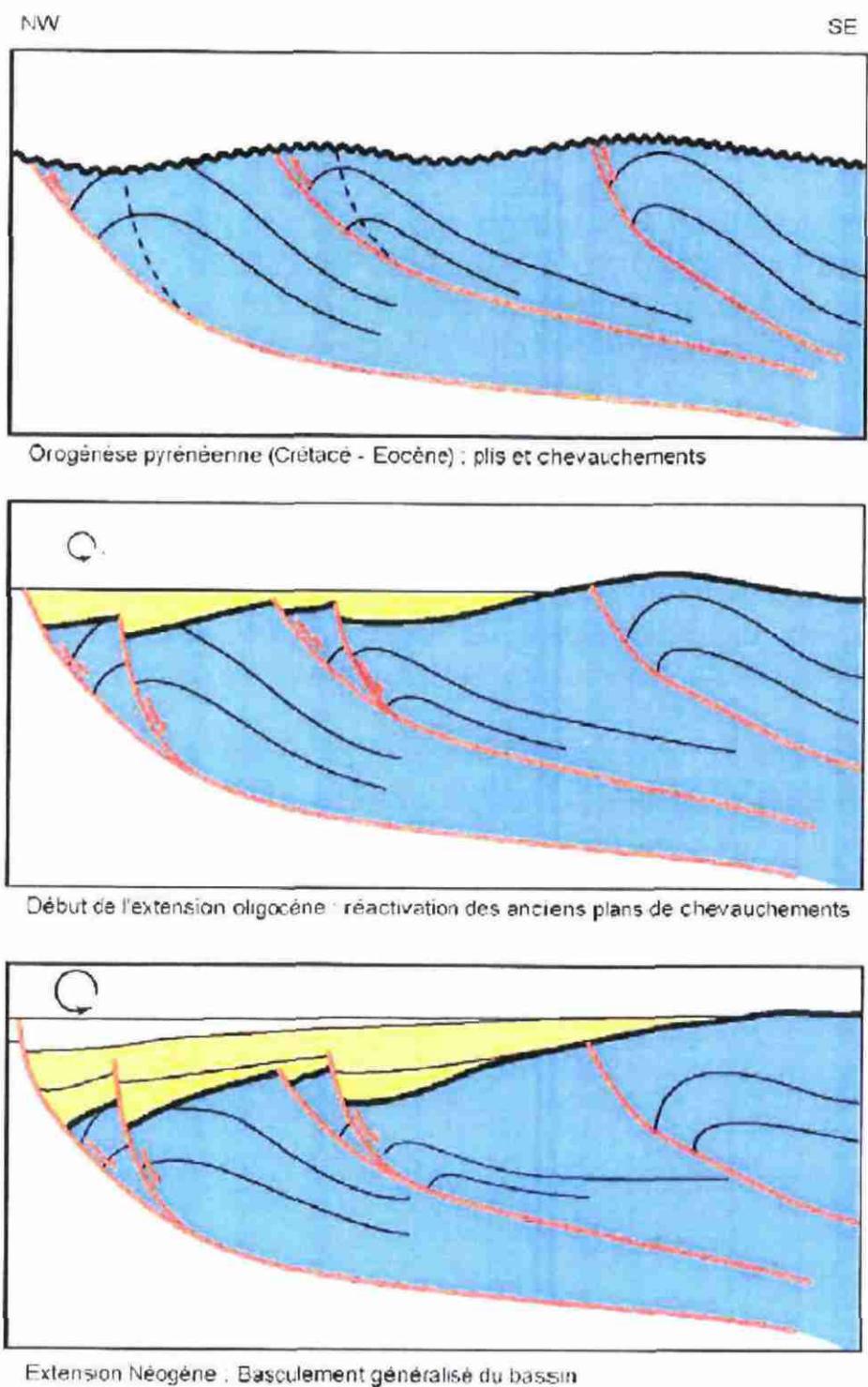


Illustration 25 : Modèle schématique de l'évolution du bassin de l'Hérault du Crétacé au Néogène (Serrano et Hanot, 2005)

L'interprétation retenue par pointage sismique des profils dans le cadre de ce projet est comparable à celle de Serrano et Hanot (2005), mettant en avant le fonctionnement de grandes failles listriques (Profils interprétés en annexe 3).

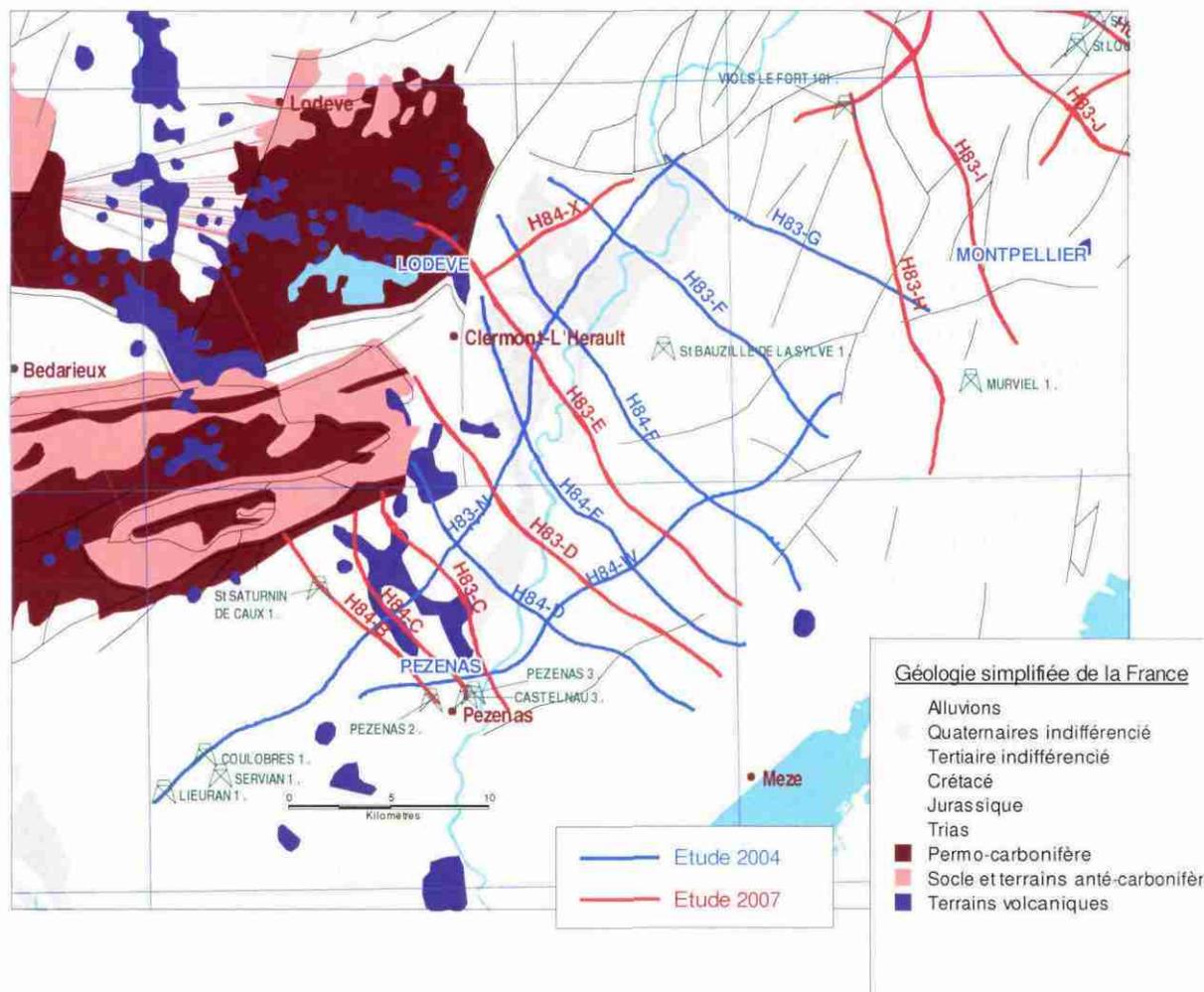


Illustration 26 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symboles en bleu) de la zone de la basse vallée de l'Hérault

L'interprétation de cette zone c'est donc appuyée sur ces deux travaux précédents, ainsi que sur les neuf forages présents dans la zone (Lieuran1, Servian1, Coulobres1, Pézenas2, Pézenas3, Castelnaud3, Saint-Saturnin-de-Caux1, Saint-Bauzille-de-la-Sylve1, Murviel1). La présence de nombreux croisements de profils a permis une meilleure cohérence dans l'interprétation, comme le montre le profil H83-N (Illustration 27) recoupant 10 profils et comportant dans sa partie sud les forages de Lieuran1, Servian1 et Coulobres1, permettant un calage des séries présentes.

Si les 13 profils ont été interprétés dans un premier temps de manière indépendante sur la base des puits, des affleurements et des interprétations précédemment publiées, une harmonisation des interprétations a été effectuée sur la base du profil H83N, profil de référence, bien calé au niveau de Lieuran1 et Coulobres 1 au Sud-Ouest et intersectant pratiquement tous les autres profils.

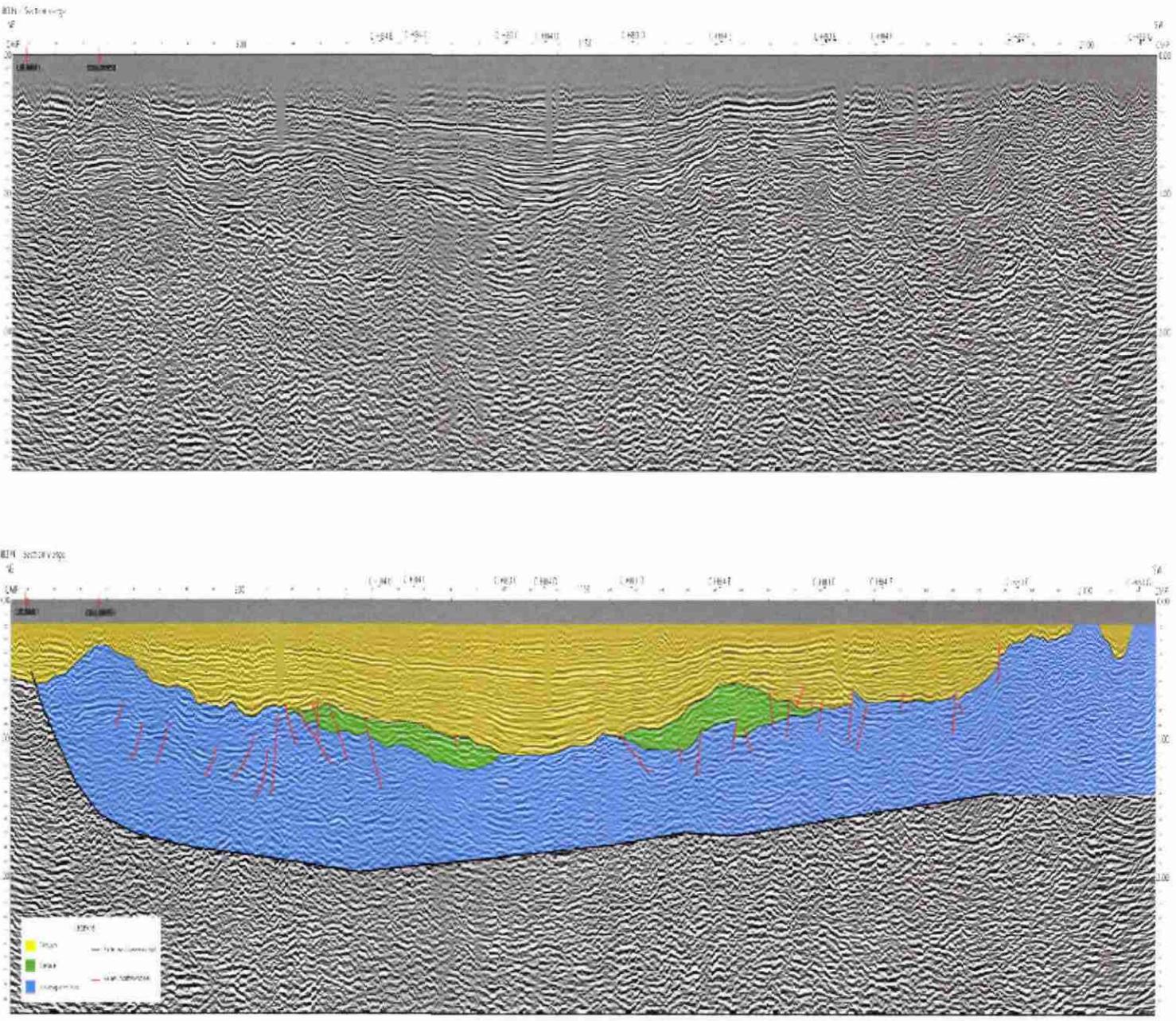


Illustration 27 : Section sismique H83N vierge et interprétée (légende : en bleu : Jurassique ; en vert : Crétacé et en jaune orangé : remplissage tertiaire syn/post rift)

Le profil H83D (Illustration 28) montre un croisement avec la ligne H83N.

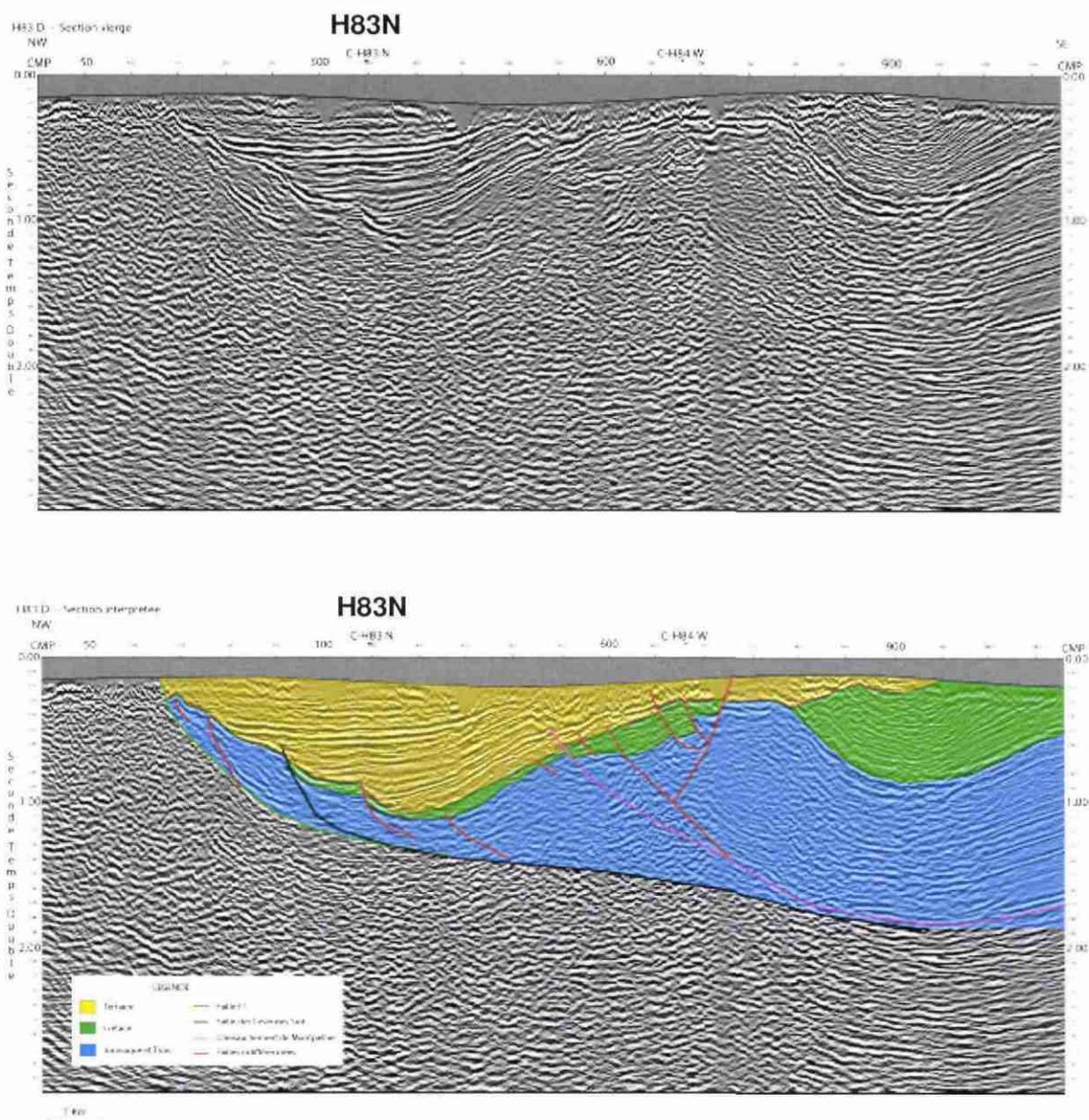


Illustration 28 : Section sismique H83D vierge et interprétée

La section sismique H83C interprétée par Maërtén, ne mettait pas en évidence la présence du Crétacé dans sa partie Sud-Est. Cependant le forage de Pézenas 3 situé à 1km de cette ligne sismique montre la présence de Crétacé sur une épaisseur de 230 m environ, situé sous le Mioène épais de 135m (Annexe2). Le profil H83C (Illustration 29) est représenté ci-dessous.

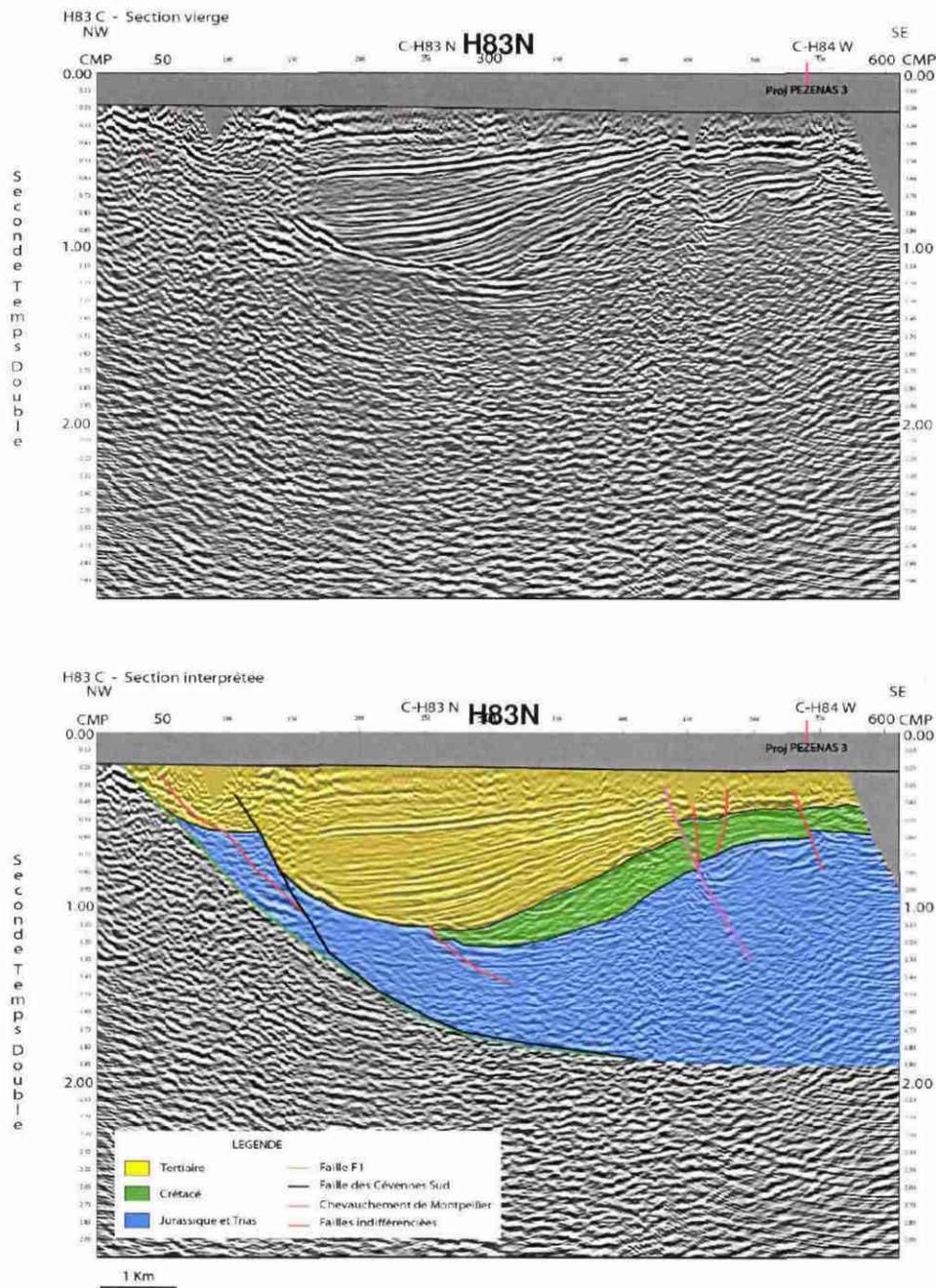


Illustration 29 : Section sismique H83C vierge et interprétée

b) Interprétation de la zone du Lez

La zone du Lez jusqu'à la zone de l'étang de l'Or comprend 8 profils (Illustration 30), dont trois interprétés par Benedito Esteban en 1996 (H83G, H83J, H83K).

Tout comme l'interprétation géologique de la basse Vallée de l'Hérault, Benedicto (1996) interprète la géologie de cette zone à l'aide d'un système de rampes et palliers (profil H83-J et K). Cette structure permet d'expliquer la mise en place des bassins d'effondrement tertiaire.

L'interprétation proposée visant à mettre en évidence les failles ainsi que les limites des formations carbonatées, les grands jeux de failles listriques sont identifiés, sans pouvoir autant mettre en évidence à partir du pointé sismique, la structure profonde en rampe et pallier.

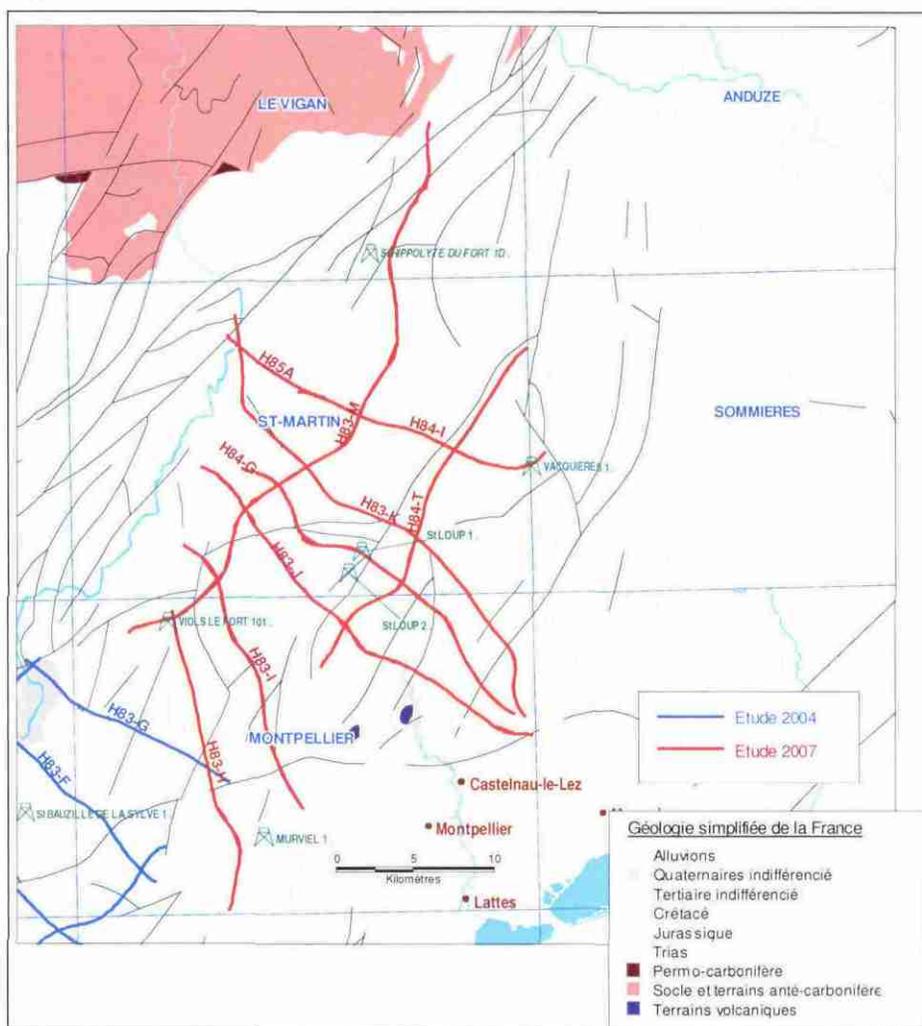


Illustration 30 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers (symbole en bleu) de la zone du Lez jusqu'à l'étang de l'Or

De même que pour la zone de la basse vallée de l'Hérault, la zone du Lez comporte 2 profils orientés N40, dont le profil H83M (Illustration 31), recoupant 6 autres profils comprenant notamment les profils H83J (Illustration 32) et H83K (Illustration 33). Cinq forages sont disponibles sur cette zone, mais la plupart ne traversant que le Jurassique.

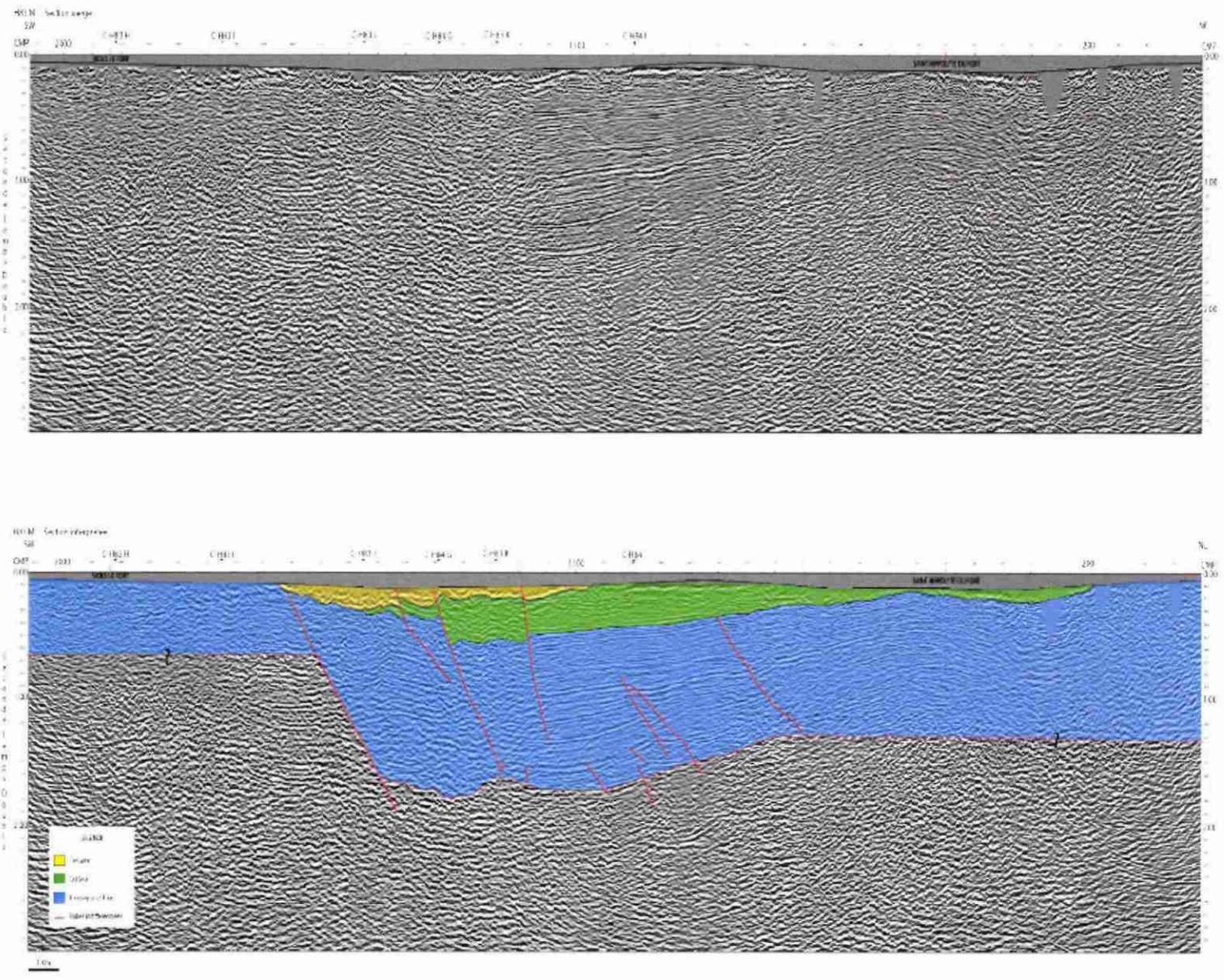


Illustration 31 : Section sismique H83-M vierge et interprétée (légende bleu : Jurassique, en vert : Crétacé et en jaune : Tertiaire ; faille ligne rouge)

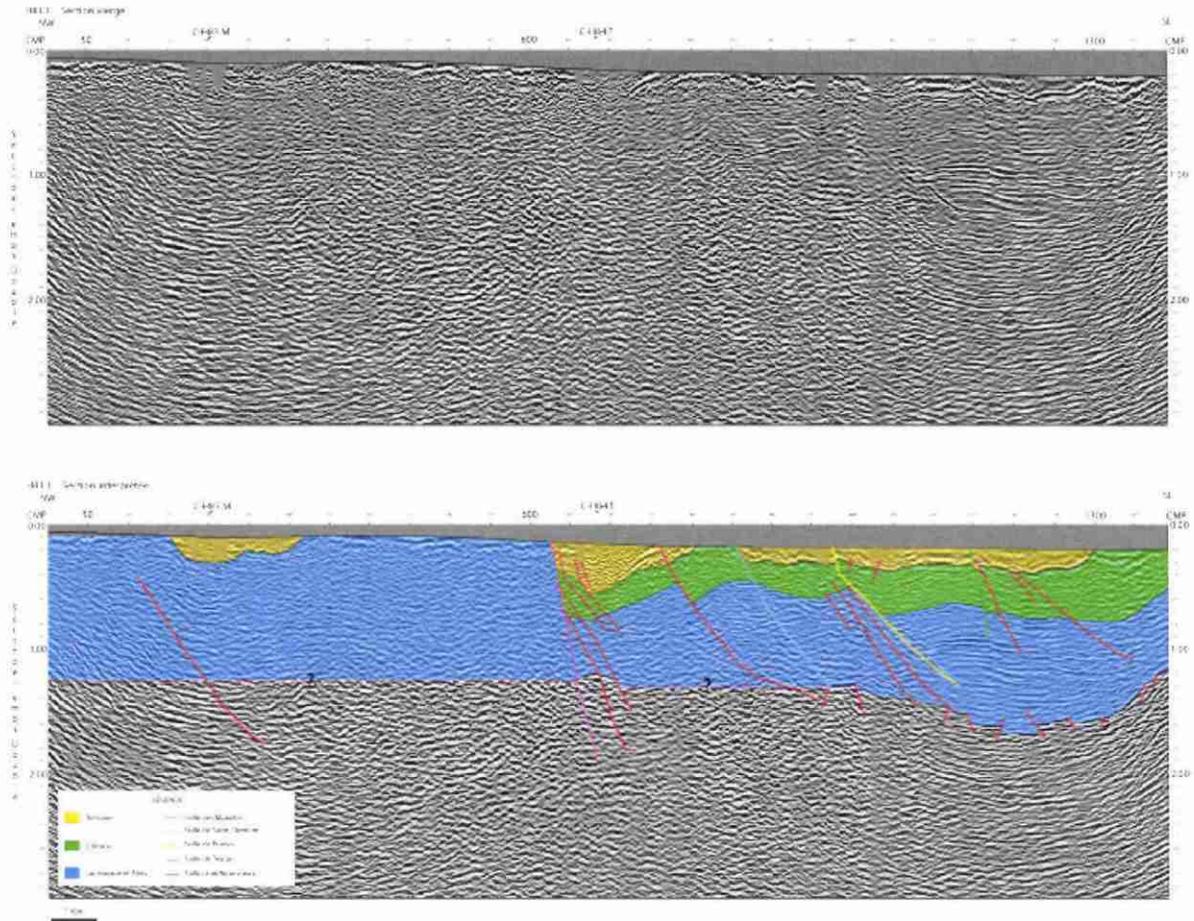


Illustration 32 : Section sismique H83-J vierge et interprétée

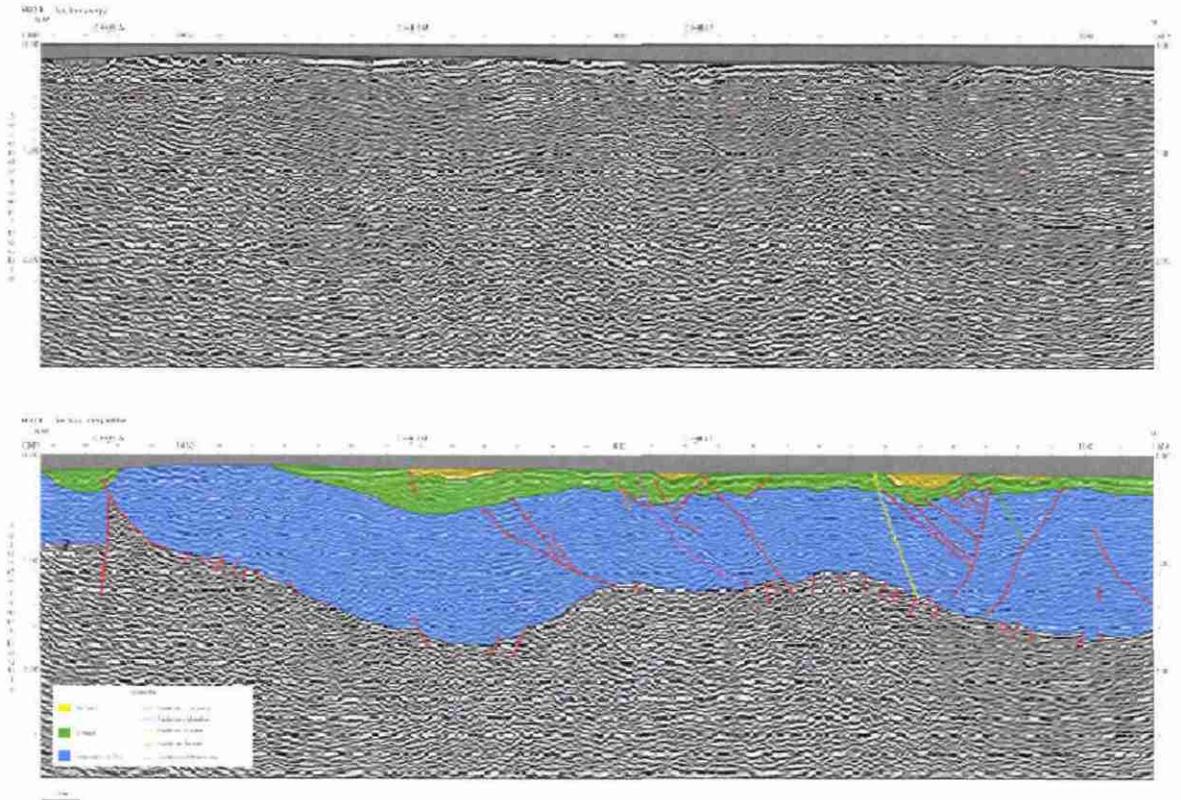


Illustration 33 : Section sismique H83-K vierge et interprétée

c) Interprétation de la zone d'Uzès

Seuls 4 profils analogiques ont pu être retraités dans cette zone (Illustration 34). Les 2 profils de la campagne 95MAR acquis par l'Andra n'ont pu être obtenus. L'interprétation est principalement basée sur le puits de Bouquet1 distant d'une dizaine de kilomètres, mais seul support disponible dans cette région. Le croisement des profils entre eux a été un second critère d'interprétation. Les profils interprétés M2026 et M2028 sont présentés et discutés au paragraphe 4.5.4. Les deux autres profils figurent en annexe 3.

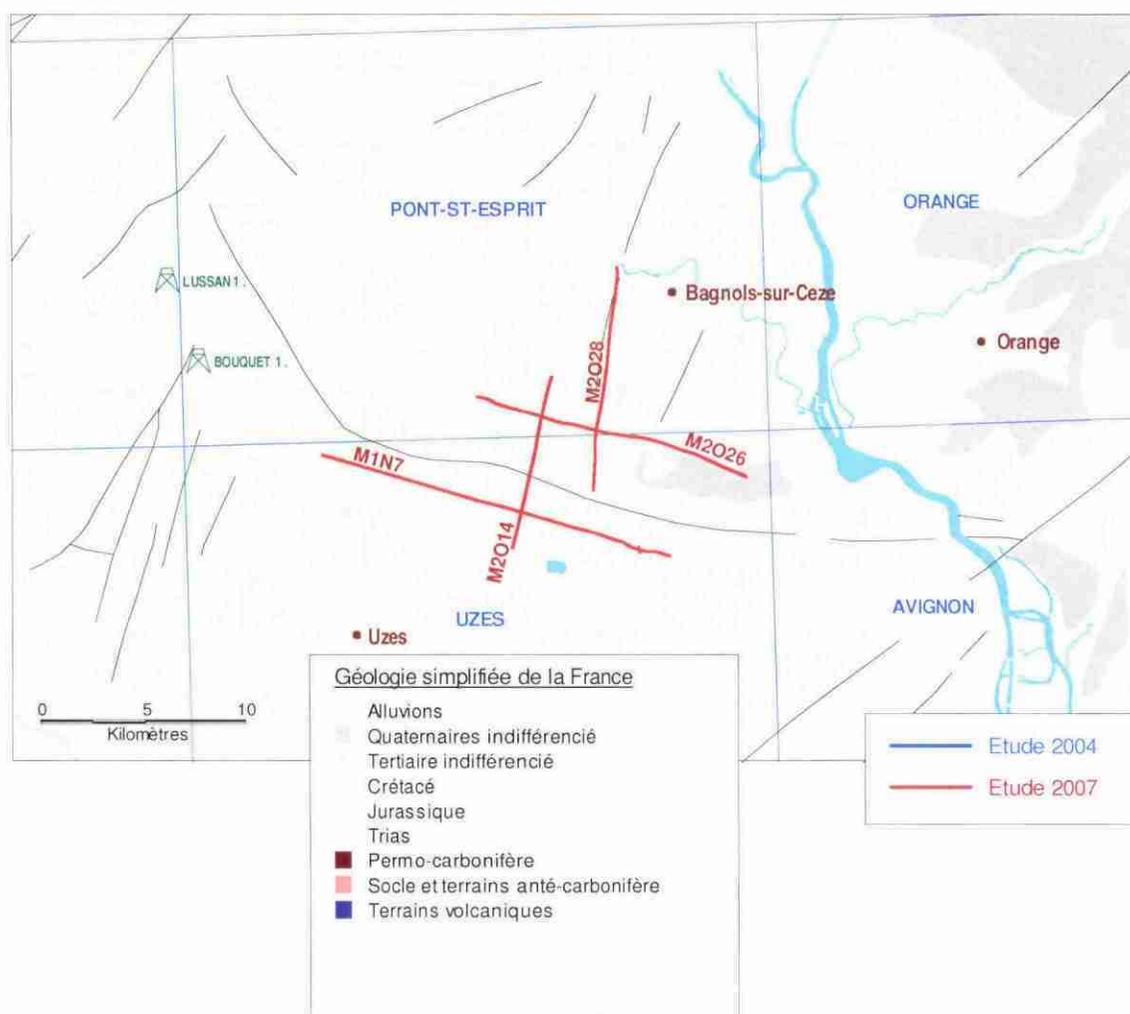


Illustration 34 : Plan de position des profils sismiques et des forages pétroliers de la zone d'Uzès

4.4. CARTOGRAPHIE DE LA BASE DU REMPLISSAGE SYNRIFT

La base du remplissage synrift a été pointée sur l'ensemble des sections sismiques retraitées en tenant compte des failles qui interceptent cette surface et des décalages induits. Une image en temps, du style structural des domaines d'études a été obtenue, puis traduite en profondeur.

Pour cela, trois étapes ont été nécessaires. La première étape est la restitution d'une carte d'isochrones (Illustration 35). Elle correspond à la profondeur en temps, par rapport au datum sismique, issue directement du pointé des sections. Cette carte est difficilement exploitable, car elle ne renseigne pas sur la profondeur en mètres de la surface cartographiée. La deuxième phase est la réalisation d'une carte de vitesse de tranche. Cette carte est obtenue par intégration des données de forages. La troisième et dernière étape est la réalisation de la carte d'iso profondeurs proprement dite. Cette carte est obtenue par intégration de la carte en temps et de la grille de vitesse. Le résultat donne une carte, dite d'isohypses, qui correspond à la cote du niveau cartographié, en mètres par rapport au niveau de la mer (Illustration 36).

La carte a été réalisée par interpolation des valeurs mesurées aux puits et des valeurs calculées à partir de l'interprétation sismique, avec un résultat cartographique en courbes d'isohypses équidistantes de 100 m. Les valeurs s'échelonnent de +100 m à -1200 m par rapport au 0 NGF. Le périmètre cartographique tient compte des données disponibles (extension des données sismiques et des forages disponibles), mais également des zones de non affleurement de l'Oligo-Miocène.

Les failles principales interceptant la surface cartographiée ont été corrélées d'une ligne sismique à l'autre.

L'illustration 37 montre la carte des isohypses, ou seules les profondeurs inférieures à 500 mètres sont représentées.

Sur l'illustration 36 et l'illustration 37, la base de la sédimentation synrift est aussi légèrement visible le long de la ligne H83M et du Sud au Nord, ainsi qu'à l'intersection des lignes H83I, H83J, H84G et H83K. Par absence de puits de calage dans cette zone, il n'a pas été possible d'effectuer la conversion temps/profondeur, à cause d'une zone caractérisée par une lacune d'information, ce qui explique son absence sur la carte des isohypses.

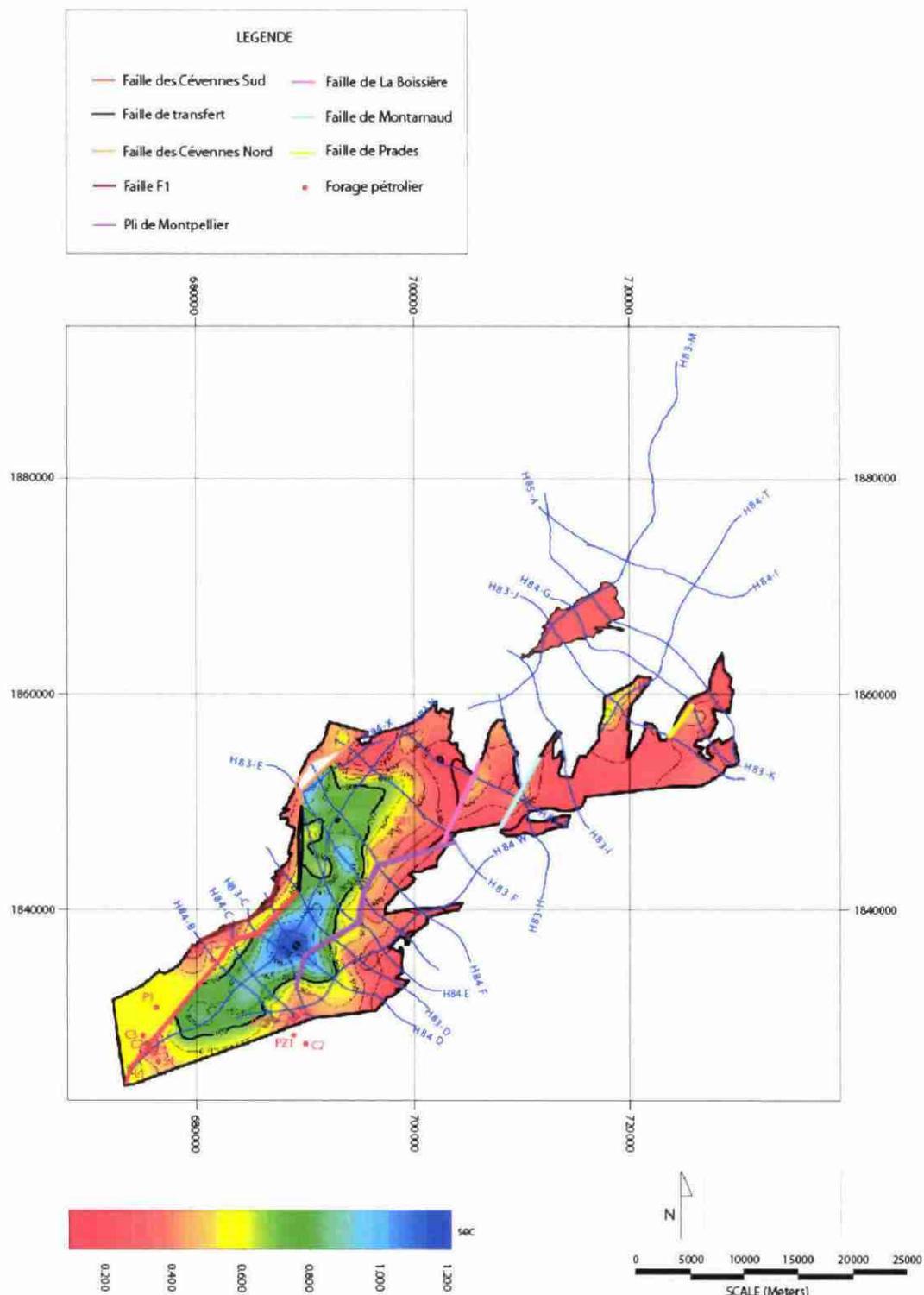


Illustration 35 : Carte d'isochrones de la base de la série synrif exprimées en temps (secondes).
Projection : Lambert II étendu

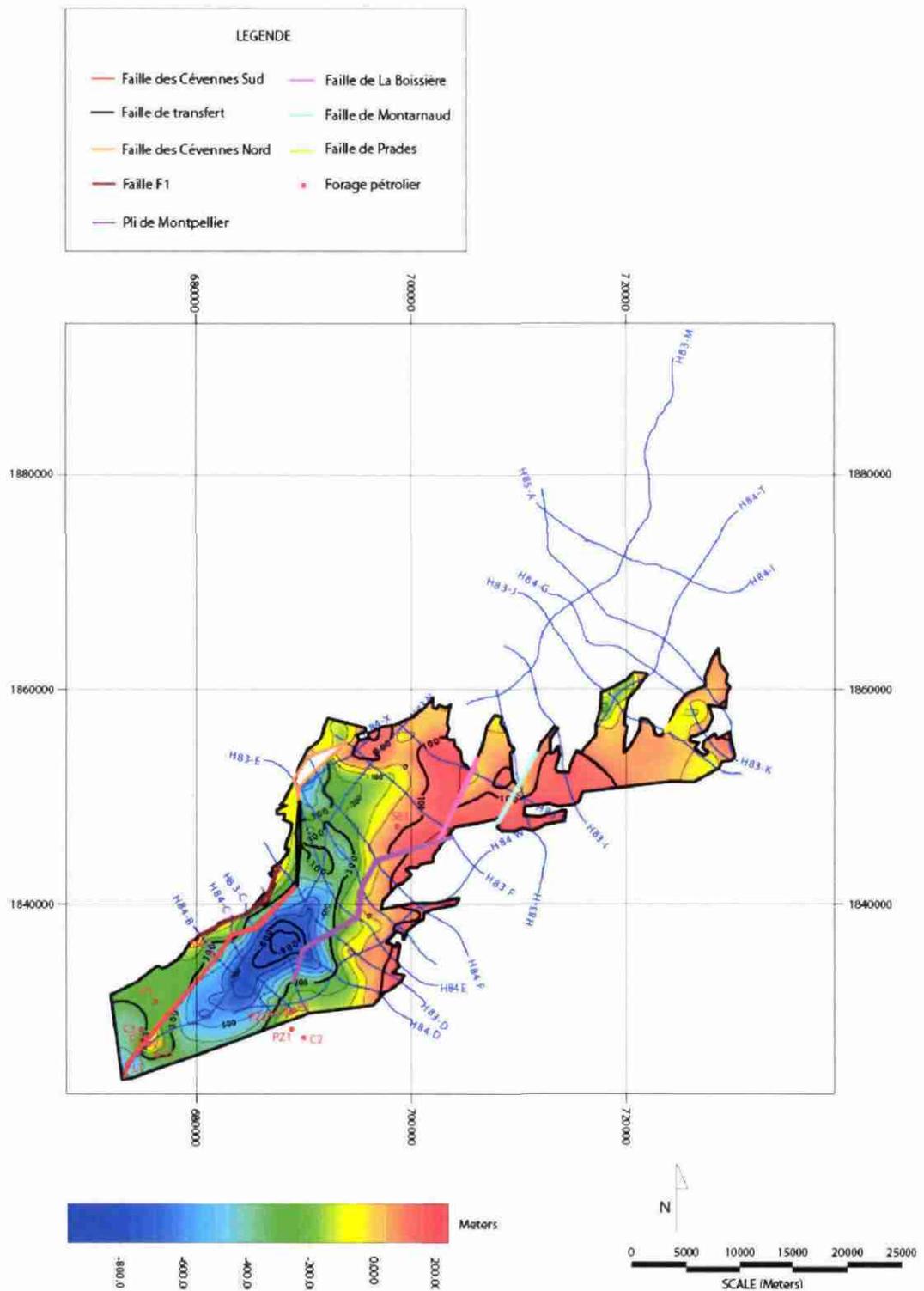


Illustration 36 : Carte d'isohypses de la base de la série synrift (équidistance 100 m). Projection : Lambert II étendu

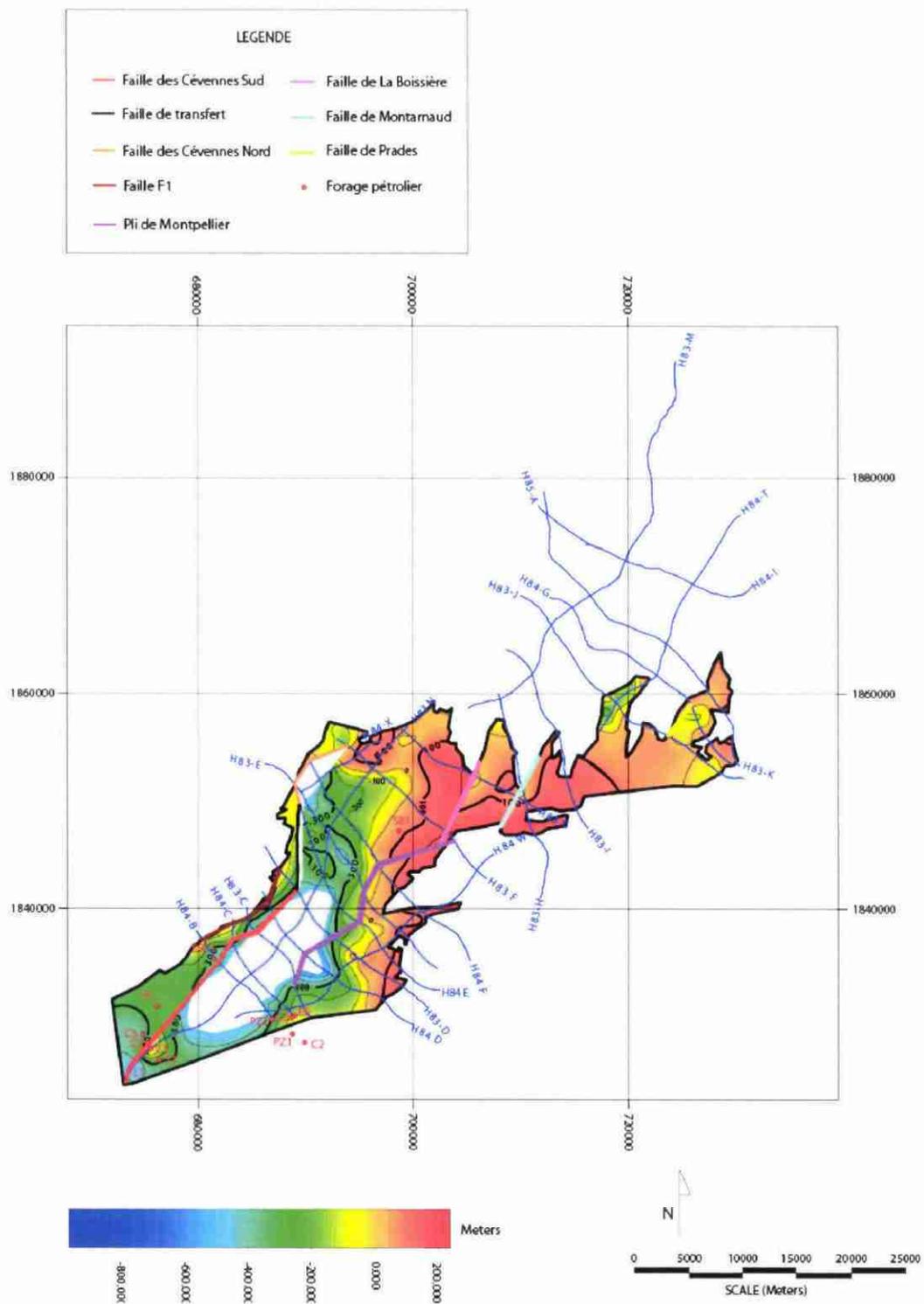


Illustration 37 : Carte d'isohypses de la base de la série synrift supérieure à 500 m. Projection : Lambert II étendu modèle gravitaire de marge et analogues de terrain

L'interprétation des profils sismiques du point de vue géologique repose sur un modèle de mise en place d'une marge carbonatée d'une part, et d'autre part sur l'observation d'analogues de terrain. Les paramètres qui entrent en jeu dans le cadre de la constitution d'une marge carbonatée sont de deux types :

- les paramètres sédimentaires de premier ordre, avec la configuration des dépôts, les processus de diagenèse précoce et la mise en place de la karstification en fonction de l'évolution du niveau de base,
- les paramètres structuraux qui vont déterminer les géométries résultantes des corps sédimentaires sur lesquels une diagenèse tardive et la karstification en fonction de l'évolution du niveau de base au cours des temps géologiques, prendront place.

Les paramètres sédimentaires en domaine carbonaté sont associés aux séries de plate-forme et pour les formations du Jurassique, les Causses et une grande partie du Languedoc. Pour le Crétacé, les domaines de plate-forme en Languedoc sont associés de plus à la tectonique pyrénéo-provençale. Les contextes de dépôts et les phases d'émersion ont été présentés dans le chapitre 3, illustrés par de nombreuses cartes paléogéographiques tirées notamment des travaux de Dubois et Baudrimont (1977).

Les paramètres structuraux associés à la mise en place de marge ont été recherchés, d'une part à l'aide d'éléments bibliographiques concernant la mise en place par modèle analogique d'une marge et d'autre part à l'aide d'observations de terrain, permettant d'identifier des analogues de terrain. Ces analogues de terrain ont été observés au niveau des Causses, le long du canyon du Tarn, depuis le socle jusqu'à la vallée de l'Hérault en Languedoc.

Une étude récente sur le site de Quézac (le Strat et *al.* 2007) permet d'identifier un modèle géométrique qui met en évidence au niveau du faisceau structural de Meyrueis, des failles en fleurs de différentes générations (Illustration 38).

Coupe géologique Ouest-Est passant par le site de Quézac

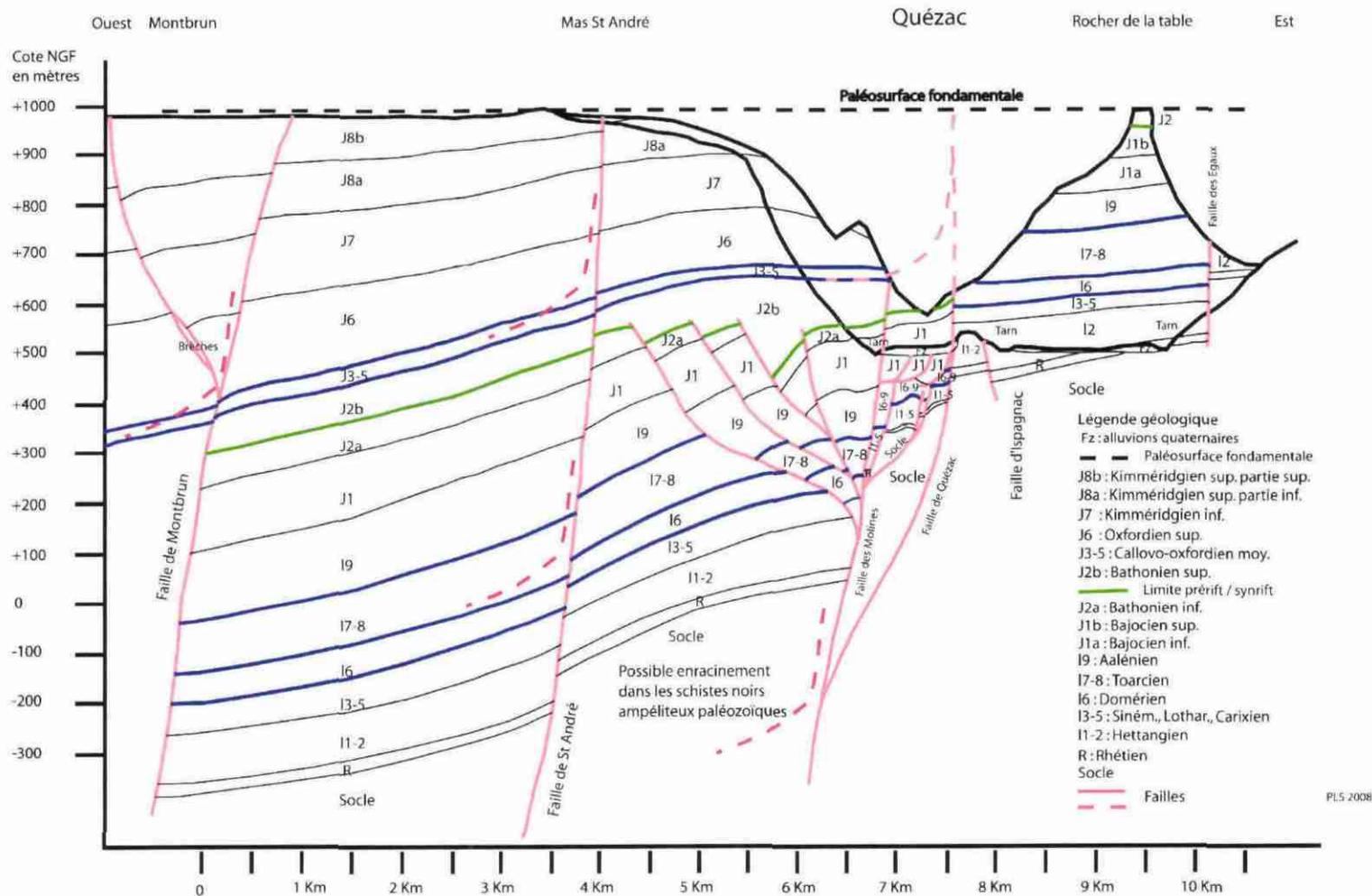


Illustration 38 : Coupe géologique Est-Ouest synoptique de la vallée du Tarn au niveau de Quézac (Le Strat et al. 2007).

Ces failles en fleurs sont liées à la mise en place de deux facteurs (Gaullier *et al.* 2005):

- des « marches » de socle,
- et une pente structurale d'au moins 2,8°.

Ces facteurs sont significatifs d'un modèle gravitaire de type modèle salifère pour le bassin profond méditerranéen (Nil et Méditerranée occidentale). L'illustration 39 présente le mode de déformation d'un décollement d'une couverture sédimentaire sur une couche plastique associée à une marche de socle. La couche plastique n'offre que peu de résistance et de plus permet un glissement. Des déformations de type failles normales et inverses donnent lieu à un graben, puis évoluent vers la mise en place de diapirs associés à la couche plastique (sel par exemple).

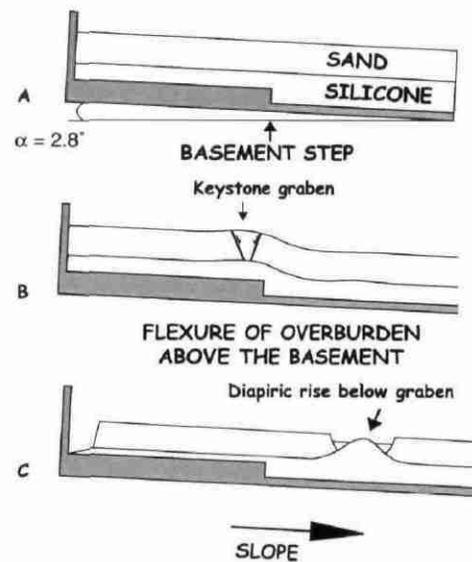


Illustration 39 : Schéma présentant le mode de déformation d'un décollement visqueux et de sa couverture fragile pendant le glissement sur une « marche de socle » (Gaullier *et al.* 1993).

De plus, Vendeville (2005) identifie des objets structuraux sur un modèle analogique (Illustration 40). Ces objets sont des failles en fleurs et des roll-overs des formations, associés à la mise en place de grabens, dans un contexte proximal, puis des failles listriques en position médiane et finalement des diapirs de pieds de poussée en position distale.

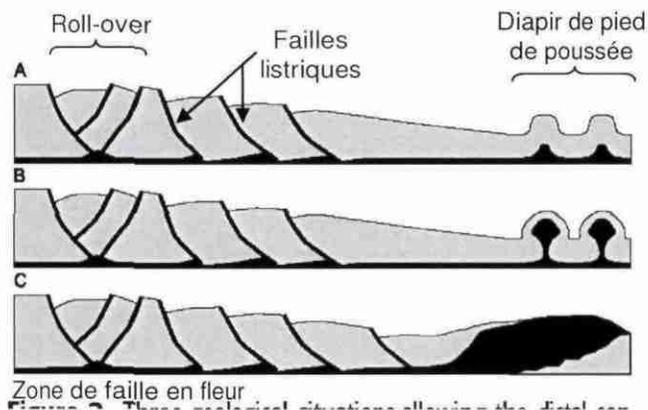


Illustration 40 : Trois situations géologiques permettant la contraction distale requise pour l'extension d'un prisme sédimentaire. (A) Plis déformant une couverture distale faible et fine ; (B) Contraction de diapirs distaux préexistants ; et (C) contraction et gonflement d'une langue de sel préexistante (Vendeville, 2005).

Les modèles analogiques comme les modèles en grand dans la nature, peuvent être polyphasés et montrer une succession de failles en fleur et de diapirs de pied de poussées gravitaires, associés aux mécanismes de mise en place (Illustration 41).

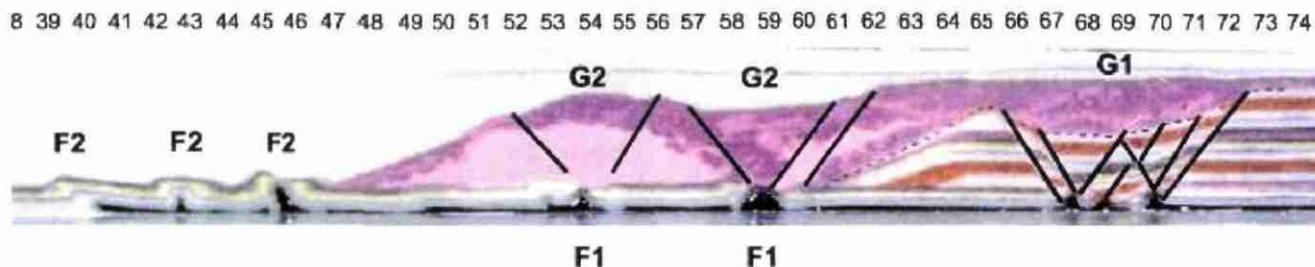


Illustration 41 : Coupe dans un modèle assujéti à deux stades de dépôts de prismes sédimentaires. La progradation s'effectue de la droite vers la gauche. Le modèle comprend initialement une fine couche originelle (noire) recouverte par une fine couverture horizontale (trois couches les plus basses). Le dépôt du premier prisme (séquence comprenant les couches grises et blanches sur la droite, toutes déposées avant le départ de la déformation) déclenche la création de la première génération de graben (G1) près de la bordure de plate-forme et deux plis distaux au front du prisme (F1). Le dépôt du second prisme sédimentaire (gris n'ayant pas de couches internes) déclenche la création de la seconde génération de plis (F2) et des grabens (G2) prenant naissance sur la première génération de plis (F1) (Vendeville, 2005).

Les objets structuraux identifiés à l'aide de modèle analogique, failles en fleurs, rolls-overs, diapirs de pied de poussée, ont été recherchés sur le terrain, constituant ainsi des « analogues de terrain ». Ces objets sont illustrés, à partir d'observations effectuées au niveau du domaine carbonaté des Causses : le canyon du Tarn et plus

généralement dans la région Languedoc du socle vers la plateforme carbonatée actuelle au large du littoral languedocien (Agde).

La vision 2D des Gorges du Tarn entre Quézac et le Point sublime est assimilée à une marge mise en place selon un modèle gravitaire, pour une partie de son histoire. Quézac est considéré comme correspondant à la partie proximale orientale (km=0), alors que le Point Sublime correspond à la partie distale occidentale (km=36.5). A noter que les modèles halocinétiques du Tertiaire de la Méditerranée sont très proches d'un point de vue mécanique des modèles argilocinétiques du Jurassique des Causses. Ces deux modèles possèdent au sein de leurs dépôts des formations de type « couches savons » qui sont respectivement les couches de sel messinien d'une part et les horizons marneux du Domérien Toarcien et du Callovien d'autre part. Dans le cas du Jurassique des Causses, le Trias argilo évaporitique est absent au niveau du secteur du Tarn. Lorsqu'il est présent, le comportement de type « couche de savon » du Trias argilo-évaporitique peut prendre place. Par ailleurs certains niveaux ampéliteux au sein des schistes du Paléozoïque peuvent également servir de « couches savons ».

Par analogie au modèle de Gaullier (1993), les marches de socle sont bien mises en évidence au niveau des Causses, comme c'est le cas au niveau de la faille de Molines sur le faisceau de Meyrueis (Illustration 38). Ces marches de socle avaient déjà été observées sur la bordure cévenole par Gottis (1957). La prise de vue de l'illustration 42 montre la marche de socle au niveau de la faille de Sumène.



Illustration 42 : Drapage et gravitation de la Montagne de la Fage et de la Montagne des Cagnasses sur la marche de socle de Sumène évaluée à environ 500 m d'amplitude (épaisseur minimale occultée pour le Lias calcaire, le Lias marneux et une partie du Dogger).

La pente nécessaire au fonctionnement d'un modèle gravitaire (Gaullier et al. 2005) est acquise lors de la mise en place de l'incision des canyons des Causses associée aux variations eustatiques et aux mouvements verticaux qui affectent le domaine atlantique. Cette incision est postérieure à la paléosurface fondamentale, datée entre 13 et 6 Ma (Ambert, 1984) et consécutive à un uplift généralisé d'au moins 300 m pour le domaine des canyons, de 500 m pour la Cham des Bondons, le domaine des

Causses de l'Hospitalet et de Camprieu, et de 1000 m pour un domaine comme celui de l'Aigoual. La paléosurface du sommet de l'Aigoual est soulignée par la présence d'altérites triasiques. L'amplitude des mouvements verticaux et incisions ainsi estimée engendre une pente de l'ordre de 3% (300 m pour 10km) et peut ainsi permettre la gravitation de toute la couverture mésozoïque des Causses et du Languedoc. Il s'avère donc qu'entre 13 et 6 Ma, les Causses et le Languedoc sont affectés par une crise tectonique qui met en place des structures gravitaires.

Des analogues de terrains en Languedoc-Roussillon s'apparentant aux objets structuraux du modèle gravitaire de Vendeville (2005) sont présentés.

- **Les brèches sur roll over (Les Molines – Vallée du Tarn : Km = 0)**

Ces brèches (Illustration 43) affleurent au Nord de Quézac le long de la route qui va de Molines à Mende par le Causse du Sauveterre. Il s'agit de brèches à toutes les échelles (blocs à mégablocs voire paquets glissés) qui sont à relier à la mise ne place du « roll over » post jurassique supérieur et vraisemblablement syn-paléosurface fondamentale d'âge oligo-miocène moyen (Ambert, 1984).

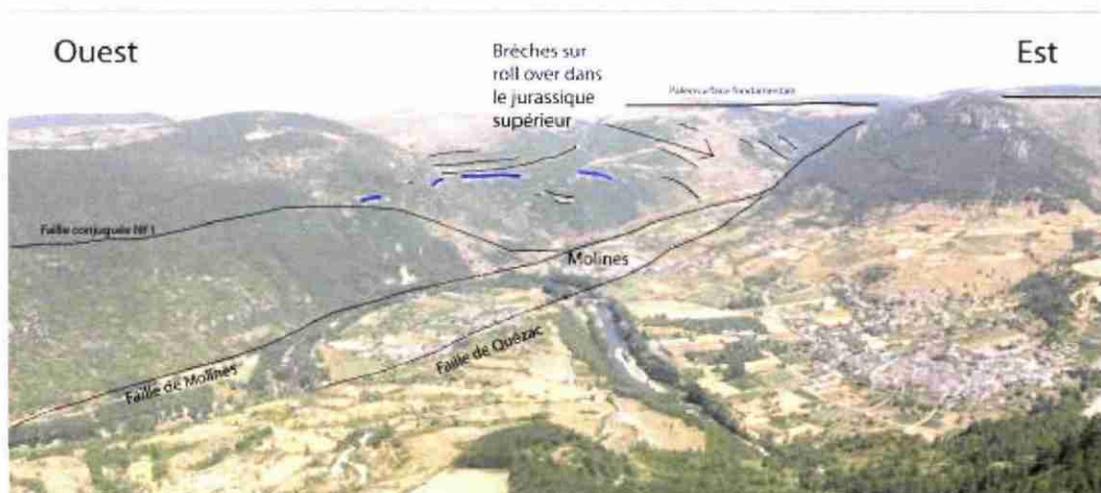


Illustration 43 : Panorama vers le Nord de la vallée du Tarn au niveau de Quézac et d'Ispagnac montrant l'ampleur du roll over des Molines.

Les brèches et les paquets glissés (Illustration 44) sont plus ou moins en place le long de la route reliant Molines à Mende. Les faciès sont représentés exclusivement par des calcaires micritiques du Jurassique supérieur dans une matrice de sédiments plus ou moins argileux rougeâtre. On note parfois la présence de ciments calcitiques d'origine karstique.

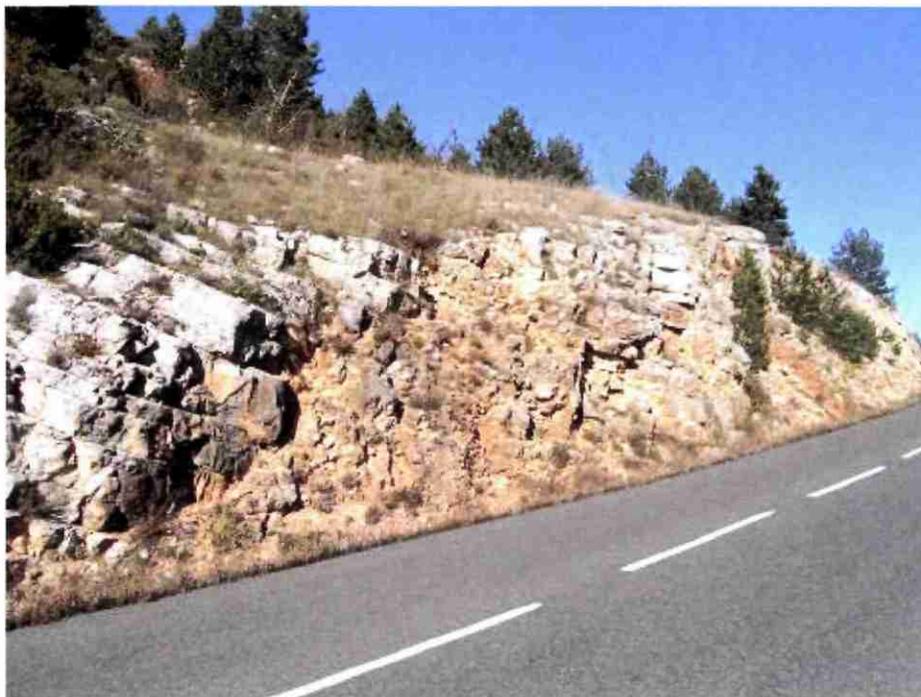


Illustration 44 : Niche d'arrachement dans le roll over de Molinez avec à gauche la partie en place et à droite la partie gravitée avec les brèches.

- **Les failles en fleur (Quézac – Vallée du Tarn : Km = 3)**

Les failles en fleur de la vallée du Tarn ont plus ou moins bien été décrites par Gèze (carte géologique à 1/50 000 de Florac - 1980). Elles sont associées avec des blocs basculés et des géométries syndéformations scellées par les formations du Bathonien supérieur (Illustration 45). Les failles en fleur apparaissent aussi un peu plus à l'Ouest dans le secteur du Cirque des Baumes au Point Sublime dans la vallée du Tarn (Illustration 45).

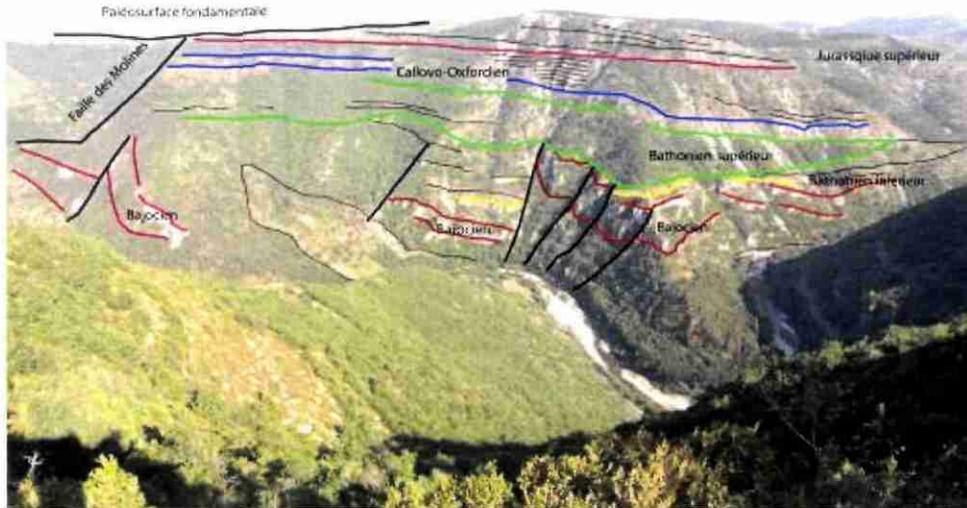


Illustration 45 : Partie superficielle des failles en fleur jurassiques de la zone en aval immédiat de Quézac.

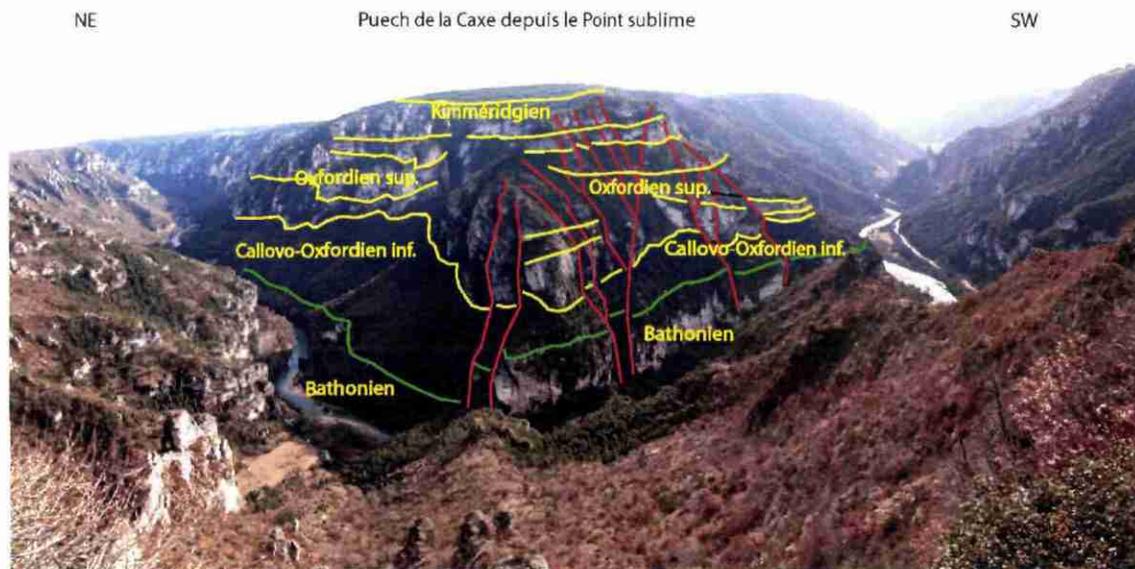


Illustration 46 : Failles en fleur dans le secteur du Point Sublime.

○ **Les brèches sur failles listriques (Montbrun – Vallée du Tarn : Km = 6,5)**

A l’affleurement, les auteurs ont cartographié des brèches associées à ces grands accidents méridiens de la bordure caussenarde sur le socle paléozoïque. C’est le cas à Montbrun (Illustration 47) où l’on décrit une brèche verticale avec des blocs de calcaires jurassiques métriques à plurimétriques qui traverse une partie de la série

jurassique. Ces brèches (Illustration 48) sont associées avec des linéaments structuraux.

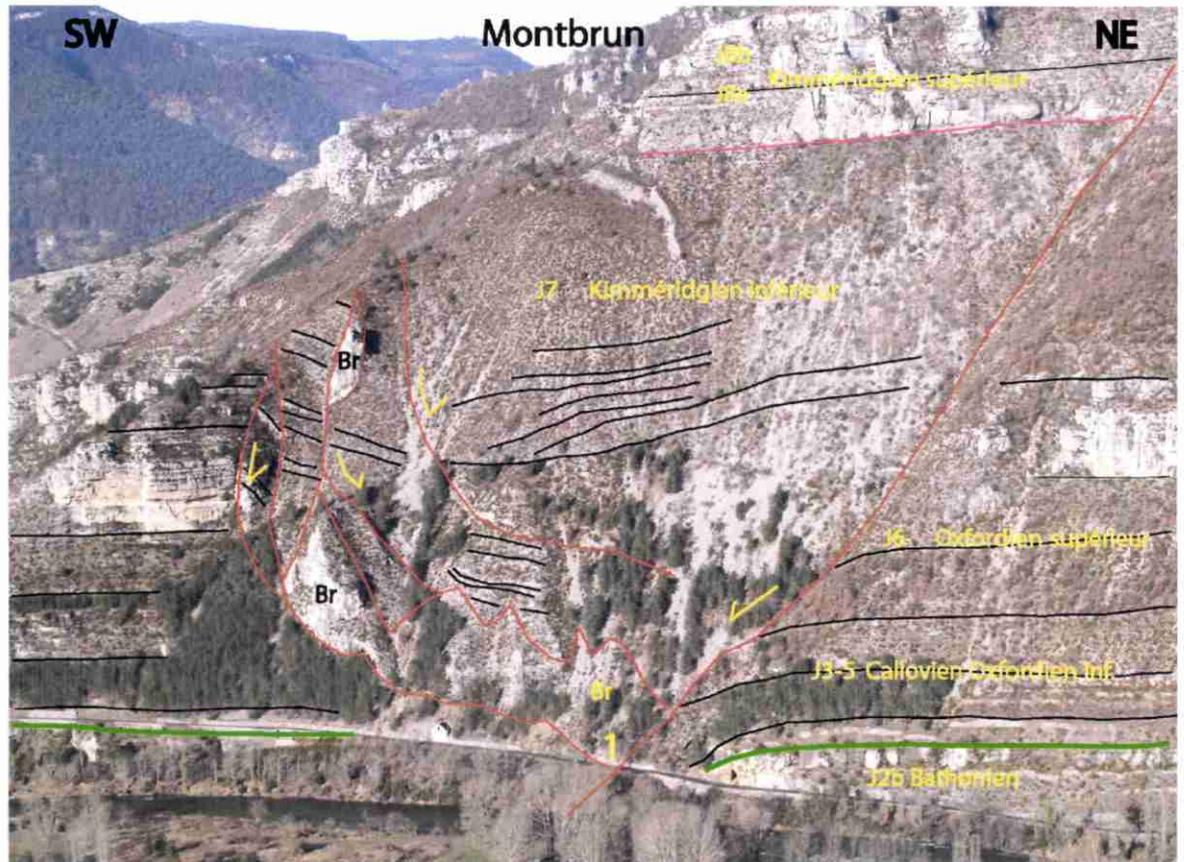


Illustration 47 : Failles en fleur du secteur de Montbrun.



Illustration 48 : Brèches gravitaires associées aux failles listriques du secteur de Montbrun.

○ **Les failles listriques (Cirque de Pognadoires – Vallée du Tarn : Km = 24)**

Conformément au modèle analogique de Vendeville (2005), le secteur du Cirque de Pognadoires est caractérisé par de grandes listriques (Illustration 49) témoignant d'une forte extension du système gravitaire.

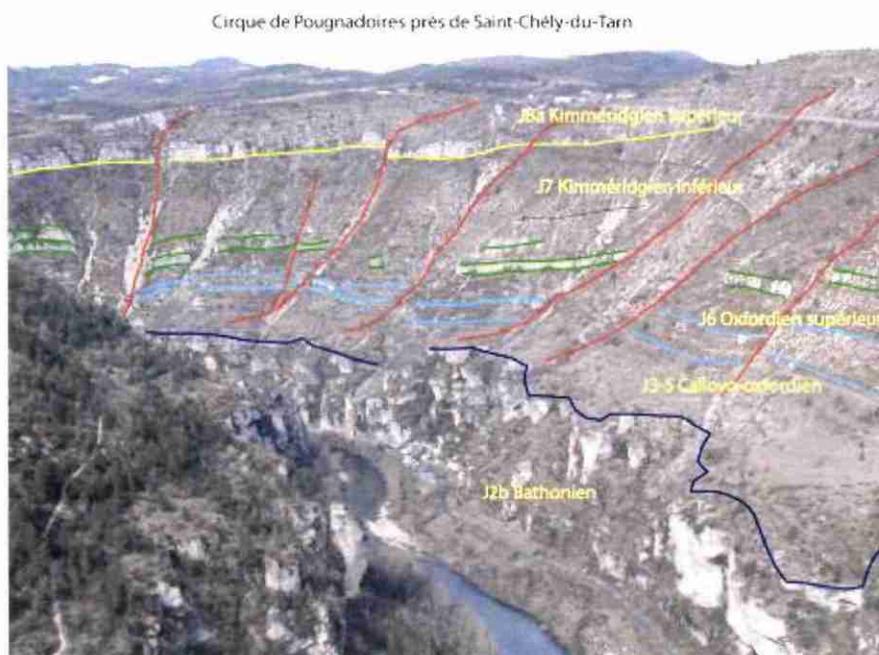


Illustration 49 : Train de failles listriques dans le secteur du cirque de Pognadoires (vue vers le Nord- Ouest).

○ **Les diapirs de pied de poussée gravitaire (La Malène – Vallée du Tarn : Km = 29,5)**

La structure de la Malène (Illustration 50) présente à la fois des failles ou des contacts anormaux avec tectoglyphes, des brèches (Illustration 51) et des mégabrèches (Illustration 52) qui peuvent être secondaires par rapport aux contacts anormaux (Illustration 50). L'ensemble des phénomènes décrits se rapportent à un diapir de pied de poussée gravitaire (Vendeville 2005) avec des phénomènes de collapse, de roll over (Illustration 53 et Illustration 54) et une dolomitisation tardive qui affecte essentiellement les matrices et préserve les éléments calcaires de la brèche de collapse (Illustration 52). On peut résumer l'histoire géologique du site de la Malène par :

- une mise en place du diapir de pied de poussée gravitaire avec contacts anormaux, failles et tectoglyphes, entre 13 et 6 Ma (Ambert 1994) simultanément à l'uplift qui met en place les incisions des canyons ;
- une bréchification de collapse secondaire syntectonique ;

- une dolomitisation tardive de type hydrothermale syn à post mise en place de la collapse soit tortonienne. Cette dolomitisation en dôme ou en champignon serait une dolomitisation « per ascensum » qui proviendrait du lessivage des dolomies bathoniennes et hettangiennes.

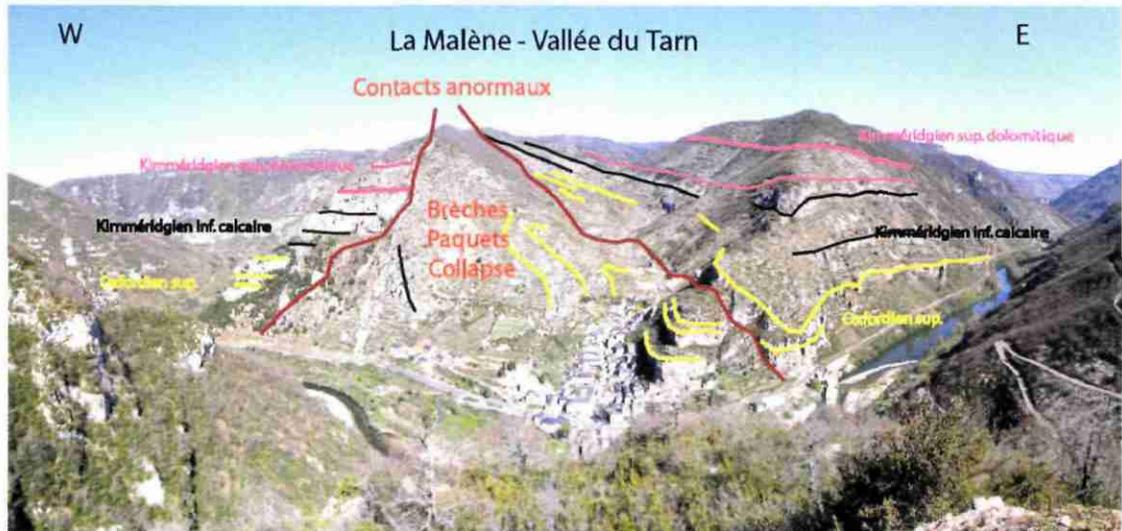


Illustration 50 : Panorama général du secteur de la Malène.



Illustration 51 : Tectoglyphes repris dans une brèche de collapse plus récente.



Illustration 52 : Mégabloc de la brèche de collapse repris dans un matériel plus lité et dolomitisé secondairement.



Illustration 53 : Roll over et brèche gravitaire associée



Illustration 54 : Détail de la brèche gravitée associée au roll over

- **Les bourrelets de pied de poussée gravitaire (Vallée du Rieutord en Languedoc)**

Cette structure est liée à un phénomène de glissement en masse jurassique (âge Kimméridgien) qui entraîne à son front un bourrelet hectométrique (Illustration 55) en épaisseur, de pied de poussée gravitaire composé essentiellement de brèches et de mégabrèches (Illustration 56). On voit très bien sur la vue que la structure est complètement sécante sur la stratification des couches déposées ultérieurement (Illustration 55 et Illustration 56). Elle est de même postérieurement karstifiée



Illustration 55 : Vue générale de la vallée du Rieutord avec sur la partie droite le bourrelet bréchique de pied de poussée gravitaire.

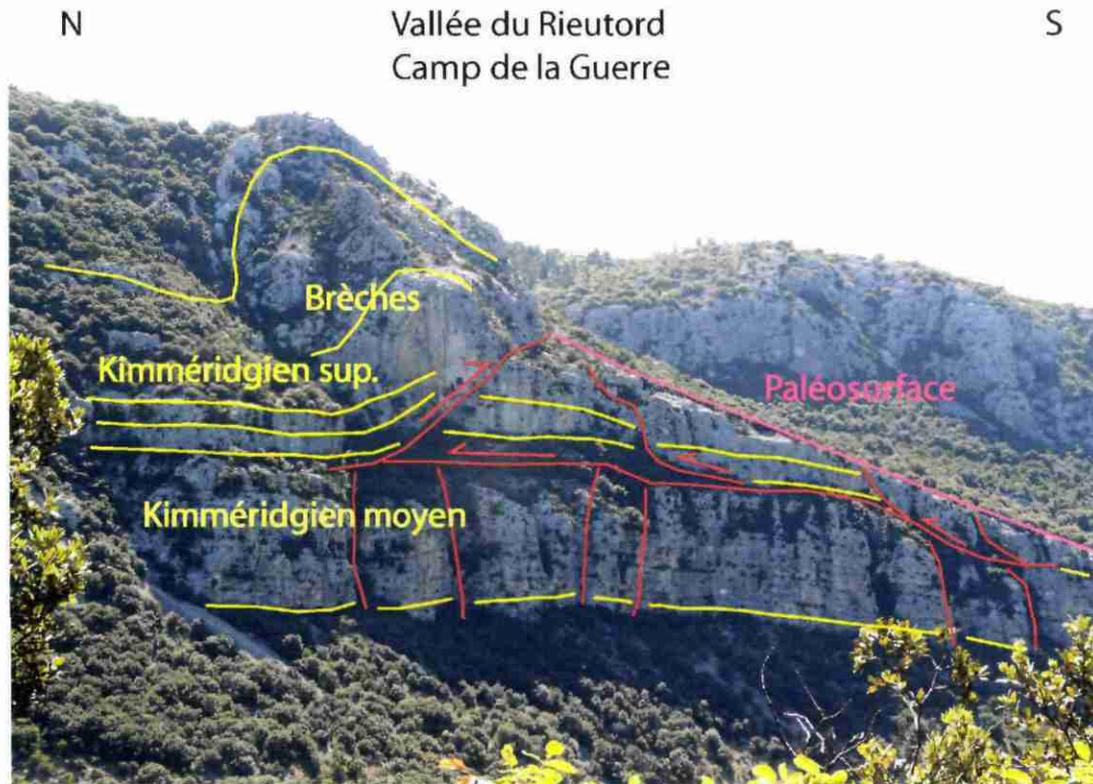


Illustration 56 : Détail du bourrelet de la vallée du Rieutord et de son contenu bréchique.

○ **Les brèches du col de la Cardonille (Route de St-Martin-de-Londres à Ganges)**

Ces faciès (Illustration 57 et Illustration 58) s'étendent sur plusieurs kilomètres au col de Cardonille et sont remarquables sur deux points caractéristiques, des diapirs de pied de poussée gravitaire :

- une diaclasisation verticale généralisée ;
- une bréchification généralisée relative au phénomène de collapse secondaire.



Illustration 57 : Vue générale de la brèche du col de la Cardonille entre St-Martin-de-Londres et Ganges qui témoigne d'une diaclasation très pénétrative verticale et d'une brèche de collapse généralisée.



Illustration 58 : Détail de la brèche du col de la Cardonille. Les éléments sont décimétriques à pluridécimétriques et sont composés de calcaire récifaux et périrécifaux du tithonien. Ils contiennent notamment des faciès d'avant-barrière pouvant eux-mêmes générer des brèches sédimentaires.

- **Les « champignons dolomitiques » (Cirque des Baumes – Vallée du Tarn : Km = 36,5)**

Ces structures (Illustration 59) sont très caractéristiques des séries carbonatées en domaine languedocien et caussenard. On les observe notamment tout le long de la faille des Cévennes notamment (cirque de Mourèze) et de la faille de Sumène (Sumène, Mont Méjean).

Elles sont spécifiques par deux observations :

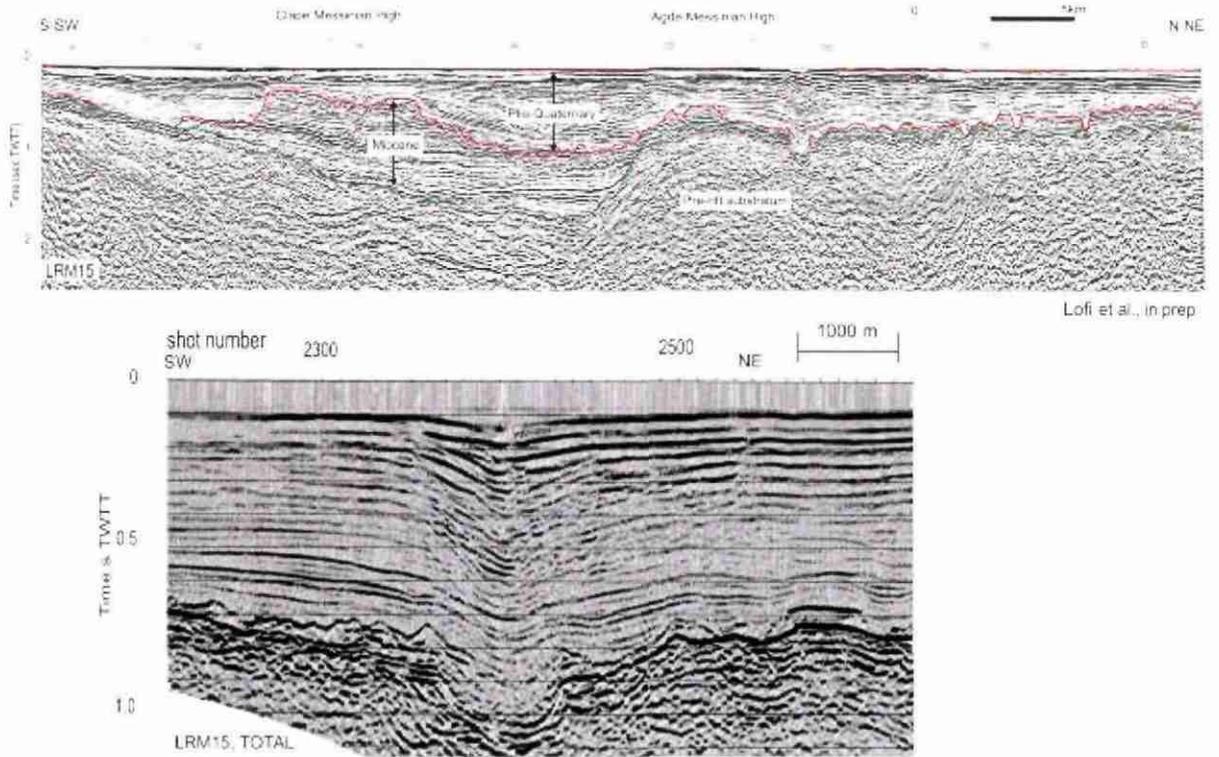
- une fracturation verticale omniprésente et souvent liée à des accidents plus profonds et majeurs ;
- une dolomitisation sécante à l'emporte pièce de toute la série concernée.



Illustration 59 : Vue générale vers le Nord du Cirque des Baumes où toute la série affleurante (Jurassique supérieur et sommet du Dogger) est dolomitisée et diaclasée verticalement

- **Les karsts effondrés et les dépressions éoliennes (Gouffre de l'œil doux – La Clape)**

Ces karsts effondrés semblent se retrouver sur tout le profil de dépôt en Languedoc et sur les Causses depuis la plate-forme du Golfe du Lion (Illustration 60), en passant par le domaine de la plaine (Illustration 61) jusqu'au sotch de Sorbs sur les Causses. Il s'agit de structures karstiques effondrées qui amènent des déformations dans les séries surincombantes jusque dans le Quaternaire. A ce titre on joint un extrait de la carte géomorphologique d'Ambert 1984 (Illustration 62) dans le secteur d'Ensérune qui montre une corrélation possible entre les dépressions éoliennes quaternaires et ces effondrements potentiels sous couverture.



Lofi et al., in prep.

Illustration 60 : Profil sismique au large du Languedoc montrant des anomalies qui peuvent être rapportées à des objets karstiques sous couvertures (J. Lofi comm. pers.). Les déformations associées aux effondrements dans la couverture se font ressentir jusque dans le plioquaternaire (J. Lofi comm. pers.)



Illustration 61 : Panorama général vers l'Est du Gouffre de l'œil doux.

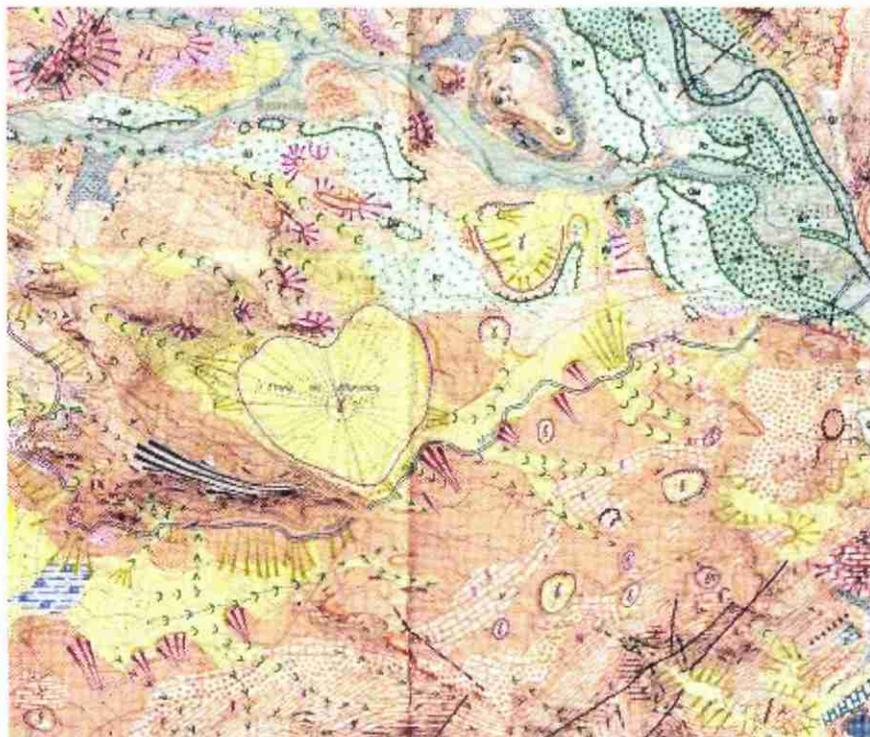


Illustration 62 : Extrait de la carte géomorphologique de Béziers (Ambert 1984) montrant la multiplication, dans les formations argilo sableuses du plioquaternaires, des dépressions éoliennes.

- **Les diapirs de sel triasique déformant la couverture sédimentaire jusqu'au miocène moyen (diapir de Peyriac - Aude).**

Cette vue (Illustration 63) montre la terminaison circulaire du diapir de Peyriac et les couches basculées et divergentes des couches calcaires du Miocène moyen. La mise en place du diapir est polyphasée, avec une phase qui est post miocène moyen.



Illustration 63 : Vue générale du toit du diapir de Peyriac (Aude) avec sur la périphérie les couches du Miocène moyen calcaire basculées.

4.5. INTERPRETATION GEOLOGIQUE DES PROFILS SISMIQUES SELON LE MODELE GRAVITAIRE

4.5.1. Introduction

Une interprétation géologique de quelques profils sismiques est proposée, en intégrant d'une part les travaux antérieurs, définissant la génétique de mise en place des géométries et d'autre part en essayant d'identifier des objets sismiques pouvant correspondre aux objets géologiques identifiés à l'affleurement comme de potentiels marqueurs d'un fonctionnement gravitaire de la marge de du bassin, à savoir:

- des brèches sur roll over,
- des brèches sur failles en fleur,
- des brèches sur failles listriques,
- des diapirs de pied de poussée gravitaire et de tête de blocs basculés,
- des diapirs évaporitiques.

4.5.2. Secteur de la vallée moyenne de l'Hérault

L'interprétation géologique profonde est en accord avec celle proposée par Maërtén pour les profils H83C, H83D et H83E (Illustration 64, Illustration 65 et Illustration 66).

Selon notre interprétation, la structure en rampe et pallier a été mise en évidence sur les différents profils (Illustration 68, Illustration 69 et Illustration 70). Des failles en fleur, ont été identifiées sur les profils H83-C et H83-D au niveau de têtes de blocs, conformément au modèle gravitaire, dans les parties occidentales des profils. Aussi, conformément à ce modèle gravitaire, d'autres structures à ce jour non identifiées ont été pointées avec plus ou moins de certitude. Des zones « sourdes » sont identifiées à proximité de failles ; ces zones sourdes difficilement interprétables sans calage Il pourrait s'agir de

- de brèches sur roll-over (profil H83-C et D) ;
- de brèches de pied de poussée (profil H83-C, D et E) ;
- de brèches sur faille listrique (profil H83-D et E), dans l'hypothèse où le modèle gravitaire soit validé.

Toutefois, ces objets sismiques à signature acoustique chaotique pourraient également résulter d'artéfacts sismiques non corrigeables par un retraitement sismique moderne.

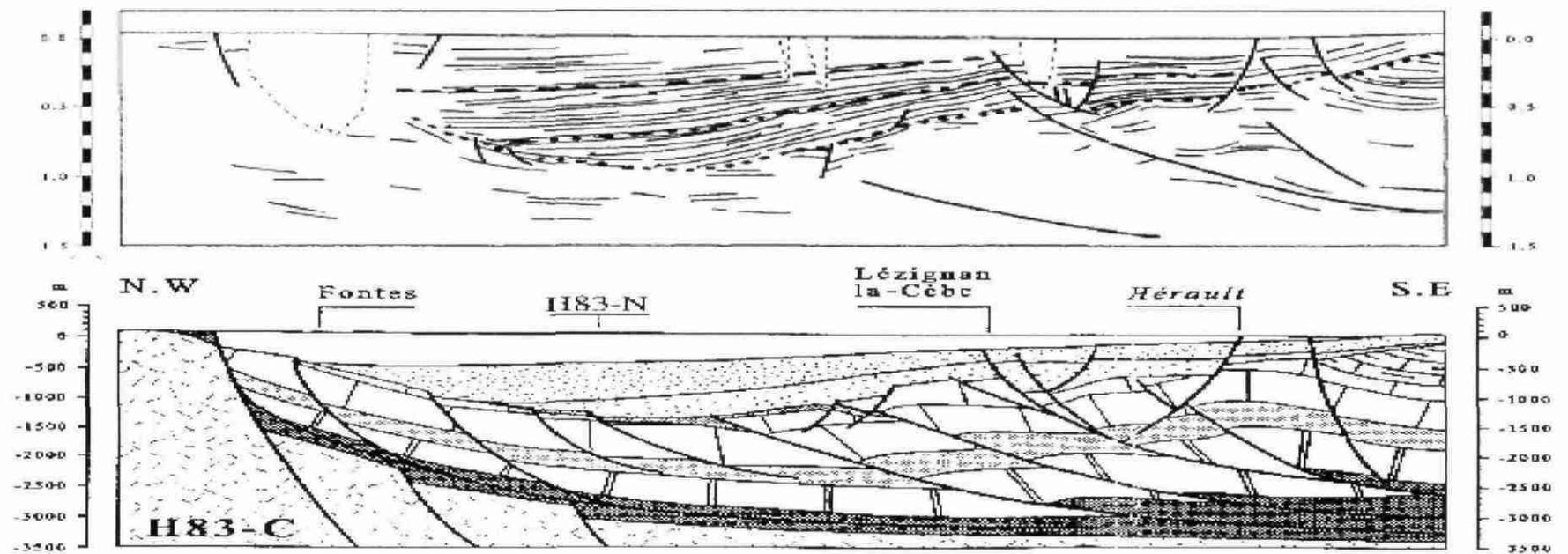


Illustration 64 : Interprétation sismique (coupe temps en haut) et géologique (coupe profondeur en bas) du profil sismique H83-C par Maërtens, 1994

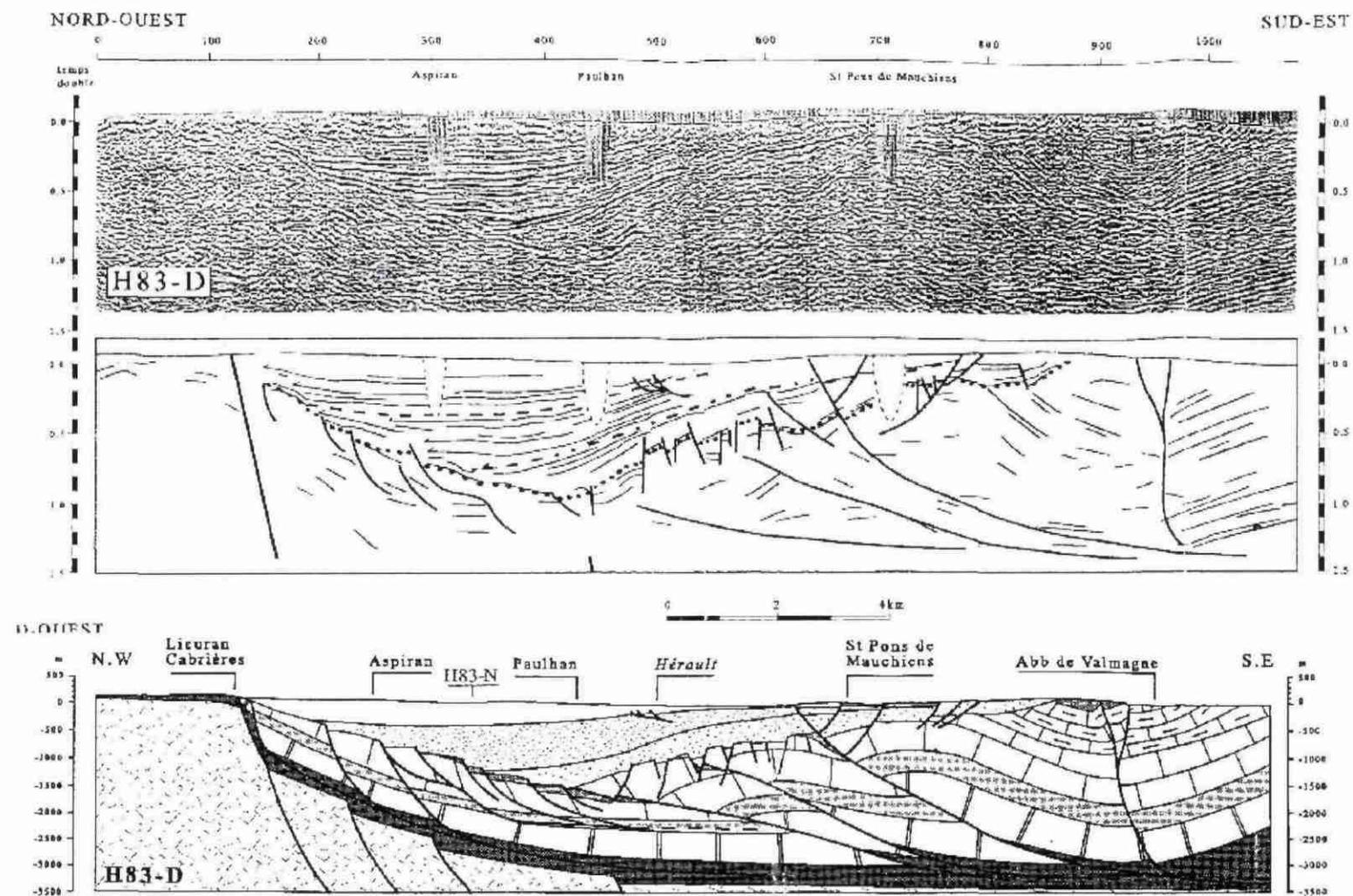


Illustration 65 : Interprétation sismique et géologique du Profil H83-D par Maërtens 1994 (de haut en bas : version vierge, interprétation sismique (coupe-temps) et interprétation géologique (coupe profondeur))

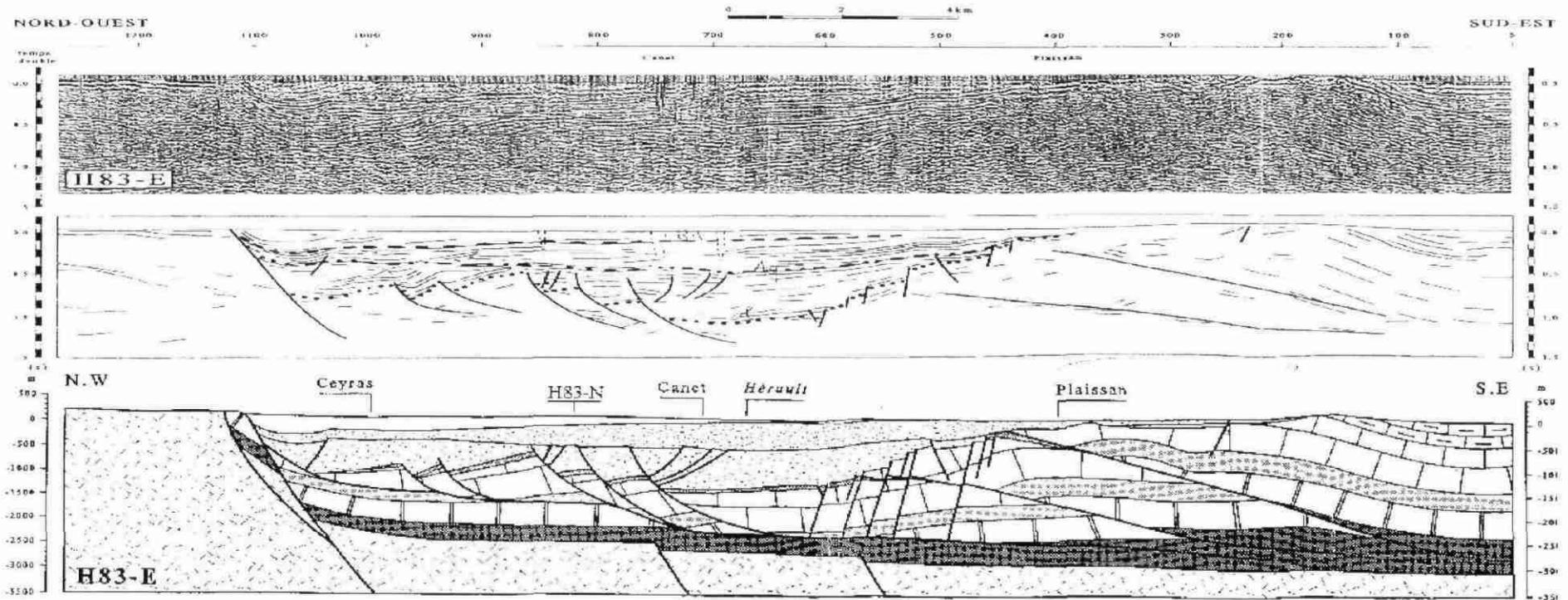


Illustration 66 : Interprétation sismique et géologique du profil sismique H83-E par Maërten, 1994 (de haut en bas, version vierge, interprétation sismique (coupe temps) et interprétation géologique (coupe profondeur).

Légende

| | | | |
|--|-----------------------------|--|---------------------|
|  | Faille |  | Diapir - Brèches |
|  | Limites du Tertiaire |  | Tertiaire |
|  | Limites du Crétacé |  | Crétacé |
|  | Limites du Jurassique |  | Jurassique |
|  | Limites Trias / Paléozoïque |  | Trias - Paléozoïque |

Illustration 67 : Légende des profils interprétés à l'aide du modèle gravitaire

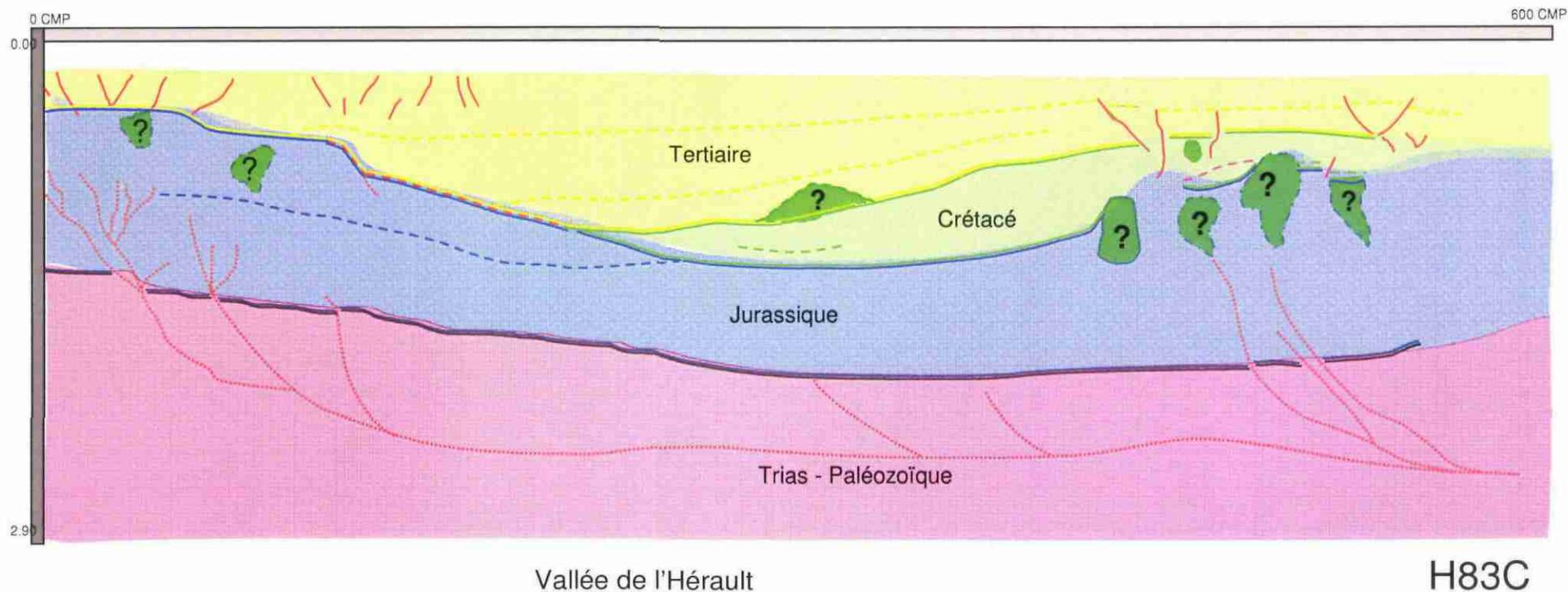


Illustration 68 : Interprétation géologique du profil H83C sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.

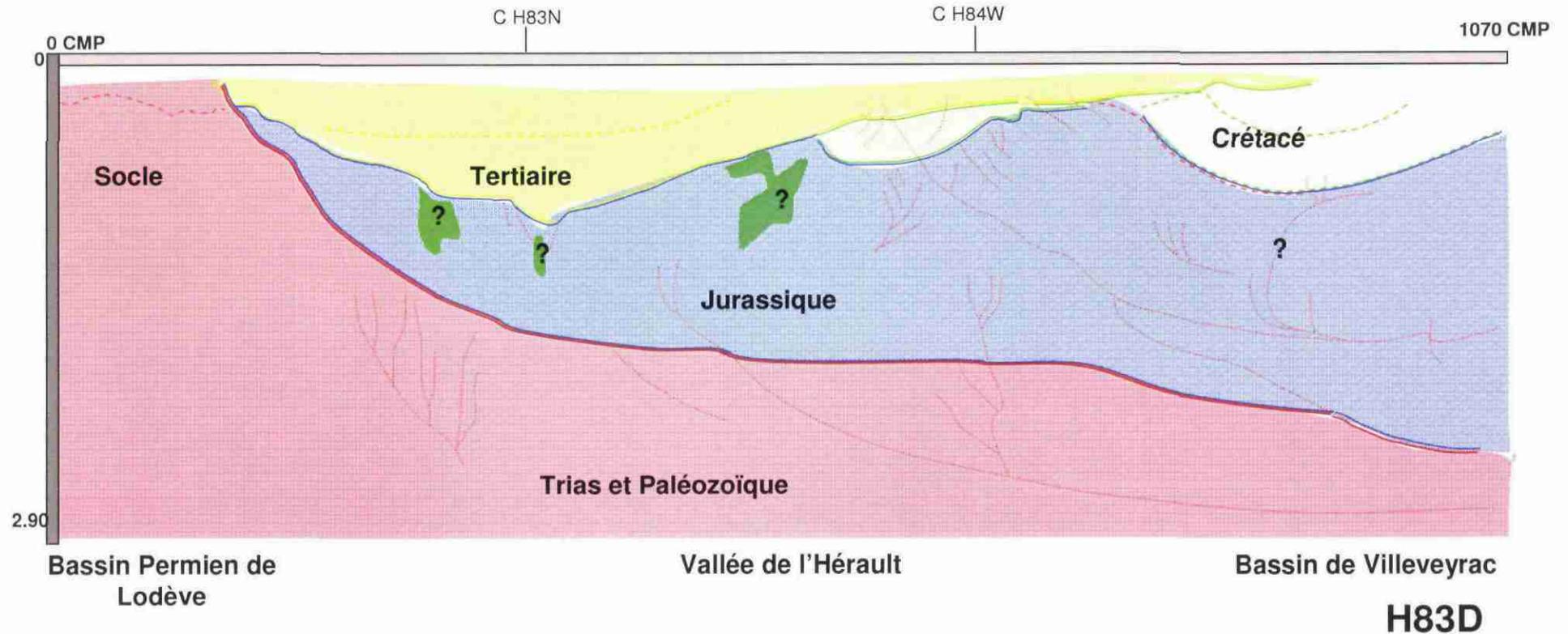


Illustration 69 : Interprétation géologique du profil H83D sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.

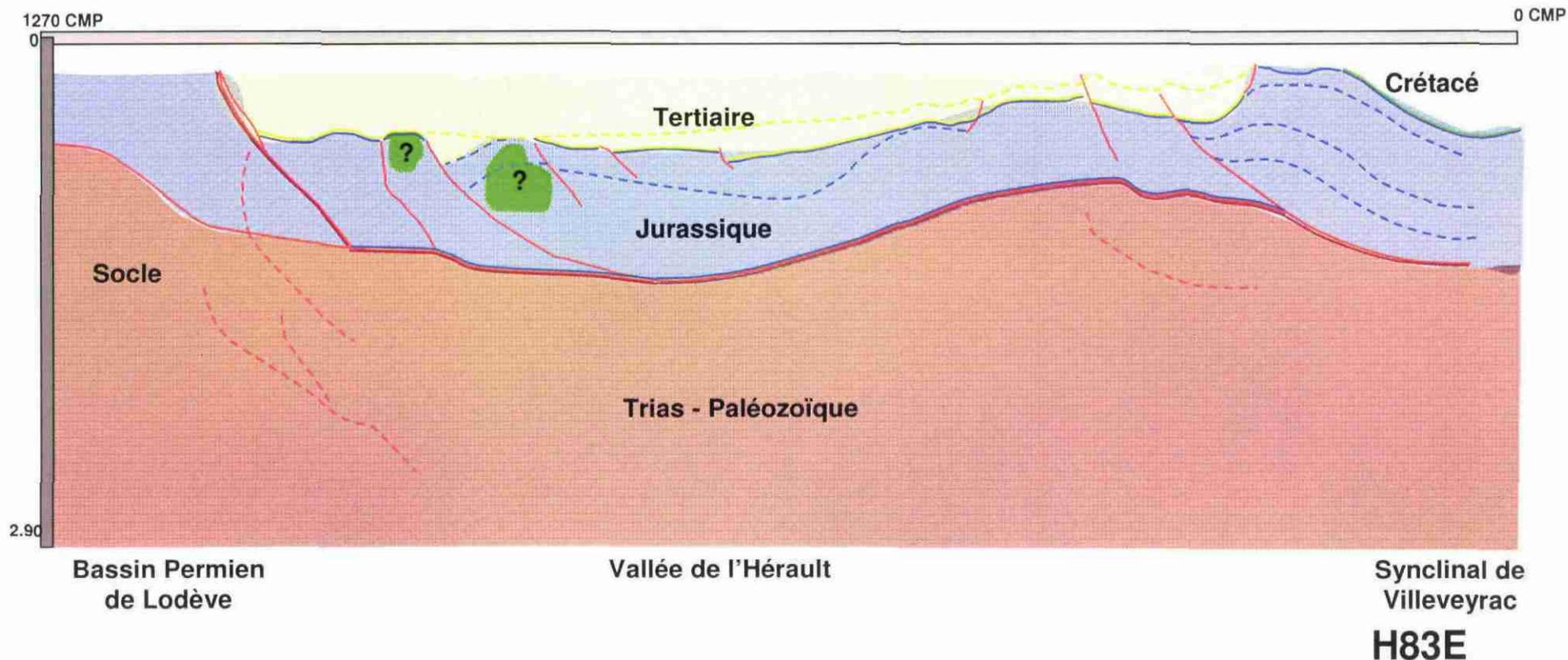


Illustration 70 : Interprétation géologique du profil H83E sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.

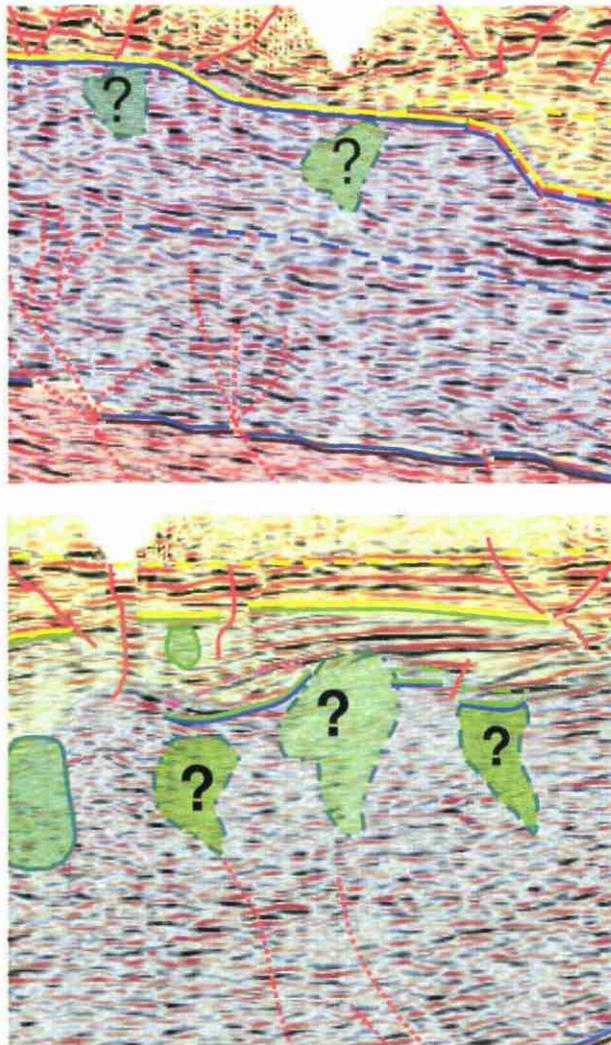


Illustration 71 : Détails de l'interprétation géologique selon le modèle gravitaire du profil sismique H83 –C avec en arrière fond le profil sismique. La zone sourde sous l'absence de couverture maximale (triangle jaune) peut engendrer un artefact sismique.

4.5.3. Secteur du Lez – Nord de Montpellier

Les structures profondes de la nouvelle interprétation sont comparables à celles de Benedicto (1996) (Illustration 72 et Illustration 73). De plus, un certain nombre d'éléments ont été pointés en considérant le modèle gravitaire de mise en place de la marge. Il s'agit de brèches de failles listriques, de failles en fleur et de roll-over et de diapirs de pied de poussée gravitaire. Des zones sourdes sont imagées, qui correspondraient à des zones de brèches associées à des failles, soit listriques ou en fleurs, soit à des mouvements gravitaires de pieds de poussée. Ces différents éléments sont notés sur l'illustration 74 et Illustration 75.

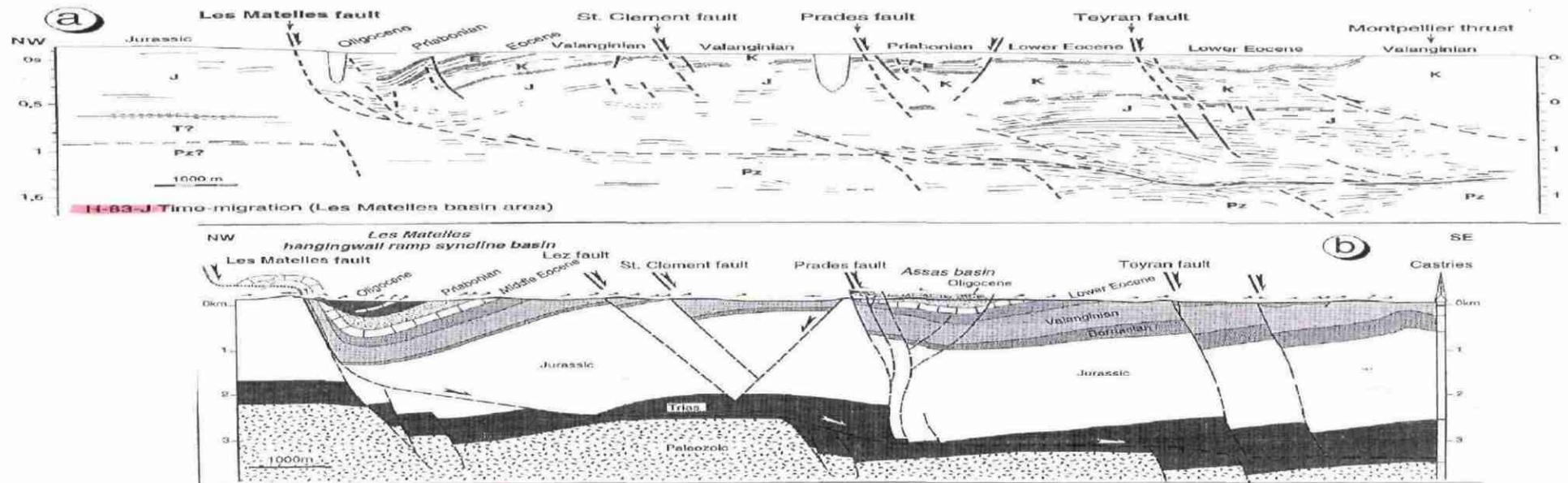


Fig. 8. a) Line drawing of the time-migrated H83-J seismic reflection line through Les Matelles basin area showing the deep extensional structure (location in Fig. 2b). b) Paleocene to Middle Eocene; K, Lower and Upper Cretaceous; J, Jurassic, T, Triassic; Pz, Paleozoic. General cross-section of Les Matelles basin area showing the extensional fault system. It is characterised by a thin-skinned extension (décollement) of the Mesozoic to Eocene cover above the Paleozoic basement. Differences between (a) and (b) sections are due to their slightly different orientation (see Fig. 2b).

Illustration 72 : Interprétation sismique et géologique du profil H83-J (Zone du bassin des Matelles) par Benedicto (1996).

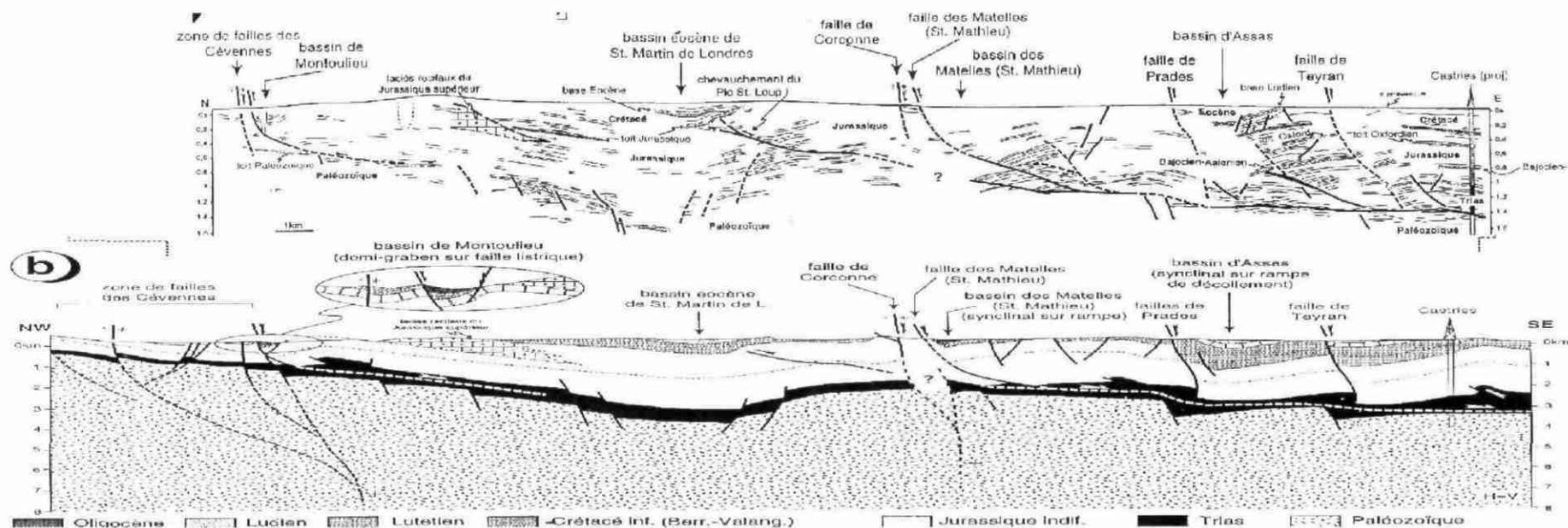


Illustration 73 : Interprétation sismique et géologique du profil H83-K par Benedicto (1996)

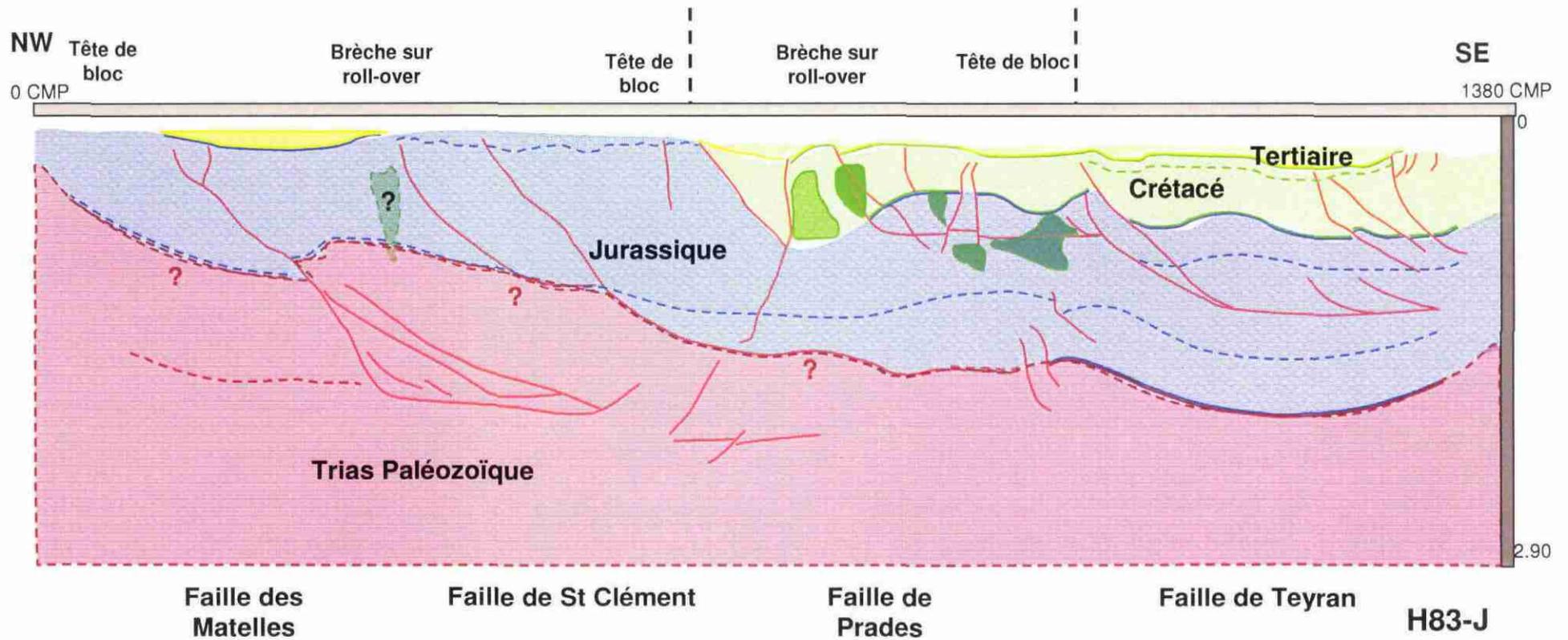


Illustration 74 : Interprétation géologique du profil H83J sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.

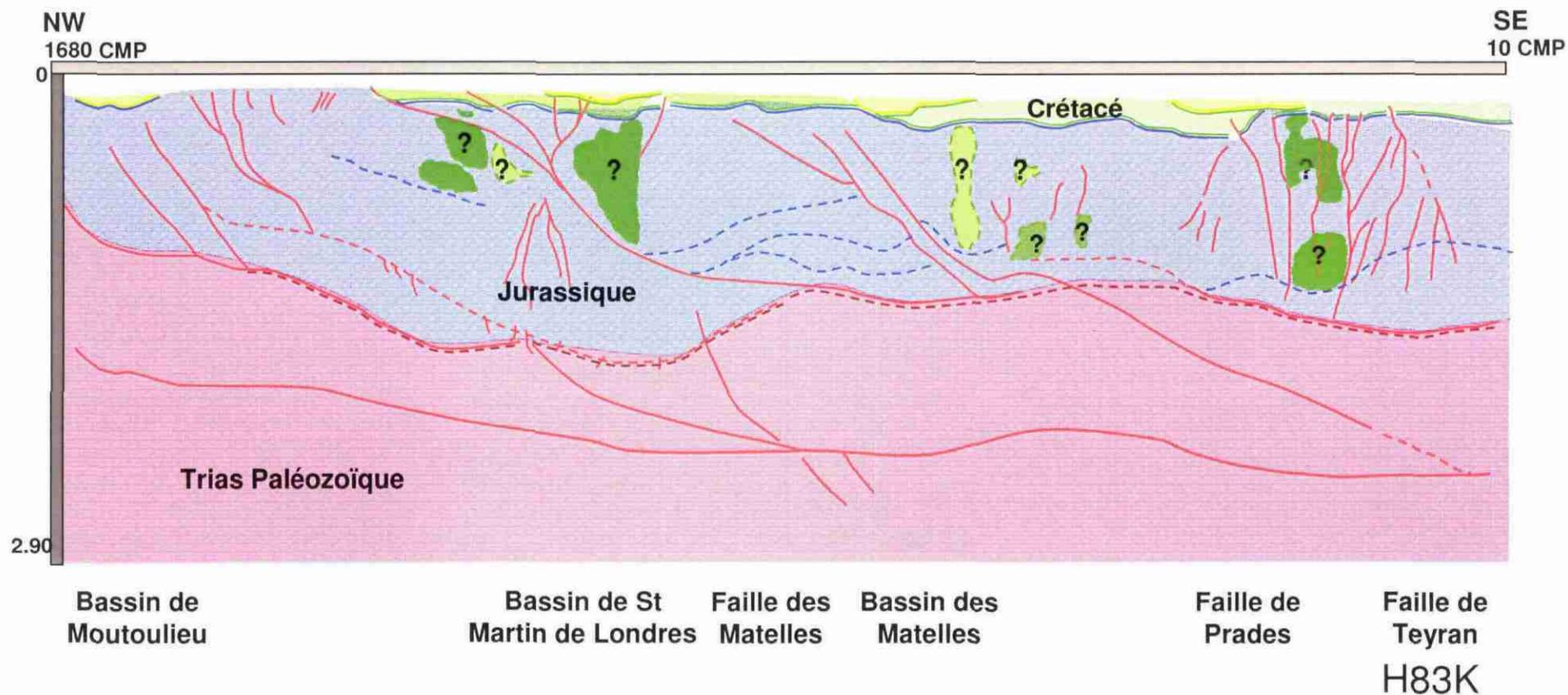
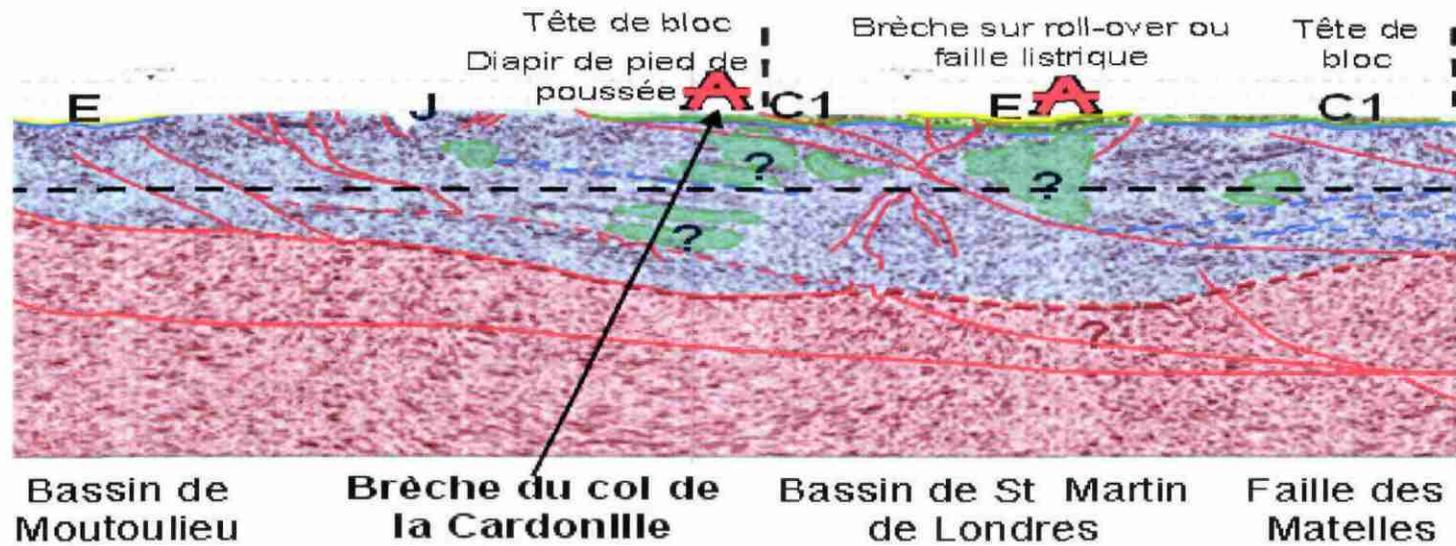
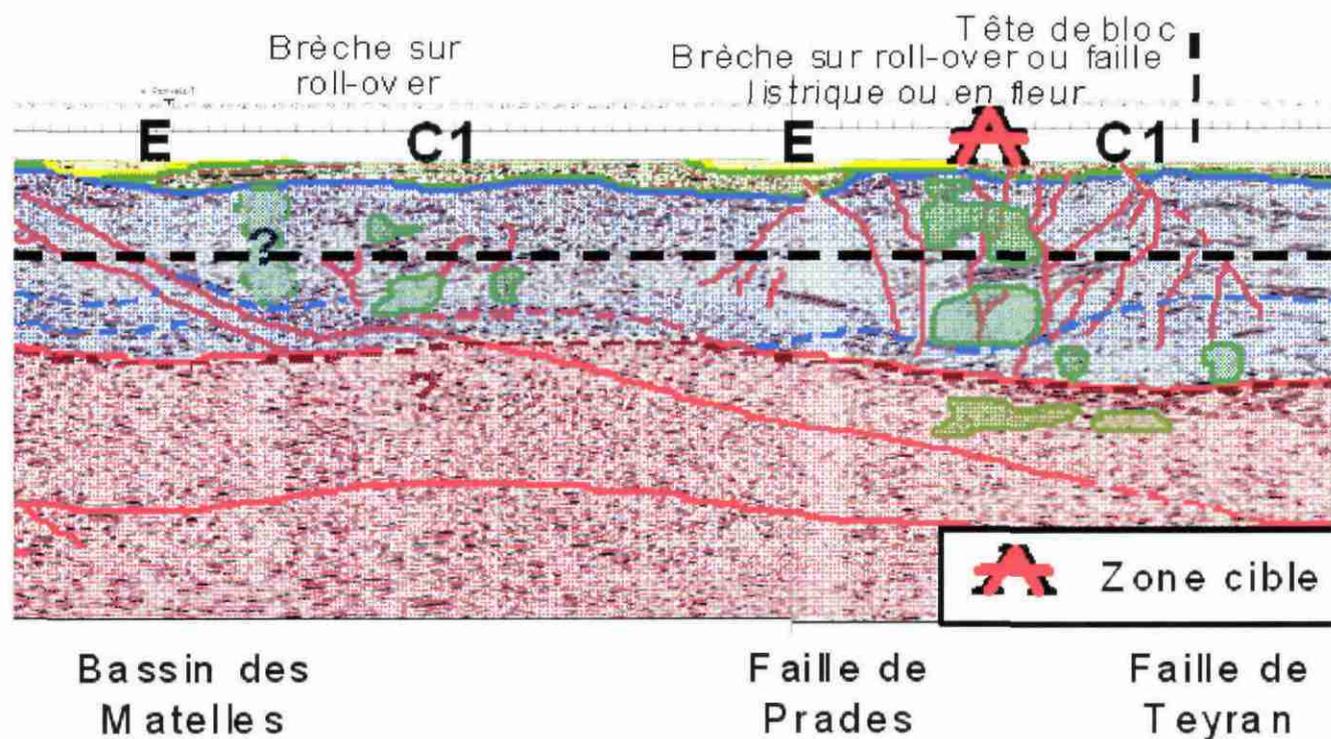


Illustration 75 : Interprétation géologique du profil H83K sur la base du modèle gravitaire et identification d'objets sismiques pouvant correspondre aux analogues de terrain utilisés pour étayer le modèle gravitaire. A savoir : ? = objet sismique à signature acoustique sourde interprété comme pouvant correspondre à des zones de brèches sur roll-over ou des brèches de pieds de poussée. Légende : Trait continu rouge : faille ; trait en pointillé : faille supposée.



(A) secteur Nord-Ouest du profil H83-K



(B) secteur Sud-Est du profil H83-K – Bassin des Matelles et Failles de Prades et de Teyran

Illustration 76 : Détail de l'interprétation géologique selon le modèle gravitaire sur le profil sismique H83-K : (A) secteur occidental avec les brèches de pieds de poussées correspondant aux brèches du Col de la Cardonille, et (B) secteur oriental avec des brèches sur roll over avec faille listrique et/ou en failles en fleurs.

4.5.4. Secteur d'Uzès

La zone d'Uzès comprend un certain nombre de déformations plicatives comme indiquées sur Illustration 77 d'Arthaud et Laurent 1971. Cette coupe NW-SE est remarquable, car elle présente bien les phénomènes géodynamiques successifs. En effet elle prend en compte tout d'abord les failles en fleur jurassiques liées aux « marches de socle ». Ces failles sont bien visibles au niveau du bassin d'Alès à l'Ouest. Tous les phénomènes plicatifs pyrénéo-provençaux s'expriment sous forme d'anticlinaux et de synclinaux accompagnés de décollements dans les couches « de type savon » du Trias. Enfin la distension oligo-miocène est enregistrée sous forme de roll over au niveau du bassin d'Alès à l'Ouest. La déformation tertiaire alpine reprend la faille en fleur jurassique bordière et réactive les structures plicatives.

L'extension oligo-miocène accompagnée du poinçonnement de la couverture sédimentaire par le socle des Cévennes entre 13 et 5,7 Ma (Ambert 1994) est donc très importante au niveau de ce transect. Il faut donc s'attendre à trouver des objets gravitaires liés à cette extension et à ce poinçonnement dans la couverture sédimentaire. Rappelons qu'à titre d'exemple sur la bordure ardèchoise (projet GPF 1989) une estimation géométrique de l'extension entre les périodes du Trias et du Bathonien avait été estimée à 1,630 Km. Cette extension n'avait pu être estimée pour la période crétacée – tertiaire faute de repères suffisants, mais elle n'en avait pas moins été jugée réelle.

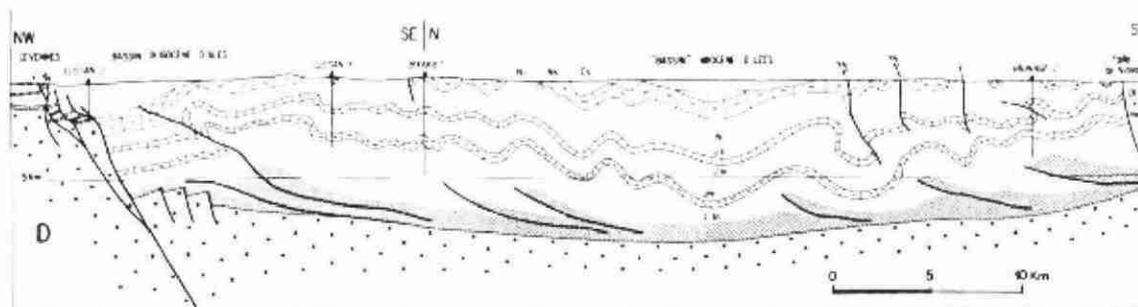


Illustration 77 : Transect NW-SE / N-S passant par le bassin d'Alès et la zone d'Uzès (Arthaud, Laurent, 1971)

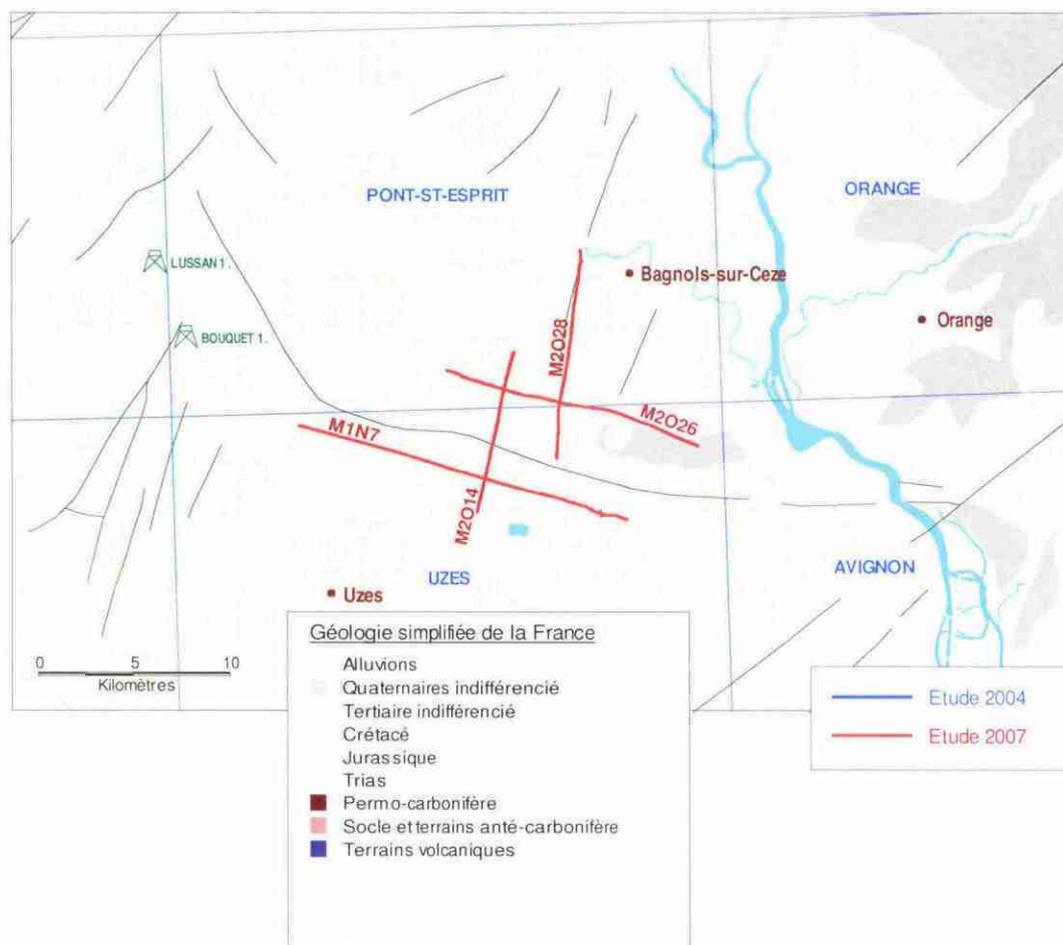


Illustration 78 : Carte géologique simplifiée de la région d'Uzès

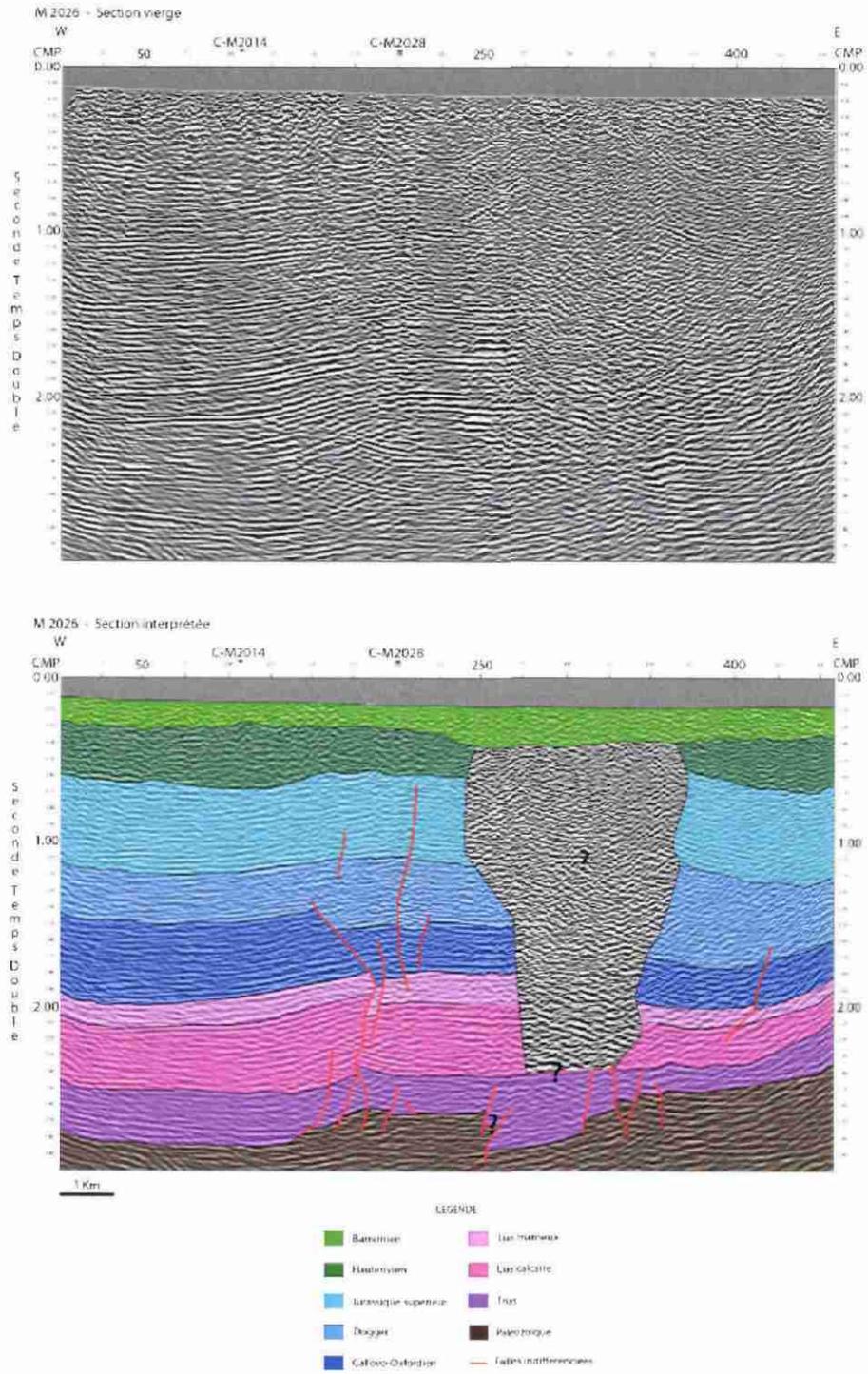


Illustration 79 : Section sismique M2026 vierge et interprétée

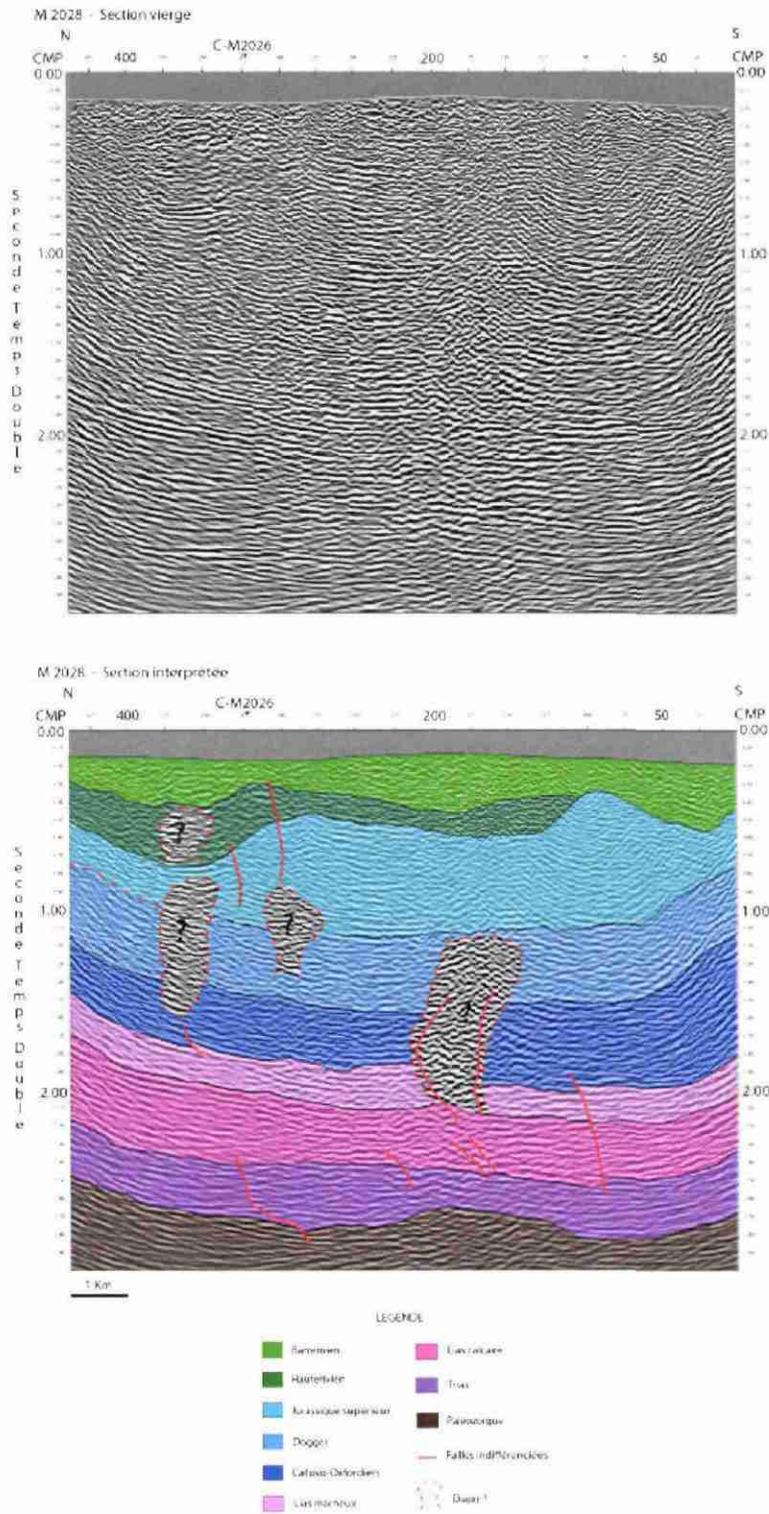


Illustration 80 : Section sismique M2028 vierge et interprétée

L'illustration 79 et l'illustration 80 des profils sismiques M028 et M026 positionnés sur la carte géologique de la région d'Uzès (Illustration 77) témoignent des déformations plicatives dans la région d'Uzès. Elles montrent aussi des structures assimilables à des diapirs de pied de poussée gravitaire dont les dimensions pourraient être spectaculaires. Sur le profil M026 la structure déterminée pourrait atteindre 3000 m d'amplitude verticale, alors que sur le profil M028 les objets auraient une dimension inférieure à 1000 m d'amplitude. Le conditionnel est employé ici, du fait que ces deux lignes sont des lignes analogiques anciennes non retraitables, pour lesquelles les processus de migration peut entraîner des problèmes de géométrie des réflecteurs. La zone sourde identifiée sur l'illustration 82 est une zone chaotique où certains réflecteurs sont continus. Ces objets représentent bien évidemment des cibles potentielles en tant que réservoirs puisqu'ils se situent dans la fenêtre à karst messinienne, qu'ils sont sous couverture crétacée et qu'ils ne sont pas situés à des profondeurs rédibitoires.

4.6. INTERPRETATION HYDROGEOLOGIQUE DES PROFILS SISMIQUES

L'interprétation hydrogéologique des profils sismiques repose sur la prise en compte de l'identification des zones potentiellement karstifiées ainsi que sur la prise en considération des objets géologiques identifiés lors de l'interprétation des profils sismiques selon un modèle gravitaire.

Les zones potentiellement karstifiées concernent les formations carbonatées sous couverture tertiaire, essentiellement. Les formations carbonatées considérées sont de manière générale celles du Jurassique et du Crétacé, et plus particulièrement celles du Crétacé inférieur, du Crétacé supérieur et du Jurassique supérieur. Les différents étages et sous-systèmes géologiques ne sont pas différenciés au niveau de l'interprétation des profils sismiques, à l'exception de certains profils du secteur d'Uzès. Les calcaires du Jurassique supérieur sont caractérisés par la présence de calcaires sub-lithographiques massifs avec une dolomitisation possible à sa base, pouvant passer latéralement à des faciès récifaux, pour le Kimméridgien supérieur. Différents faciès sédimentologiques prennent place au Portlandien, avec des faciès de plateforme externe (calcaires fins à chailles et brèches de sédimentation), de talus externe avec des calcaires bioclastiques, de barrière type récifal avec des calcaires blancs coralliens et de plateforme interne avec des calcaires graveleux et des dolomies en plaquettes. Le Portlandien est surmonté par une surface corrodée et perforée, encroûtée, ferrugineuse et phosphatée, avec la présence de paléo-karsts (Gottis, 1957, in Arthaud et al., 1988). Au niveau du Crétacé, les faciès sont essentiellement calcaires et calcaréo-marneux caractéristique d'une sédimentation en aggradation verticale sous une bathymétrie n'excédant pas 150 m.

Comme indiqué dans les tableaux de synthèse de l'évolution géodynamique et eustatique de la région languedocienne (cf. chapitre 3), plusieurs périodes ont été propices à la karstification, dénommées « fenêtre à karst », où le potentiel de karstification maximal est quantifié.

Du point de vue des objets identifiés, les brèches et les diapirs qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur voire plusieurs milliers de mètres ont été

identifiées. Ces objets situés notamment à proximité d'accidents majeurs peuvent ainsi constituer des zones d'écoulements préférentiels. De plus, la chute considérable du niveau de base au Messinien a favorisé les écoulements en profondeur le long de ces failles et augmenté l'amplitude de la « fenêtre à karst ». Ces zones de brèches sont caractérisées par une fracturation importante comme le montre les analogues de terrain et peuvent être associées à des circulations d'eau significatives. Elles sont identifiées comme des zones à fort potentiel de karstification et représentent donc des zones aquifères potentielles.

Des zones potentiellement aquifères et karstiques sont ainsi identifiées. Elles sont caractérisées :

- par la présence d'une couverture imperméable qui permet des mises en charge importantes ;
- des profondeurs compatibles avec une reconnaissance/exploitation par forage (soit moins de 1000 m), mais également compatibles avec les chutes du niveau de base durant le Messinien qui étaient d'environ - 600 m par rapport à la côte actuelle. L'amplitude de la « fenêtre à karst » peut donc être estimée entre l'altitude du point étudié et le niveau de base en corrélation avec le niveau de base messinien à la côte. La topographie dans le bassin de l'Hérault ne dépasse pas 100 mètres ; elle est de l'ordre de 200 à 300 mètres au niveau des profils du Lez. Une profondeur maximale d'investigation d'environ 900 mètres est donc retenue correspondant à environ 0.7 s temps double sur les profils (loi temps profondeur moyenne estimée à 3000 m/sec dans les carbonates ; les vitesses moyennes dans les formations du Miocène sont de 2000 m/sec et dans les formations de l'Oligocène de 2500 m/s). Cette limite correspond à la « la fenêtre à karst » des formations carbonatées ;
- des objets à fort potentiel aquifère (de type brèches et diapirs, et têtes de blocs basculés) ;
- un développement dans les séries jurassiques qui compte tenu de son étendue représente un important réservoir.

Ces zones potentielles devront faire l'objet d'une sélection en intégrant la notion de proximité géographique d'une collectivité ayant des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable. Le ou les sites retenus seront caractérisés à partir de prospection géophysique détaillée, de type sismique réflexion haute résolution par exemple ou autre, au niveau d'un secteur géographique d'environ 1 km x 1km, afin d'imager avec plus de précision les zones supposées de brèches et de failles, et ainsi de déterminer le lieu d'implantation d'un forage de reconnaissance.

4.6.1. Zones cibles potentiellement karstiques de la basse vallée de l'Hérault

La zone de diapir associée aux têtes de blocs se retrouve sur l'ensemble des trois profils H83-C, D et E. Elle est marquée par une zone de diapir de pied de poussée qui se développe au sein des séries carbonatées du Jurassique. Sur les profils H83-C et H83-E, une zone de brèche sur roll-over ou sur faille listrique est identifiée dans la partie Nord-Ouest.

Les zones cibles ont été replacées sur un fonds géologique ainsi qu'au niveau de la carte du remplissage synrift (Illustration 81 et Illustration 82). Pour la vallée de l'Hérault, les trois zones cibles correspondant au pied de poussée mise en évidence sur les profils se trouvent alignées. Cette zone semble ainsi être caractérisée en profondeur par de grandes zones de diapir, pouvant constituer un aquifère potentiellement continu. Cette zone est notée « zone cible élargie » dans l'illustration 81. Les profondeurs des zones cibles sont comprises entre 300 et 700 m.

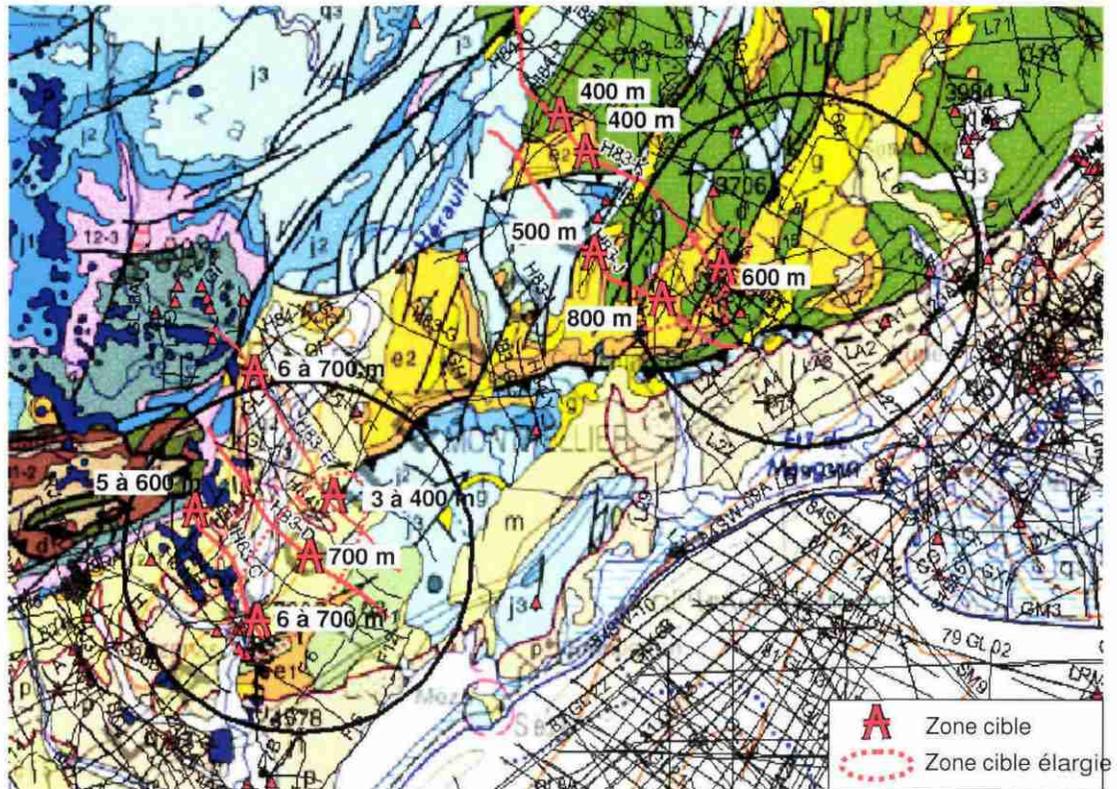


Illustration 81 : Zones cibles et élargies pour l'implantation de forages avec une estimation de la profondeur au niveau de la vallée moyenne de l'Hérault et du Lez

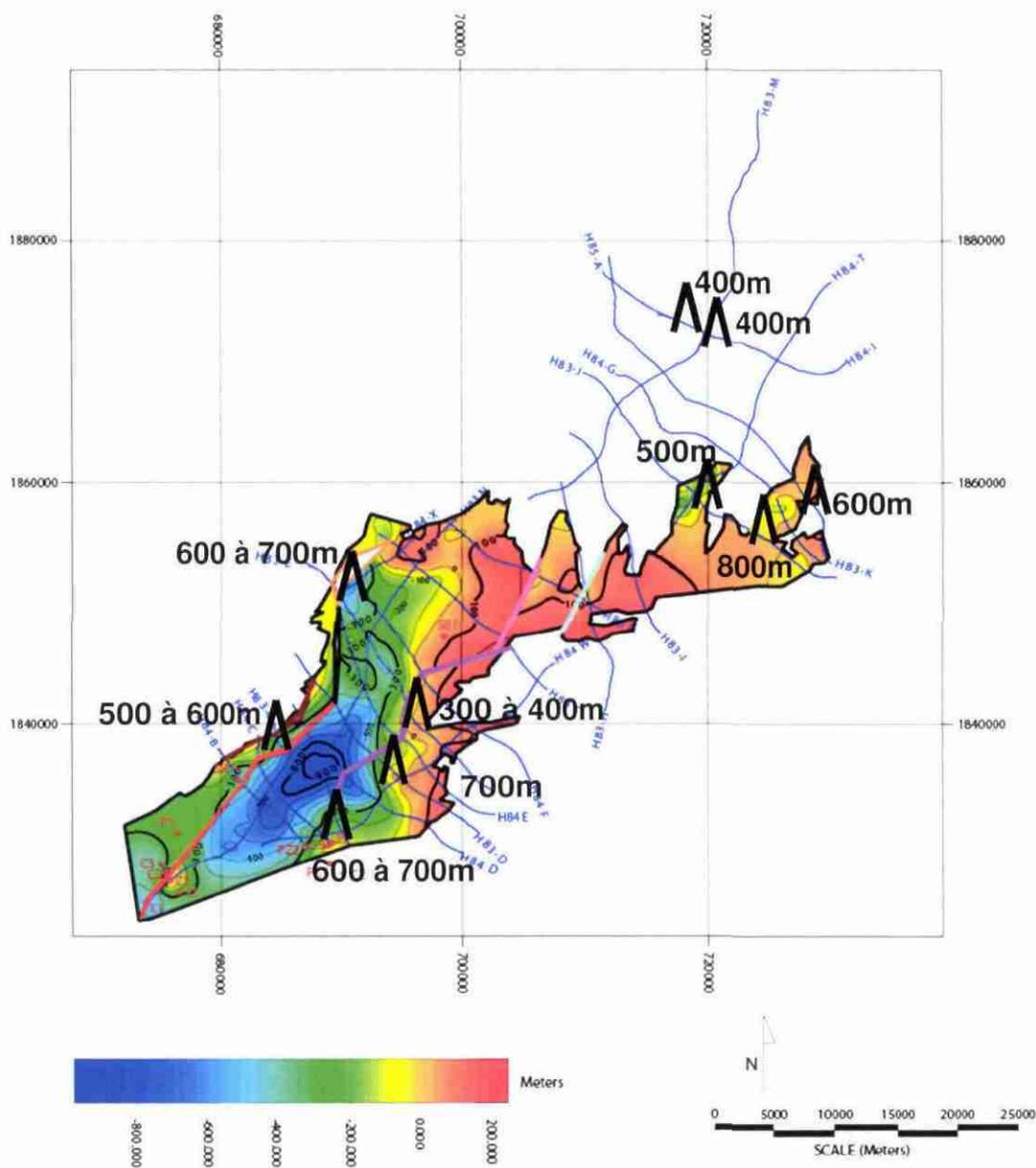


Illustration 82 : Identification des zones cibles pour la vallée de l'Hérault et la région Nord Montpellierain, positionnées sur la carte de remplissage synrift.

4.6.2. Zones cibles potentiellement karstiques du bassin d'alimentation du Lez

Une zone commune a été identifiée sur les deux profils dans la partie SE. Elle correspond à des diapirs de pied de poussée gravitaire situés au niveau d'une tête de

bloc (Illustration 74 et Illustration 75). De même sur le profil H83-K, deux zones ont été identifiées au NW (Illustration 75). La première est située au niveau du col de la Cardonille, où les brèches identifiées à l'affleurement sembleraient se prolonger en profondeur (Illustration 81 et Illustration 82). Cette structure est un diapir de pied de poussée gravitaire. Plus au Sud, une autre zone bréchique est identifiée sous couverture éocène ; elle est soit associée au roll-over, soit à la faille listrique. Bien que n'étant pas sous couverture, la zone de diapir de pied de poussée gravitaire correspondant au col de la Cardonille est conservée comme cible potentielle, la brèche étant identifiée à l'affleurement. Une caractérisation de cette zone à l'aide d'un forage de reconnaissance permettrait de préciser la nature de la karstification de tels objets.

4.6.3. Zones cibles potentiellement karstiques de la zone d'Uzès

Dans la zone d'Uzès les diapirs de pied de poussée gravitaire sont identifiés comme cibles potentielles du moment qu'ils répondent aux critères de sélection :

- profondeur abordable,
- objet sous couverture imperméable,
- structure favorable,
- pression anthropique raisonnable.

Deux sites ont donc été retenus sur le site d'Uzès qui répondent techniquement à ces critères. Ils sont portés sur la carte (Illustration 83).

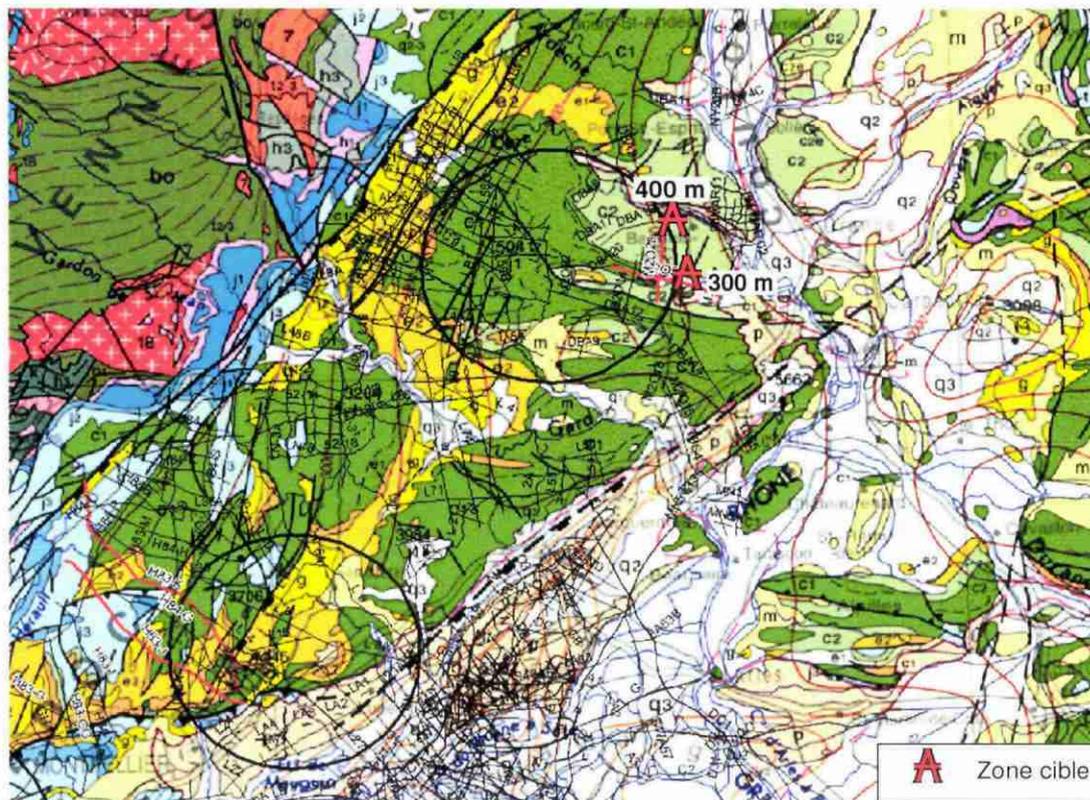


Illustration 83 : Identification des zones cibles pour la zone d'Uzès

5. Méthodologie géologique et hydrogéologique de caractérisation des aquifères karstiques sous couverture

A partir de la méthode mise en œuvre dans le cadre de ce projet de recherche, une méthodologie originale de caractérisation des aquifères karstiques sous couverture peut être proposée. Néanmoins, il reste nécessaire d'étayer la validité du modèle gravitaire, de vérifier la cohérence entre les objets à l'affleurement et les objets sismiques et de contrôler par l'acquisition de données nouvelles sur une cible jugée favorable, identifiée en sub-surface.

Cette méthode comprend 6 principales phases (Illustration 84) :

- (i) Synthèse paléogéographique et définition de l'amplitude de la fenêtre à karst ;
- (ii) Constitution d'un système d'information géographique regroupant la position des profils sismiques considérés, les informations relatives aux forages profonds, les coupes géologiques interprétatives disponibles, etc... sur un fonds géologique ;
- (iii) Sélection des profils sismiques disponibles bancarisés à réinterpréter ;
- (iv) Retraitement et interprétation sismique des profils géophysiques en pointant les surfaces caractéristiques et les failles principales ; reconstitution géométrique 2D du mur du syn-rift par interpolation des données de puits, d'affleurements et des pointés sismiques convertis en profondeur et élaboration d'un écorché des formations pré-rift ;
- (v) Interprétation géologique des profils sismiques à partir des modèles génétiques de mise en place des géométries et à partir d'un modèle gravitaire de mise en place de la marge et de l'identification d'analogues de terrain et des objets sismiques correspondants ; si le modèle gravitaire est valide et les objets sismiques « sourds » correspondent bien à des faciès bréchiques ou des diapirs de pieds de poussée, cartographie de leur localisation et indication de leur profondeur évaluée à partir de la sismique ;
- (vi) Interprétation hydrogéologique des profils en confrontant les informations géologiques, paléogéographiques et sismiques et définition de zones « cibles » pour investigations complémentaires et implantation de forages de reconnaissance pour validation de la méthodologie.

Les différentes phases de cette méthodologie sont détaillées ci-après.

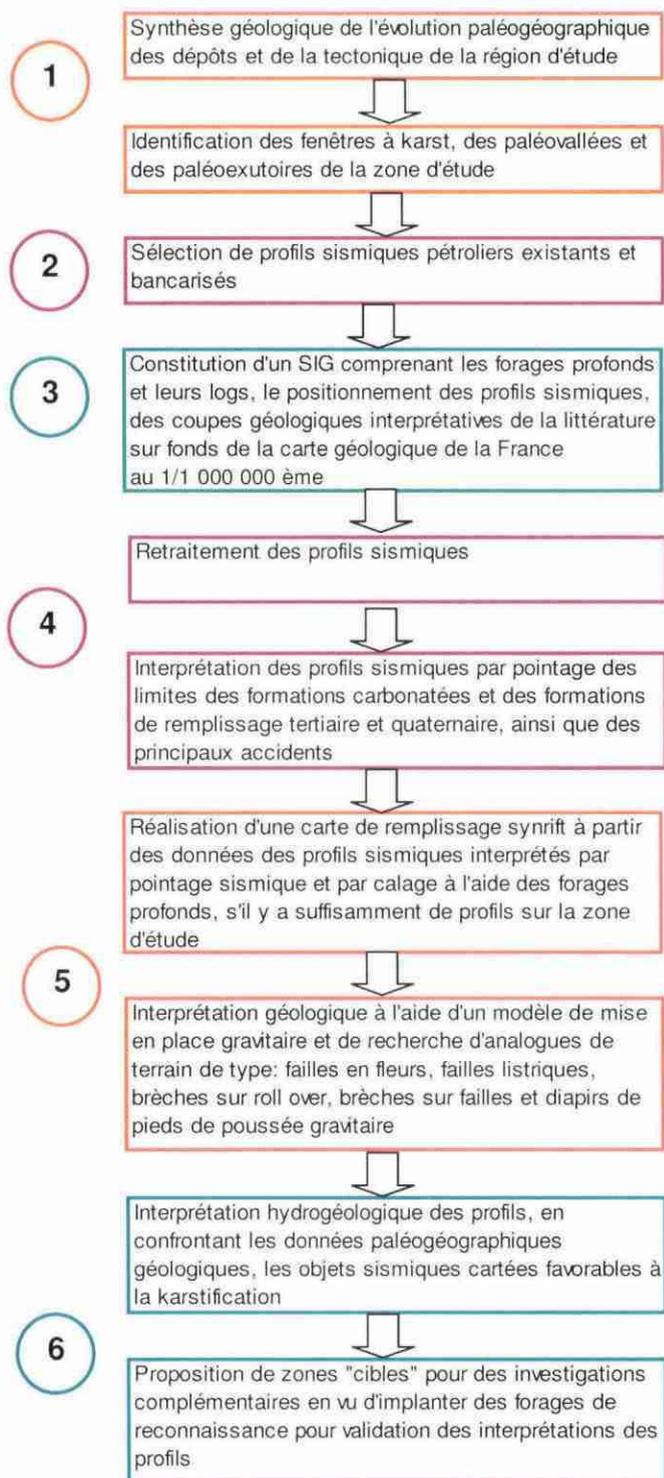


Illustration 84 : Schéma de la méthodologie de caractérisation des aquifères karstiques profonds sous couverture

(1) Synthèse géologique de l'évolution paléogéographique et géodynamique de la zone d'étude

Une synthèse géologique de l'évolution paléogéographique et géodynamique de la zone d'étude est effectuée à partir des documents de synthèse existant sur la zone d'étude. Cette synthèse consiste à décrire les différentes conditions de dépôts sédimentaires de la période secondaire, les formations carbonatées potentiellement karstifiées intéressantes étant celles du Jurassique et du Crétacé, pour la caractérisation et l'investigation des karsts sous couverture. La période ciblée pourra être différente en fonction du contexte géographique de la zone d'étude ; des formations carbonatées du Primaire sous couverture peuvent également faire l'objet d'investigation. Dans ce cas, la synthèse concernera cette période. Des cartes paléogéographiques des conditions de dépôts et de leur extension sont à utiliser.

Les résultats de la synthèse seront présentés sous forme de texte accompagné d'illustrations adaptées ainsi que sous forme d'un tableau synthétique. Le tableau de synthèse met en regard l'évolution eustatique en considérant la charte de l'eustatisme au niveau mondial (Haq *et al.*, 1987), les périodes où des amplitudes eustatiques sont importantes en les quantifiant ainsi que le contexte géodynamique et l'évolution paléogéographique (périodes de compression ou de distension, périodes de transgression, régression et émergence). Les périodes favorables au développement vertical des réseaux de conduits karstiques correspondent ainsi au période de chute importante du niveau de base lié aux chutes de niveau marin, alors que les périodes de stabilité du niveau marin correspondront aux périodes favorables à un développement horizontal des réseaux karstiques. Les « fenêtres à karst » peuvent ainsi être localisées sur un tel tableau de synthèse, ainsi que leur épaisseur, correspondant à la variation maximale du niveau eustatique sur une période donnée. Le rôle de la tectonique avec des mouvements verticaux est également à prendre en considération.

(2) Constitution d'une base de données et d'un système d'information géographique

Un système d'information géographique permet d'avoir une vision rapide de l'ensemble des données disponibles sur la zone d'étude considérée, en utilisant aussi bien un fond géologique (carte géologique au 1/1000 000, au 1/50 000) qu'un fond topographique (carte de l'IGN au 1/100 000 ou 1/25 000). Ce système est associé à une base de données concernant : (i) les forages profonds existants sur la zone, extraits de la banque de données du sous-sol (BSS), (ii) les logs lithologiques des forages sous forme de documents associés, (iii) les lignes sismiques existantes sur la région (données disponibles au brgm), (iv) les coupes géologiques interprétatives disponibles dans la littérature ou réalisées pour les besoins de l'étude et (v) des isohypses du toit et/ou mur de formations carbonatées ciblées si celles-ci sont disponibles dans des études antérieures.

(3) Sélection des profils sismiques

La sélection des profils représentatifs des zones complexes et structurées (failles, déformations) est effectuée en considérant d'une part la qualité des données

disponibles (date d'acquisition des profils sismiques et type de support), l'existence de forages profonds nécessaires au calage de l'interprétation des profils sismiques et les zones de besoins.

(4) Retraitement des profils sismiques et interprétation des profils sismiques

Le retraitement des profils intervient après le déstockage des données brutes (enregistrements des tirs et documents terrain) auprès des opérateurs pétroliers ; il est effectué selon une séquence d'étapes, comprenant entre autre la validation des corrections statiques, dynamiques, des mutes et de la déconvolution. La supervision du retraitement si celui-ci est sous-traité doit être effectué par des géophysiciens, afin de s'assurer que le retraitement permettra d'obtenir des données de qualité, notamment en terme de résolution au niveau des interfaces remplissages sédimentaires et formations carbonatées et des accidents.

Le traitement a pour but d'additionner les tirs unitaires enregistrés sur bandes magnétiques au niveau du camion laboratoire. Après traitement dans un centre de calcul spécialisé, on obtient une section sismique qui donne une image du sous-sol à la verticale du profil. Les principales phases du traitement sont :

- la saisie des coordonnées des géophones et points de tir ;
- la mise en collection points miroirs : un même point miroir théorique est atteint par différents trajets qu'il convient de sommer (principe de la couverture multiple) ;
- la déconvolution dont le but est de « nettoyer » le signal ;
- le calcul des corrections statiques. Elles corrigent l'effet des variations verticales et latérales de vitesses des terrains de surface et ramènent les temps à un plan horizontal appelé datum plane. On distingue les corrections statiques primaires calculées à partir des mesures de vitesse sur la mission (carottages VT) et les corrections statiques résiduelles calculées à partir de logiciels spécialisés ;
- les corrections dynamiques qui corrigent les réflexions générées par les couches géologiques de la courbure liée à l'éloignement entre le point d'émission et le capteur ;
- la migration qui replace les réflexions en position vraie.

Les produits finaux comprennent, (i) les sections papiers dans leur version migrées et (ii) les fichiers SEG Y des versions migrées utilisables sur station d'interprétation.

Les sections sismiques sont à caler à partir des forages existants, pointés et intégrés dans la cartographie, ainsi qu'à partir des coupes interprétatives disponibles.

Une carte des remplissages sédimentaires, constituant la couverture des formations carbonatées ciblées, peut ainsi être réalisée en considérant les résultats des interprétations sismiques des profils où l'interface a été pointée ainsi que les failles. Une première carte est réalisée en considérant les temps, donnant ainsi une image du style structural du domaine d'étude. Cette carte est traduite en profondeur dans un deuxième temps. Trois étapes sont nécessaires : La première étape est la restitution d'une carte d'isochrones. Elle correspond à la profondeur en temps, par rapport au

datum sismique, issue directement du pointé des sections. Cette carte est difficilement exploitable, car elle ne renseigne pas sur la profondeur en mètres de la surface cartographiée. La deuxième phase est la réalisation d'une carte de vitesses de tranche. Cette carte est obtenue par intégration des données de forages. La troisième et dernière étape est la réalisation de la carte d'iso-altitudes et/ou d'iso-profondeurs proprement dite. Cette carte est obtenue par intégration de la carte en temps et de la grille de vitesse. Le résultat donne une carte, dite d'isohypses, qui correspond à la profondeur du niveau cartographié, en mètres par rapport au niveau de la mer (NGF).

(5) Interprétation géologique selon un modèle conceptuel de mise en place et réalisation d'une carte de synthèse du remplissage sédimentaire

L'interprétation géologique des profils sismiques intervient dans un second temps. Celle-ci est effectuée en considérant un modèle conceptuel de mise en place des formations carbonatées lors des déformations successives. Le modèle conceptuel est établi à partir des données géodynamiques et tectoniques sur la mise en place des formations – style compressif et/ou distensif et/ou gravitaire, existantes dans la littérature scientifique. De nouveaux modèles peuvent être envisagés, à partir d'observation d'analogues de terrain, comme cela a été proposé dans le cadre de ce projet de recherche.

(6) Interprétation hydrogéologique et proposition de zones cibles pour investigation détaillée en vue d'implanter des forages de reconnaissance

L'interprétation hydrogéologique des profils sismiques repose sur la prise en compte de l'identification des zones potentiellement karstifiées ainsi que sur la prise en considération des objets géologiques identifiés lors de l'interprétation des profils sismiques selon le modèle conceptuel retenu. Les objets géologiques peuvent être d'une part des têtes de blocs basculés qui ont été soumises à de la karstification, des zones de failles – failles normales, inverses ou listriques, et d'autre part des zones de floue sismique pouvant correspondre soit à des zones de brèches, soit à des diapirs (modèle conceptuel de mise en place gravitaire d'une marge (cf démarche retenue dans le cadre de ce projet de recherche)). La dimension des objets est prise en considération. Les objets ayant une épaisseur de plusieurs centaines de mètres sont retenues, les autres pouvant être considérés comme difficilement interprétables.

Des zones potentiellement aquifères et karstiques peuvent ainsi être identifiées. Elles sont caractérisées :

- par la présence d'une couverture imperméable qui permet des mises en charge importantes ;
- des profondeurs compatibles avec une reconnaissance/exploitation par forage (soit moins de 1000 m), mais également compatibles avec les chutes du niveau de base durant des chutes de niveau marin important (comme par exemple au Messinien). L'amplitude de la « fenêtre à karst » peut donc être estimée entre l'altitude du point étudié et le niveau de base en corrélation avec le niveau de base messinien à la côte. La topographie de la zone d'étude est à prendre en considération ainsi que

l'amplitude de la fenêtre à karst, afin de déterminer la profondeur d'investigation à retenir ;

- des objets à fort potentiel aquifère (de type brèches et diapir) ;

Des zones potentielles sont ainsi identifiées sur les profils et repositionnées sur les cartes en isohypses du remplissage sédimentaire de bassin, constituant la couverture des formations carbonatées ciblées. Les profondeurs des zones cibles sont ainsi reportées sur une carte de synthèse.

Ces zones potentielles devront faire l'objet d'une sélection en intégrant la notion de proximité géographique d'une collectivité ayant des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable. Le ou les sites retenus seront caractérisés à partir de prospection géophysique détaillée, de type sismique réflexion haute résolution par exemple ou autre, au niveau d'un secteur géographique d'environ 1 km x 1km, afin d'imager avec plus de précision les zones de brèches et de failles, et ainsi de déterminer le lieu d'implantation d'un forage de reconnaissance.

6. Conclusion et perspectives

Les aquifères karstiques profonds sous couverture représentent des aquifères potentiellement intéressants pour faire face aux besoins en eaux lors des décennies à venir, notamment sur le pourtour méditerranéen. Du fait de la nécessité de réaliser des forages profonds pour capter ces ressources et à cause du risque d'échec vis-à-vis de la productivité, ces aquifères ne sont que peu ou pas exploités.

La synthèse bibliographique effectuée concernant l'étude des aquifères karstiques profonds sous couverture a montré qu'aucune méthode spécifique n'a été développée à ce jour par les hydrogéologues, en considérant les périodes favorables à la karstification, la définition des géométries et l'identification d'objets sismiques intéressants à partir de l'interprétation des profils sismiques. L'interprétation de profils sismiques haute résolution et la réalisation de nombreux forages verticaux et obliques sont utilisées uniquement dans le cadre de la caractérisation de réservoirs pétroliers ; dans ce cadre, des paléokarsts ont été étudiés en détail, avec la mise en évidence de paléodolines avec remplissage.

Des profils sismiques pétroliers réalisés dans les années 1980 par les compagnies pétrolières ont été retraités par le BRGM, totalisant quelques 350km et concernant trois zones en Languedoc Roussillon, dans le but de caractériser les aquifères karstiques profonds sous couverture est ainsi une première. Le retraitement de ces profils a permis d'améliorer l'identification des réflecteurs associés aux formations carbonatées et au remplissage sédimentaire tertiaire, ainsi que des principales failles de type failles listriques notamment. L'interprétation des profils sismiques en pointant les limites remplissage- formations carbonatées du Crétacé et/ou Jurassique a permis de dresser une carte de remplissage synrift au niveau de la vallée moyenne de l'Hérault, un des trois sites d'étude, pour lequel la densité de profils sismiques réinterprétés était suffisante et le calage à l'aide de forages présents.

L'interprétation géologique de neuf profils sismiques en identifiant des objets sismiques significatifs associés à des objets structuraux et des analogues de terrain d'un modèle gravitaire de mise en place de marges sur socle est une démarche originale. Les objets mis en évidence à l'affleurement sont des failles en fleurs, failles listriques, brèches sur roll-over, brèches associées aux failles listriques et brèches associées aux diapirs de pieds de poussée gravitaire. Ces objets structuraux ont été reconnus sur le terrain, au niveau des gorges du Tarn, en Languedoc jusqu'à la plateforme continentale. Les brèches de manière générale peuvent être identifiées au niveau de zones dites sourdes présentes de manière structurée au niveau des profils. Certaines sont associées à des déformations de part et d'autre des réflecteurs. Pour d'autres, le pointage sismique n'est pas si évident et nécessitera une validation lors d'investigations complémentaires. Des zones de brèches associées à des failles en fleurs et des roll-overs sont présentes sur les parties septentrionales des profils d'orientation NO-SE. Des zones de brèches liées à des diapirs de pieds de poussée

gravitaire sont quant à elles identifiées dans les parties plus distales de la marge, au niveau des parties méridionales des profils.

La confrontation des interprétations géologiques des profils sismiques effectuées à l'aide d'un modèle gravitaire de mise en place de la marge, avec les éléments issus de la synthèse géologique et paléogéographique du Sud-Est de la France et de la région languedocienne a permis de définir des zones cibles. Ces zones cibles concernent soit des têtes de blocs basculés des formations carbonatées, soit des zones de pieds de poussée gravitaire. Ces zones constituent des cibles pour implanter des forages de reconnaissance. L'implantation des forages de reconnaissance nécessitera des investigations complémentaires de type géophysique sur une surface restreinte de l'ordre du kilomètre. Ces investigations permettront d'imager de manière plus précise les objets structuraux à intercepter à l'aide d'un forage. Les profondeurs d'investigation restent importantes, comprises entre 400 et 800 m de manière générale sur la zone d'étude.

Cette méthodologie développée et appliquée à la région du Languedoc est une méthodologie tout à fait transposable dans la région Sud-Est de la France, pour laquelle un modèle gravitaire de mise en place de la marge carbonatée sur marge de socle est vérifié à l'aide d'observations de terrains. Cette méthodologie doit être encore approfondie, en effectuant un travail approfondi sur les caractéristiques des objets sismiques identifiés pouvant se rattacher aux analogues de terrain (taille, forme, localisation stratigraphique, relation avec les failles, ...). La validation de la méthodologie devra passer dans une phase ultérieure par des investigations géophysiques détaillées de haute résolution et la réalisation de forages de reconnaissance. L'application de cette méthodologie dans un autre contexte devra passer par une synthèse détaillée de l'évolution géologique et géodynamique, afin de déterminer le modèle génétique permettant d'identifier les géométries des formations carbonatées sous couverture, ainsi que des reconnaissances de terrain. L'identification des paléo-vallées et des paléo-exutoires des formations est nécessaire. Le recours à l'étude des paléosurfaces et à leur relation avec les incisions des vallées au cours du temps géologique peut être nécessaire, en se rapportant à la méthodologie développée par Aunay et al. 2002.

7. Principales références bibliographiques

- Ambert P.** 1984. L'évolution géomorphologique du Languedoc central depuis le néogène (grands Causses méridionaux – piémont languedocien). *Documents du BRGM 231*.
- Arfib, B., Cavalera, T., Gilli, E.,** 2006. Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. *Comptes Rendus Geoscience*, 11p.
- Arfib, B.,** 2001a. Etude des circulations d'eaux souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce). *Thèse de troisième cycle, Université Paris VI*, 337 p.
- Arfib, B.,** 2001b. Ecoulement préférentiels en aquifères karstiques côtiers : impacts sur la salinité de l'eau dans le système de l'Almyros d'Héraklion, Crète, Grèce. *7e Colloque en Pays calcaire et Milieu Fissuré*, pp. 13-16.
- Aunay, B. et Le Strat,** 2002. Introduction à la géologie des Corbières. Rapport BRGM/RP-51595-FR.
- Bakalowicz M.** 1986. La karstification : processus, modèles et exemples. *9^{ème} cong. Internat. Spéléologie*, Barcelone, 3, pp. 59-63.
- Baudrimont A-F. et Dubois, P.** 1977. Un bassin mésogéen du domaine péri-alpin : le Sud-Est de la France. *Bull. Cent. Rech. Explor. – Prod. Elf-Aquitaine* -, 261-306.
- Benedicto, E.A.** 1996. Modèles tectono-sédimentaires de bassins en extension et style structural de la marge passive du Golfe du Lion (partie nord). *Thèse de Doctorat Européen*, Université de Montpellier II, Montpellier.
- Blanc, J.J.** 1995. Etapes et facteurs de la Spéléogénèse dans le Sud-Est de la France. *Karstologia*, 26 (2) : 13-26.
- Blavoux, B., Gilli, E., Rousset, C.,** 2004. Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille-Cassis). Principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien. *C. R. Géoscience*, 336 (6): 523-533.
- Bodeur Y.** 1976. Evaluation de l'amplitude du décrochement cévenol par le décalage des faciès récifaux portlandiens des environs de Ganges (Hérault). *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 282 (8 mars 1976).
- Bouchaala, A-E.** 1991. Hydrogéologie d'aquifères karstiques profonds et relations avec le thermalisme. Exemple de la partie occidentale du massif du Mouthoumet (Aude, France). *Thèse*, Université de Franche-Comté, 403 p.
- Brandt, C.,** 1997. Font Estramar, 11 ans de recherches en plongée dans un grand réseau noyé en bordure de la Méditerranée. Exploration et Spéléologie, *Symposium 4, Publication du 12^{ème} Congrès international de spéléologie*, La Chaux-de-Fonds, Suisse, pp. 71-74.

Buschkuehle, B.E., Hein, F.J., Grobe, M. 2007. An overview of the geology of the Upper Devonian Grosmont carbonate bitumen Deposit, Northern Alberta, Canada. *Natural Resources Research*, vol. 16, n°1, 3-15.

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille d'Uzès

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Le Vigan

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Lodève

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Montpellier

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Pézenas

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Pont Saint Esprit

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Saint Martin

Carte géologique de la France à 1/50 000^{ème} : feuille de Sète

Cavalera, T., Arfib, B., Gilli, E., 2006. Ressource karstique côtière en méditerranée : les sources sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Marseille France). *Proceedings 8ème colloque d'hydrogéologie en pays calcaire*. Neuchâtel (Suisse), 21-23 sept. 2006. 4 pages

Clauzon, G. 1982. Le canyon messinien du Rhône : une preuve du « dessicated deep-basin model » [Hsü, Cita et Ryan, 1973]. *Bull. Soc. Géol. France*, XXIV (3) : 597-610.

Debrand-Passard, S. et Courbouleix, S. 1984. Synthèse géologique du Sud-Est de la France. *Mem. BRGM Fr.*, n° 126.

Dörfliger, N. et Le Strat, P. 2001. Etude du pourtour est de l'étang de Thau (Hérault) - phase II- Définition du modèle géologique et inventaire des phénomènes karstiques, volume 1. Rapport BRGM/RP-50786-FR

Dörfliger, N., Fleury, P., Ladouche, B., 2008 : Inverse modelling approach to allogenic karst system characterisation. *Ground Water* (à paraître).

Dubois, P., Yapaudjian, L., Bodeur, Y. 1975. Excursion dans le Jurassique moyen et supérieur des Grands Causses et du Bas-Languedoc. *9^e Congr. Int. Sédiment. (Nice)*, exc. 21.

Fabre G. et Nicod J., 1982 : Modalités et rôle de la corrosion crypto-karstique dans les karsts méditerranéens et tropicaux. *Zeit.f.Geomorph.*, N°26.

Ford D., Salomon J.-N. et Williams P., 1996 : Les « forêts de pierre » ou Stone forest de Lunan (Yunnan, Chine). *Karstologia* n°28, 25-40.

Fournier, F. et Borgomano, J., 2007. Geological significance of seismic reflections and imaging of the reservoir architecture in the Malampaya gas field (Philippines), *AAPG Bulletin*, vol. 91, n°2, 235-258.

- Gaullier V., Brun J-P., Guerin G., Lecanu H.** 1993 : Raft tectonics : The effects of residual topography below a salt decollement. *Tectonophysics*; Vol. 228, n° 3-4, pp. 361-381.
- Gaullier V., Vendeville B.C.**, 2005 : Salt tectonics driven by sediment progradation: part II- radial spreading of sedimentary lobes prograding above salt. *AAPG Bulletin*, v.89, N°8, pp. 1081-1089.
- Giot D., Roure F., Elmi S., Lajat D. et Steinberg M.** 1991. Découverte d'accidents distensifs majeurs d'âge Jurassique sur la marge continentale du bassin du sud-est, Ardèche, France (Programme GPF). *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, Paris, 312, 747-754.
- Gottis M.** 1957. Contribution à la connaissance géologique du Bas-Languedoc. *Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier*
- Havron C., Baele J-M., Quinif Y.**, 2007: Pétrographie d'une altérite résiduelle de type « fantôme de roche », *Karstologia* n°49, 2007, 25-32.
- Haq B.U., Hardenbold J. and Vail P.R.**, 1987: Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science* 235 (1987), pp. 1156–1167
- Hunt D., Elvebakk G., Rafaelsen B., Pajchel J., Hogstad K., Robak H., Randen T.**, 2003: Paleokarst Recognition and 3D Distribution : New Insights From the Upper Paleozoic, Loppa High, Barents Sea, *EAGE 65th Conference & Exhibition – Stavanger*, Norway, 2-5 June 2003.
- Katzer F.**, 1909 : Karst und Karsthydrographie, Zur Kunde der Baklanhalbinsel, n° 8, *Sarajevo*.
- Kneppers A., Ruan F.P., Delhomme J-P.**, 2006 : Integrated technologies for a better understanding and management of karst aquifer systems, *Proceedings of the 8th conference on limestone hydrogeology 2006*, Neuchâtel, Switzerland, 157-160.
- Ladouche B., Dörfliger N., Izac J.L., Cubizolles J., Le Strat P., DU Couedic C., Aunay B., Thomson P.** 2004. Evaluation des ressources en eau des Corbières. Phase 1 : Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières Orientales. . Vol. 2 - Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du "synclinal du Bas-Agly" Rapport final, Rapport BRGM/RP-52919-FR.
- Lamouroux M.**, 1972 : Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallithique au Liban. *Coll. Mémoires ORSTOM, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer*, n° 56, 266p.
- Le Strat P., Duvail C.** 2008. Contribution à la connaissance du Tortono-messinien sur le pourtour du Golfe du Lion. Géodynamique et paléogéographie de l'aire méditerranéenne au Mio-Pliocène : interférence eustatisme-tectonique. *Villeurbanne 5 et 6 mai 2008*.
- Maërtens L.** (1994) : Structure et stratigraphie séquentielle du bassin Oligo-Miocène de l'Hérault (Marge passive du Golfe du Lion). *D.E.A. Univ. Montpellier II, 1994*.

Maërtens L. et Sérrane M. (1995) : Extensional tectonics of the Oligo-Miocene Hérault Basin (S France), Gulf of Lion margin. *Bull. Soc. géol. France*, 1995, t. 166, n°6, pp. 739-749

Mejías, M., Garcia-Orellana, J., Plata, J.L., Marina, M., Garcia-Solsona, E., Ballesteros, B., Masqué, P., López, J., Fernández-Arrojo, C. 2007. Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater. Case of study: the Jurassic aquifer of *El Maestrazgo* (Castellón, Spain). *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0845-0, 12 p.

Mocochain, L., Clauzon, G., Bigot, J-Y., 2006-a. Réponses de l'endokarst ardéchois aux variations eustatiques générées par la crise de salinité messinienne. *Bull. Soc. géol. Fr.*, t.177, n°1, pp 27-36.

Mocochain, L., Clauzon, G., Bigot, J-Y., Brunet, P., 2006-b. Geodynamic of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene : evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, 188-189, 219-233.

Olivet, J.L., Beuzart, P., Auzende, J.M., Bonnin, J. 1984. Cinématique de l'Atlantique Nord et Central. Publication CNEXO, 54.

Olivet, J.L., Mattauer, M., Beuzard, P. 1992. Une nouvelle cinématique de la plaque ibérique et des Pyrénées : avancée ou recul ? 14^{ème} Réunion des sciences de la Terre, Toulouse : 117.

Penck A-N., 1924: Das Unterirdische Karst. In *Recueil de travaux offerts à J. Cvijic ; Belgarde*.

Picknett R.G., Bray L.G., Stenner R.D. 1976: The chemistry of cave waters. In: T.D. Ford and C.H.D. Cullingford (eds). *The Science of Speleology*. Acad. Press, London, pp. 213-266.

Quinif Y., 1999 : Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le tryptique de la karstification. Etudes de géographie physique, Travaux 1999 – *Suppl. XXVIII, Cagap*, Univ. de Provence : 159-164.

Roques H. 1967: Chimie des carbonates et hydrogeology karstique. In *Mémoires et Documents du Centre de Recherches et Documents cartographiques et Géographiques*, CNRS, nouvelle série, 4 : 113-141.

Rubino J.L. (2002) in Besson D. et al. (2002) - Le néogène du bassin d'avant-pays rhodano-provençal. *Congrès strati 2002* excursion 5-6-7 juillet 2002.

Rubino J.L., 2005 - in Association des Sédimentologues français. Presqu'île de Giens, 7 - 10 octobre. *Excursion E8/E9*. Les systèmes oligo-miocènes carbonatés et clastiques de Basse-Provence.

Ryan, W.B.F. 1973. Geodynamic implications of the Messinian crisis of salinity. In: C.W.Dooher. (Ed.), *Messinian Events in the Mediterranean*, North-Holland, Amsterdam, pp. 26-38.

Sérane M., Combes P.J., Peybernès B., Fondécave-Wallez M.J., Camus H., Lesage J.L., 2008. Les paléokarsts du Crétacé terminal / Paléocène en Languedoc

correspondent-ils au modèle messino-pliocène méditerranéen ? *Séance spécialisée de la S.G.F. en l'honneur de G. Clauzon. 5 et 6 mai 2008.*

Serrano O. et Hanot F. (2005) : Le bassin Oligo-Miocène de l'Hérault : un exemple de rétrochariage des structures pyrénéennes. Implications hydrogéologiques. *Rapport Final. BRGM/RP – 53733-FR.* Janvier 2005.

Soudet, H-J., Sorriaux, P., Rolando, J-P. 1994. Liaison fracturation karstification. Le paléokarst de Rospo mare (Italie). *Elf Aquitaine production*, 257-289.

Vanara N., 2000 : Le Karst des Arbailles (Pyrénées occidentales, France). Contrôles tectonique, climatique, hydrogéologique et anthropique de la morphogénèse. *Karstologia Mémoire n°8*, 320p.

Vendeville B.C. 2005: Salt tectonics driven by sediment progradation : Part I – Mechanics and kinematics, *AAPG Bulletin*, V. 89, n°8, pp. 1071-1079.

Vergari A., 1998 : Nouveau regard sur la spéléogénèse : le « pseudo-endokarst » du Tournaisis (Hainaut, Belgique). *Karstologia*, 31 : 12-18.

Wang D., 2005: Karst-Related Water-Control Solutions from Micro-resistivity Images, Lower Ordovician Reservoirs, China, *SPWLA Spring 2005 Topical Conference*, Oral presentation.

White W.B., 1988 : Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. *Oxford University Press, New York, Oxford*, 464 p.



Annexe 1

Constitution d'une base de données géoréférencées sur le Languedoc Roussillon

Le SIG réalisé permet d'avoir une vision rapide de l'ensemble des données disponibles dans le cadre du projet. Les trois zones choisies pour l'étude sont identifiées avec du Sud vers le Nord, la zone de la moyenne vallée de l'Hérault, la zone Montpelliéraine et la zone gardoise (Illustration 85).

Ainsi les différentes lignes sismiques existant sur la région sont représentées ainsi que celles choisies dans le cadre du projet (Illustration 85). Le SIG permet de connaître le nom, l'année de réalisation, ainsi que la localisation physique de l'archive. Les forages profonds existants sont référencés et localisés. Il s'agit d'ouvrages réalisés par les pétroliers. Ils ont été répertoriés par le Brgm, puis géoréférencés. Leurs données sont harmonisées au sein de la BSS. Le log de ces forages est également accessible (Illustration 86).

Une série de coupes géologiques interprétatives régionales tirées de la bibliographie et réalisées par différents auteurs est également fournie à titre indicatif. Le positionnement de certaines de ces coupes est peu précis. Ceci est dû au fait que certaines sont des coupes avec projection, ne représentant donc pas la réalité du sous-sol. Aussi, les données issues du rapport Géotherma (1981-1982) ont été regroupées. Il s'agit, pour la zone Languedocienne, du toit du Lias calcaire (Illustration 87) et du toit de l'Aptien (Illustration 88) et pour la zone des Garrigues, le toit du Jurassique supérieur (Illustration 89) et le toit du Lias calcaire (Illustration 90).

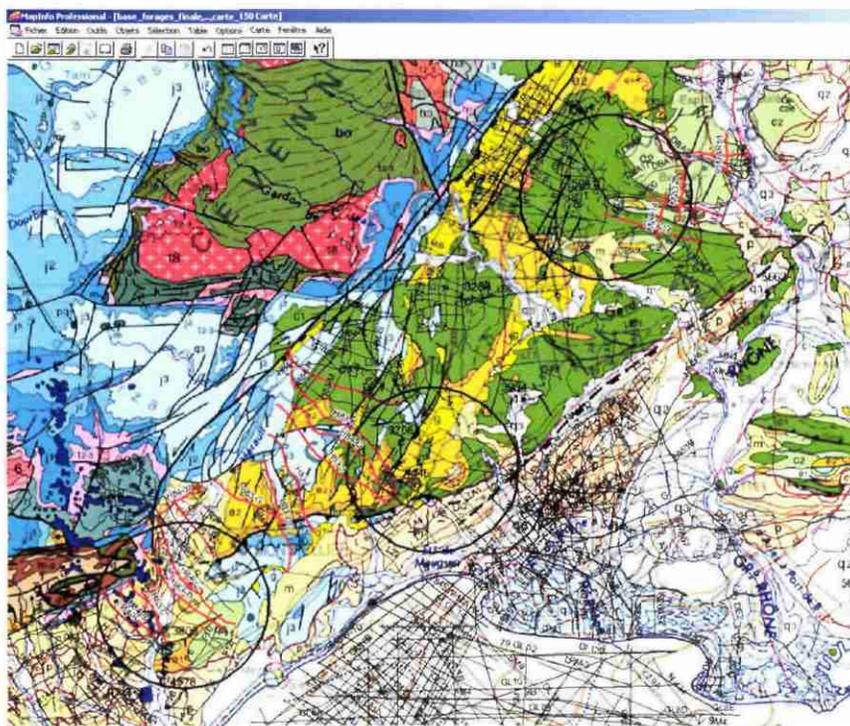


Illustration 85 : Localisation des trois zones d'études et des lignes sismiques, les lignes rouges représentent les profils sismiques choisis pour retraitement dans le cadre de ce projet.

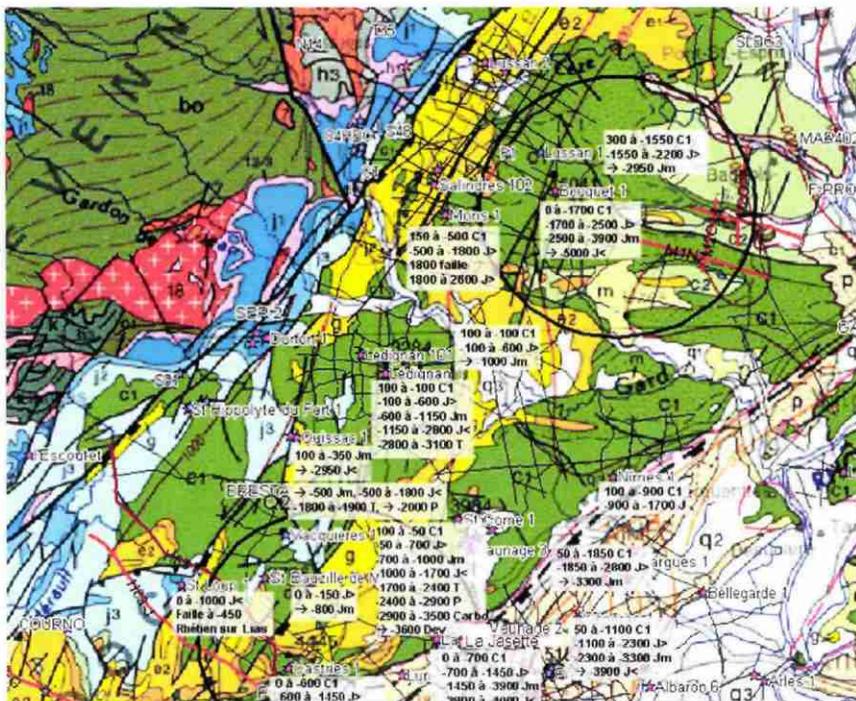


Illustration 86 : Exemple pour la zone Montpelliéraine et pour la zone gardoise des forages profonds utilisés et du log de ces forages.

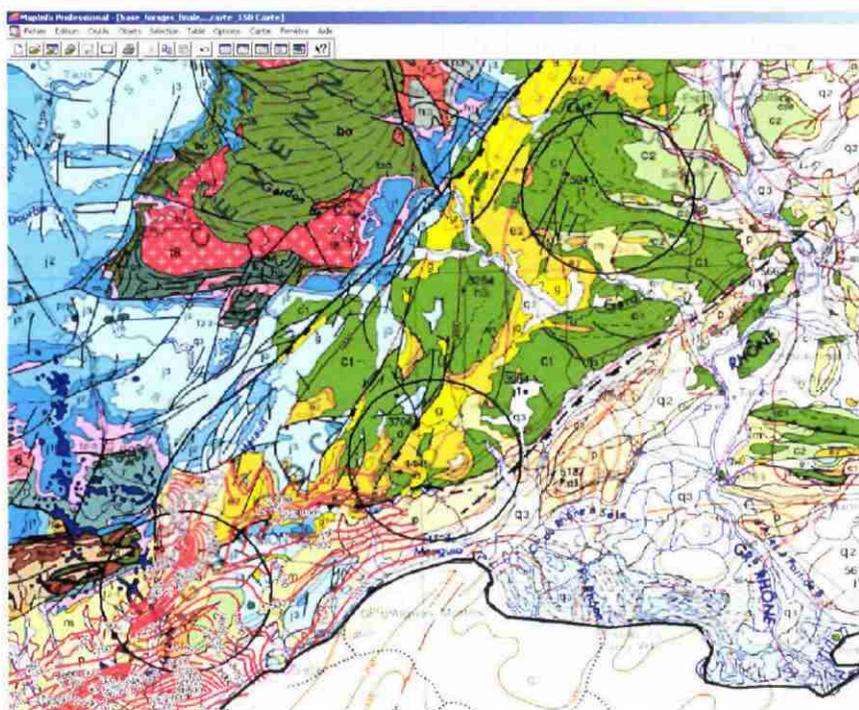


Illustration 87 : Profondeur du toit du Lias calcaire pour la zone Languedocienne (Rapport Géotherma, 1981-1982).

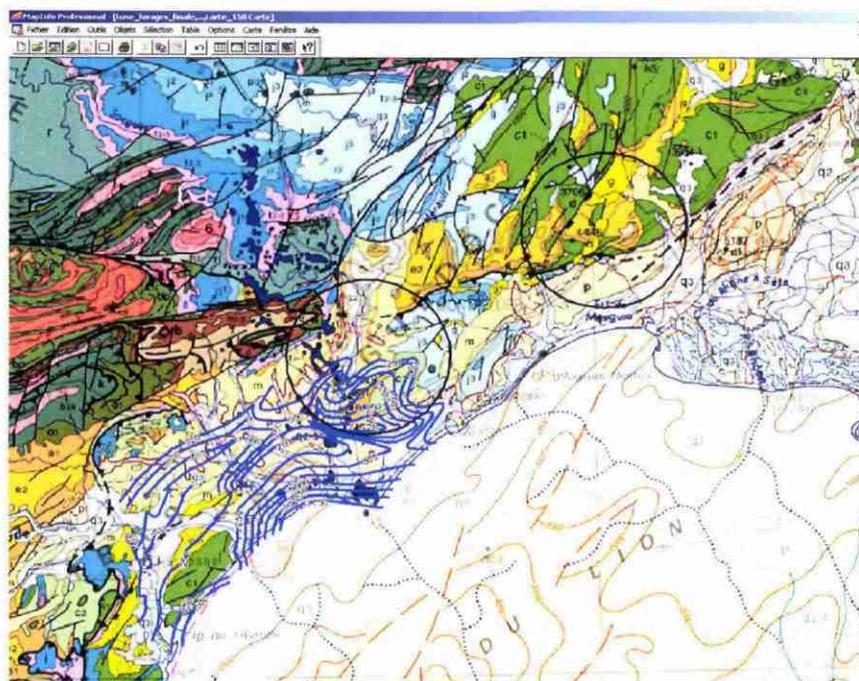


Illustration 88 : Profondeur du toit de l'Aptien pour la zone Languedocienne (Rapport Géotherma, 1981-1982).

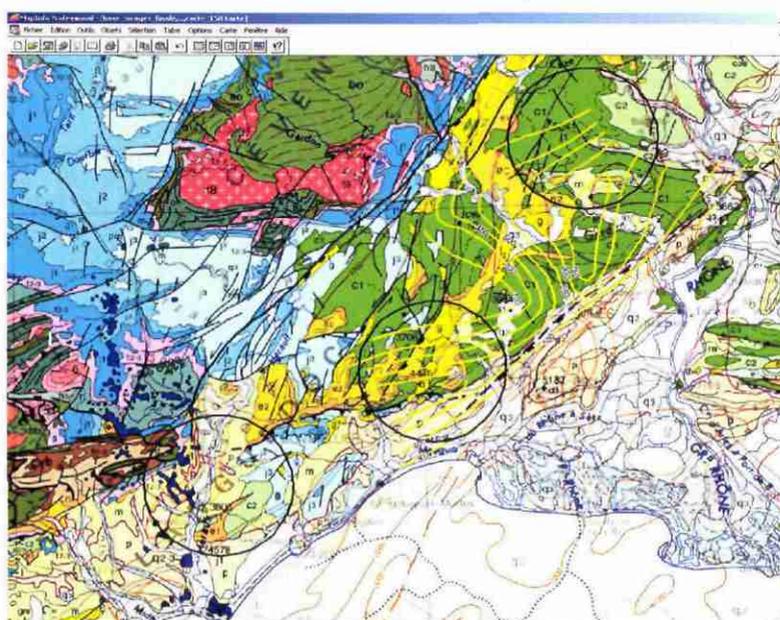


Illustration 89 : Profondeur du toit du Jurassique supérieur pour la zone des Garrigues (Rapport Géotherma, 1981-1982).

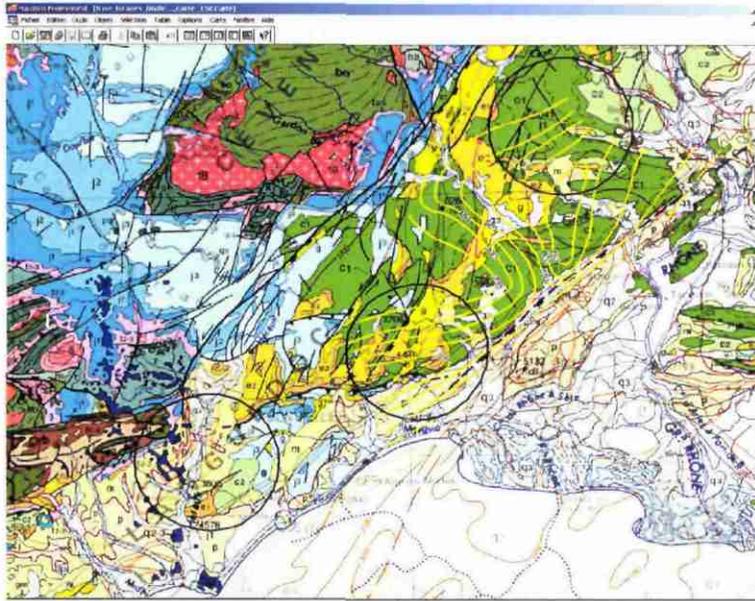
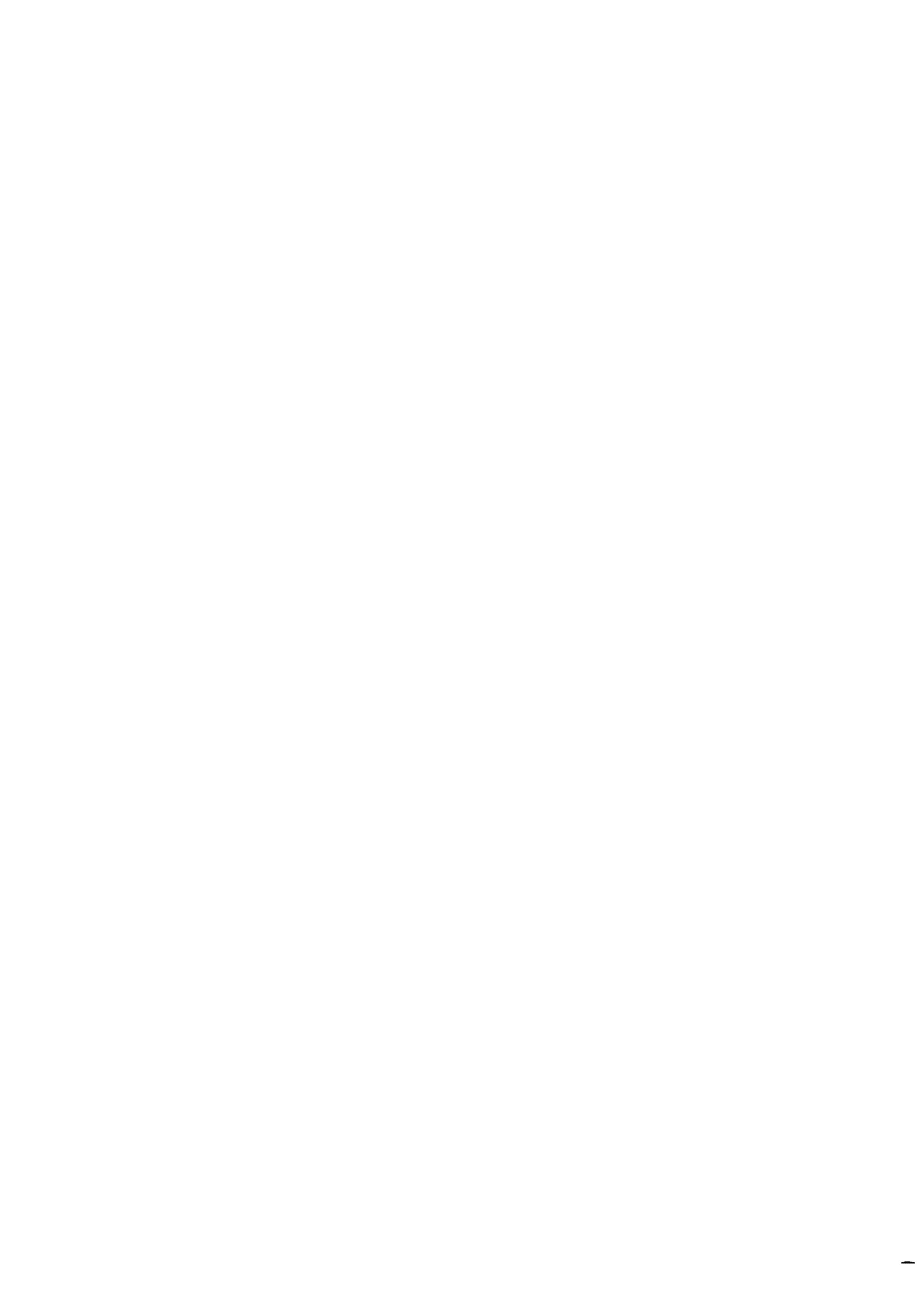


Illustration 90 : Profondeur du toit du Lias calcaire pour la zone des Garrigues (Rapport Géotherma, 1981-1982).

Annexe 2

Fiches des forages pétroliers



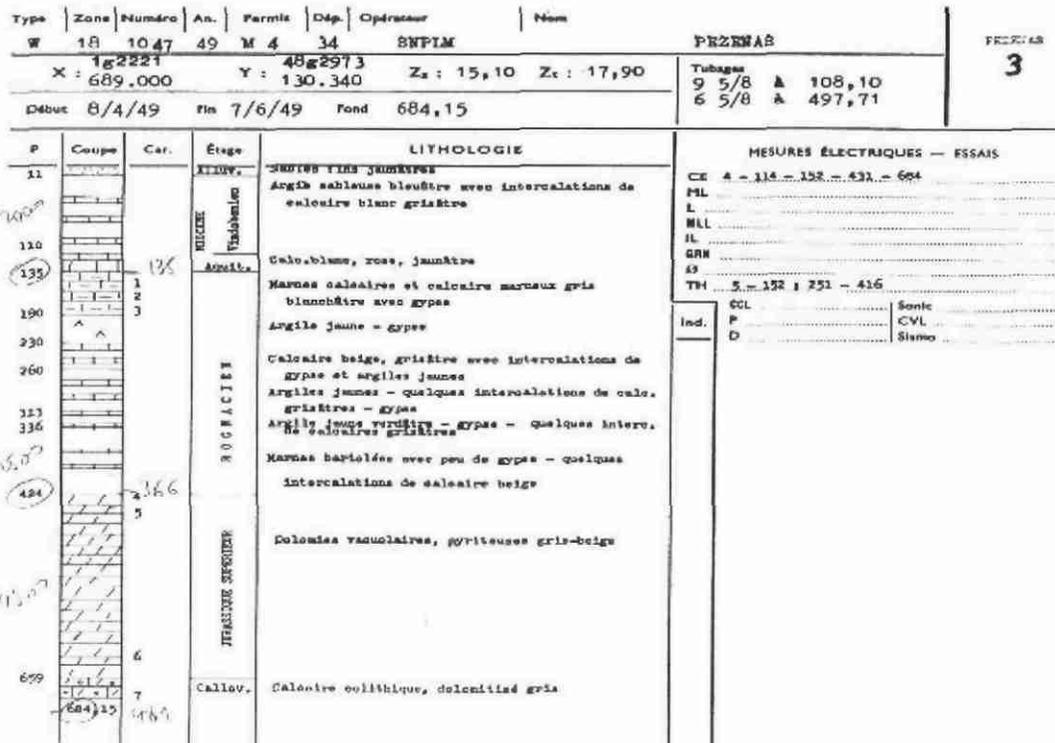


Figure 1 : Forage de Pézenas 3

S.N.P.L.M.

10:56 PEZENAS

Géologie

COUPE SONDAGE Péz. 2

ECHELLE 1/2000

Département: Hérault
Arrondissement: Béziers
Canton: Pézenas
Commune: Pézenas

COORDONNÉES
X - 696,013 06
Y - 123,979 23
Z - 203,3 (m)
23,23 (altitude)

Appareil: Worth 2
Commencement: le 15 oct. 48
Fin: le 17 février 1949

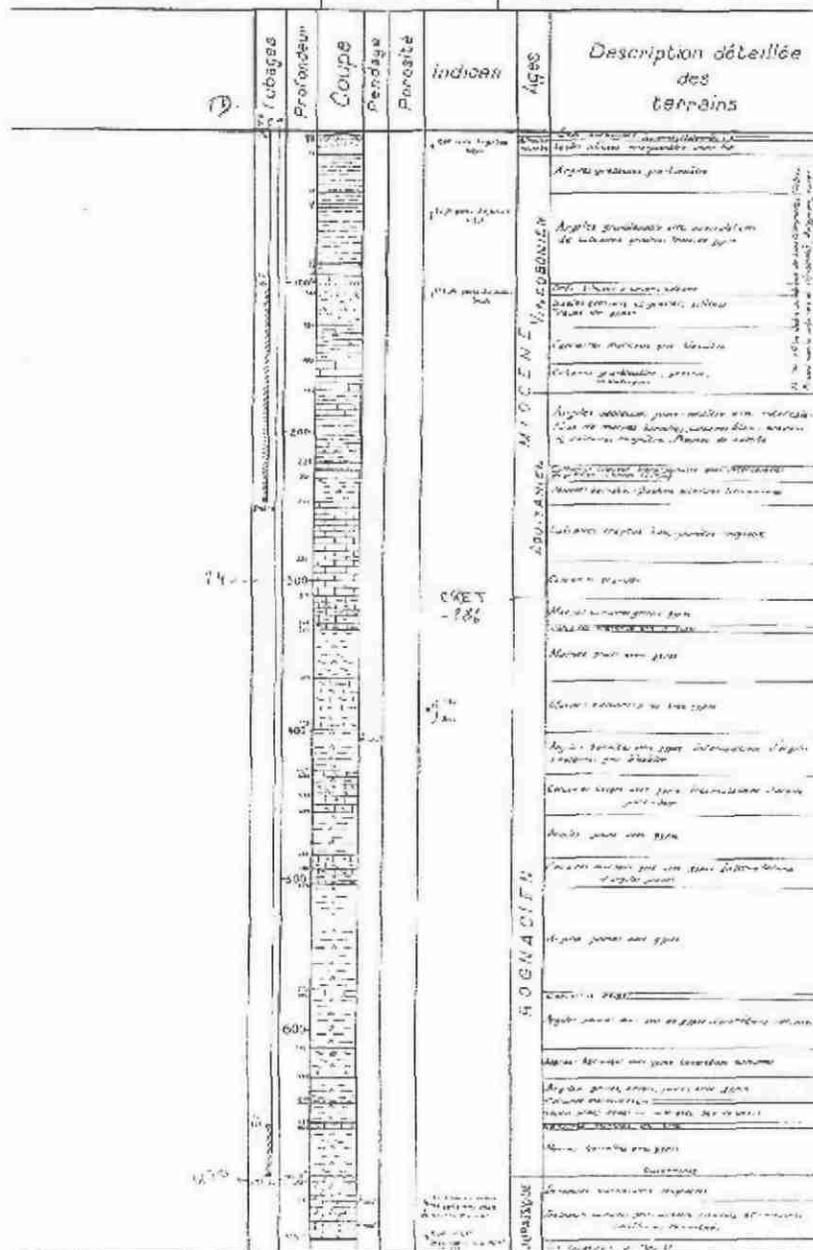


Figure 2 : Forage de Pézenas 2

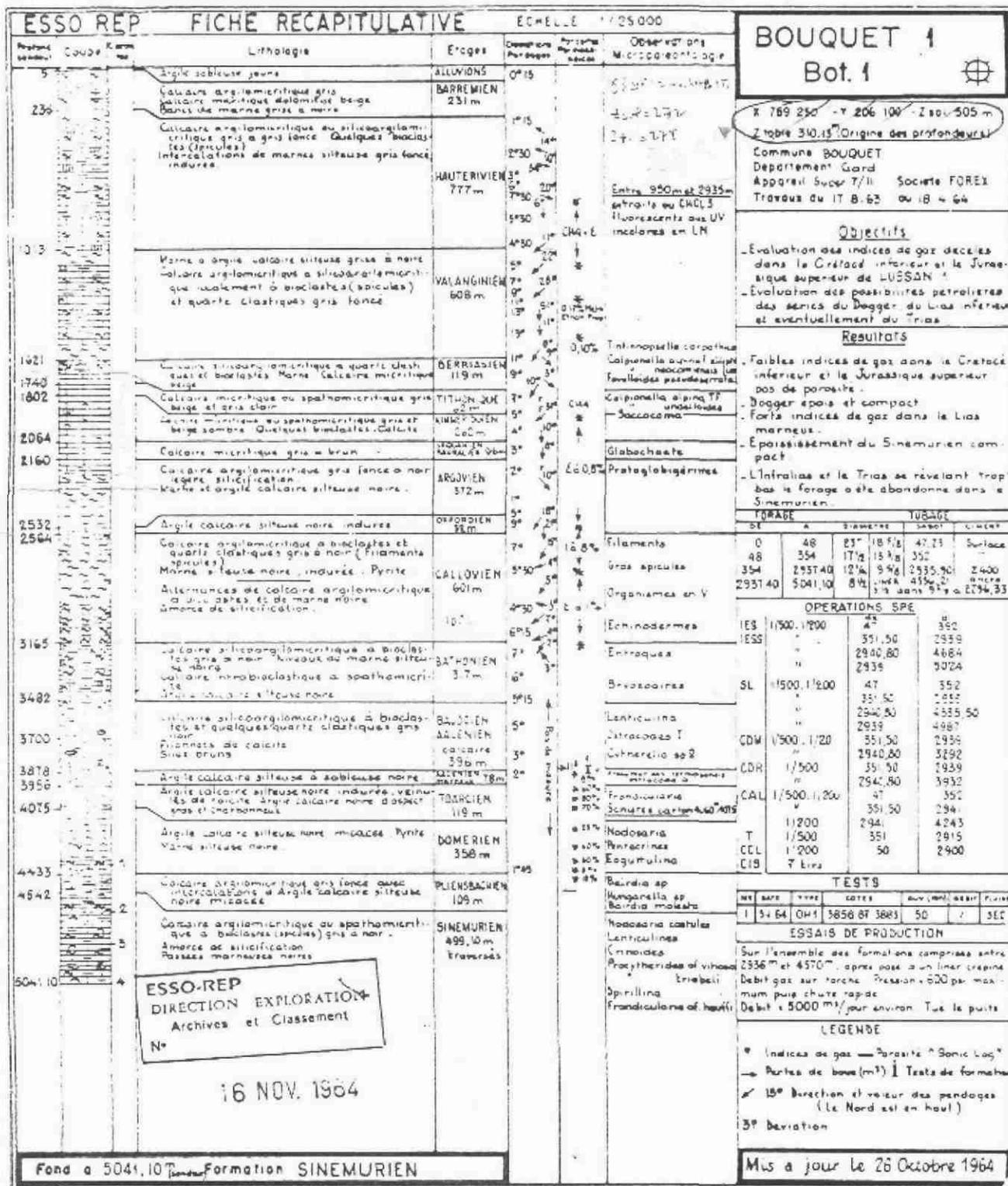


Figure 4 : Forage de Bouquet 1

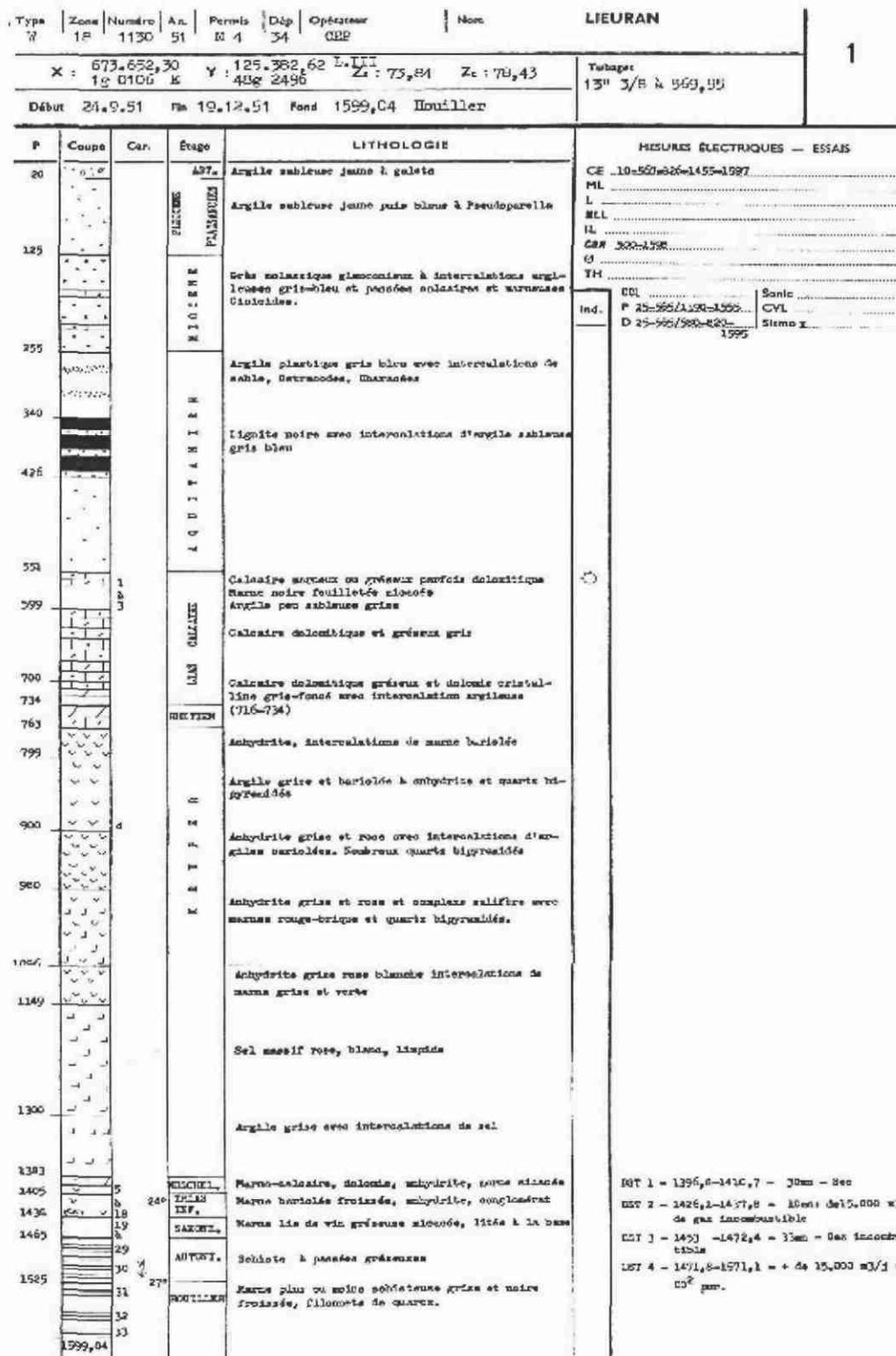


Figure 5 : Forage de Lieuran 1

Annexe 3

Profils sismiques vierges et interprétées





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service EAU, Unité RMD
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90