

Document public

Géodynamique des systèmes plio-quaternaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau

Rapport final

BRGM/RP-53088-FR
septembre 2004

80 37410-10-02



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Géodynamique des systèmes plio-quaternaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau

Rapport final

BRGM/RP-53088-FR
septembre 2004

Etude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 PSP04CDG50

S. Roure, C. Duvail, Aunay B., P. La Strat



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Plaine de la Crau, bassin en compression, nappes alluviales, épandage, cailloutis, stratigraphie séquentielle, stratigraphie génétique, modélisation.

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

Roure S., Duvail C., Aunay B., Le Strat P. (2004) – Géodynamique des Systèmes Plio-quaternaires des Nappes Alluviales de la Plaine de la Crau. BRGM/RP-53088-FR, 69 p., 29 ill.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude entre dans le programme du BRGM : référentiel géologique de la France.

Les objectifs de cette étude sont :

- de réaliser une modélisation lithostratigraphique et séquentielle des dépôts alluviaux plio-quaternaires de la plaine de la Crau ;
- d'essayer de déterminer et de hiérarchiser les processus et les paramètres à l'origine de l'architecture du bassin (subsidence, tectonique, production sédimentaire, climat).

A partir des données disponibles (bibliographie, cartes géologiques, données de forages réunies à partir des BSS (Banque de données du sous-sol) des Services Géologiques Régionaux du Languedoc Roussillon et de Provence Alpes Côtes d'Azur, plusieurs travaux ont pu être réalisés :

- la réactualisation de cartes d'isohypses et d'isopaques des formations conglomératiques de la plaine de la Crau et du delta du Rhône ;
- la construction d'un modèle sédimentologique en terme de stratigraphie séquentielle à partir de deux puits diagradiés et de données lithologiques de plus de 650 puits.

Au sein du modèle sédimentologique, chaque puits a été analysé selon la méthode suivante :

- création d'une courbe granulométrique à partir des descriptions lithologiques dressées par les foreurs au moment du forage ;
- numérisation de ces courbes ;
- interprétation de cette courbe en terme de variation d'énergie de dépôt ;
- identification des surfaces remarquables selon les principes de la stratigraphie séquentielle ;
- corrélation des surfaces remarquables entre les puits distants de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres au sein de profils.

Le modèle géométrique mis en place sur les profils a ensuite été interpolé à l'ensemble du bassin de la plaine de la Crau.

Sommaire

1. INTRODUCTION	9
2. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE ET DE LA PROBLÉMATIQUE ASSOCIÉE.	11
2.1. Présentation de l'étude.....	11
2.1.1. Les objectifs	11
2.1.2. Les données disponibles.....	11
2.1.3. La méthodologie adoptée.....	11
2.2. Présentation géographique de la Plaine de la Crau	13
2.3. Synthèse des grands domaines géologiques de la plaine de la Crau	16
2.3.1. Historique des grands ensembles de la Crau	19
2.3.2. Réalisation d'une carte des différents domaines géologiques	22
2.3.3. Description des grands ensembles géologiques.....	25
2.3.4. La tectonique et la subsidence de la Plaine de la Crau : état des connaissances	35
3. APPROCHE DE SUB-SURFACE : LA GÉOMÉTRIE DES SYSTÈMES PLIO-QUATERNAIRES DE LA PLAINE DE CRAU.....	39
3.1. Les données lithologiques	39
3.1.2. Les données diagraphiés	41
3.1.3. Isohypses et isopaques des formations caillouteuses de la plaine de la Crau	43
3.1.4. Les grands transects	45
4. INTERPRÉTATION DU MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DE LA PLAINE DE LA CRAU.....	49
4.1. Modèle sédimentologique	49
4.1.1. La notion d'espace disponible	49
4.1.2. La corrélation des grands domaines remarquables	49
4.2. Application au modèle de la Crau	51
5. PROSPECTIVES D'EXTRAPOLATION AU DELTA DU RHÔNE.....	59
6. CONCLUSION.....	61

BIBLIOGRAPHIE.....63

Liste des illustrations

Illustration 1: Localisation sur photo satellite de la Plaine de la Crau.	14
Illustration 2 : Situation géographique de la plaine de la Crau (Carte IGN de Marseille au 1/200 000).....	15
Illustration 3: Contexte géologique de la plaine de la Crau (Carte BRGM de Marseille au 1/250 000).....	17
Illustration 4 : Légende de la carte géologique (Carte BRGM au 1/250 000 de Marseille).....	18
Illustration 5 : Echelle chronostratigraphique des épanchements des nappes alluviales de la Plaine de la Crau.	21
Illustration 6 : Carte synthétique des différentes unités de la Crau.....	23
Illustration 7 : Carte synthétique drapée sur MNT (exagération verticale x10).....	24
Illustration 8 : Photo des marnes lacustres de la Vieille Crau.....	27
Illustration 9 : Incision des argiles lacustres par la nappe supérieure de la Vieille Crau.	28
Illustration 10 : Conglomérats de la Vieille Crau reposant sur des argiles de plaine d'inondation.....	29
Illustration 11 : Empilement conglomératique aggradant de la Crau du Luquier.	31
Illustration 12 : Géotropisme sédimentaire sur la partie inférieure des éléments.	32
Illustration 13 : Dynamique d'empilement de la Crau de Miramas.....	34
Illustration 14 : Contexte structural de la Provence Occidentale et du bassin de la Crau.	36
Illustration 15 : Bloc diagramme structural de la Crau.	37
Illustration 16 : Carte de répartition des forages disponible en BSS présentant des données géologiques.	39
Illustration 17 : Interprétation de données lithologiques en terme de variation granulométrique.....	40
Illustration 18 : Courbes diagaphiques du forage 09923X0002.....	42
Illustration 19 : Carte des isopaques des formations plio-pléistocènes de la Crau.	44
Illustration 20 : Carte des isohypses des formations plio-pléistocènes de la Crau et du delta du Rhône.	45
Illustration 21 : Carte de positionnement des grands transects.	47
Illustration 22 : Limites des séquences de dépôts : réponse stratigraphique aux variations des énergies de dépôt.....	51
Illustration 23 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal aval.....	53
Illustration 24 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal intermédiaire.	54
Illustration 25 Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal amont.	55

Illustration 26 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect longitudinal du dépôt centre de la Vieille Crau.....	56
Illustration 27 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect longitudinal de la Crau de Miramas.	57
Illustration 28 : Isobathes du toit du substratum des nappes alluviales de la plaine de la Crau .	68
Illustration 29 : Isopaques de la nappe alluviale de la Vieille Crau	69

1. Introduction

Le mémoire présenté est le résultat du travail effectué au cours d'un stage de DEA (DEA Méthodes Quantitatives et Modélisations des Bassins Sédimentaires, Universités Paris VI et VII, Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Muséum d'Histoire Naturelle de Paris). Ce travail a été réalisé au sein du Service Géologique Régional du Languedoc-Roussillon du BRGM de Janvier à Juillet 2004.

Il intervient en amont d'un projet de recherche : Approche et modèles intégrés pour évaluer l'impact de scénarios contrastés de gestion de l'eau dans la plaine de la Crau à l'horizon 2015,

Interviendront dans ce projet les organismes suivant :



Ce projet devrait être lancé prochainement.

Le stage a consisté à étudier les formations des « cailloutis de la Crau » en terme de géométrie, d'architecture et de mécanismes.

Ce stage a pour objectif la réalisation de la modélisation géologique des nappes alluviales du bassin de la Crau à partir des données de la BSS (Banque du Sous-Sol) du BRGM, des observations de terrain et de la bibliographie.

Ce rapport se décompose en quatre parties :

- la première a pour but de présenter le cadre de l'étude (objectifs, présentation géographique et géologique) ;
- la seconde présente les travaux antérieurs, réalisés par différents auteurs, sur les dépôts fluviaux de la plaine de la Crau ;
- une troisième partie montre la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude et les résultats obtenus ;
- une dernière partie est consacrée à une discussion et à un élargissement du sujet en terme de perspectives.

2. Présentation du secteur d'étude et de la problématique associée.

Cette première partie présente l'étude réalisée. Elle est constituée par la description des objectifs et de la méthodologie adoptée.

Elle se compose aussi d'une présentation géographique et géologique du secteur étudié.

2.1. PRESENTATION DE L'ETUDE

2.1.1. Les objectifs

Cette étude doit aboutir à deux objectifs principaux :

- le développement d'un modèle sédimentologique des nappes alluviales plio-quaternaires de la plaine de la Crau ;
- l'extrapolation du modèle sédimentologique de la Crau à l'ensemble du delta du Rhône en terme de subsidence, de déformation et de production sédimentaire pendant le Villafranchien et le Quaternaire.

Cette démarche s'inscrit dans un objectif plus général à caractère hydrogéologique qui consiste à construire des scénarios contrastés d'évolution plausible du système hydrogéologique de la Crau.

2.1.2. Les données disponibles

Pour parvenir à ces objectifs, un certain nombre de données est disponible :

- les données tirées de la bibliographie ;
- les cartes géologiques, éditées par le BRGM, à l'échelle 1/50 000 et 1/250 000 qui couvrent la zone de la plaine de la Crau et de la zone d'apport du matériel fluviatile, ainsi que celles couvrant le delta du Rhône ;
- les données de subsurface et les données géophysiques réunies à partir des banques de données du Sous-Sol des services Géologiques Régionaux du Languedoc Roussillon (Montpellier) et de Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Marseille).

2.1.3. La méthodologie adoptée

L'étude des géométries des formations fluviatiles de la Crau doit comprendre une approche à la fois de surface et de subsurface.

Pour satisfaire à ces deux conditions, la méthodologie adoptée comprend les étapes suivantes :

- la réalisation d'une carte géologique synthétique réactualisée des nappes de la Crau à partir des données cartographiques préexistantes et d'observations de terrain ;
- la réalisation de cartes isohypses et isopaques des formations des systèmes fluviaux quaternaires de la Crau ;
- la construction d'un modèle sédimentologique, diagénétique et séquentiel à partir de l'étude de grands transects de maille hectométrique à kilométrique.

L'approche en subsurface comprend l'analyse en stratigraphie génétique de forages maillés qui se disposent suivant de grands transects transverses aux structures de la plaine de la Crau. Ces forages sont étudiés tout d'abord d'un point de vue sédimentologique (granulométrie, discontinuités, mise en place des rampes granulométriques) et ensuite diagénétique.

L'analyse en stratigraphie génétique repose sur les concepts définis par HOMEWOOD et al (1992), ESCHARD et al. (1991), ESCHARD (1989).

Le principe de base de l'étude des nappes alluviales de la Crau repose aussi sur l'étude plus complète de tous les dépôts des formations quaternaires autour du Golfe du Lion (DUVAIL (2002), RAFFY (2002), RABINEAU (2001), CALVET (1996), AMBERT (1994)).

Le principe de base de dépôt des formations conglomératiques des systèmes quaternaires réside dans le fait que la préservation des profils sédimentaires conglomératiques se réalise en fin de « by pass » soit en fin de chute ou en début de remontée du niveau de base relatif.

En effet ce n'est que pendant cette période de relative stabilité qu'il est possible de préserver les dépôts conglomératiques, la période précédente de chute du niveau de base étant réservée aux transferts au bassin (pas de dépôts continentaux) et la période suivante de remontée étant réservée aux dépôts de débordements sur les plaines alluviales.

Les conditions de travail dans la plaine de la Crau doivent tenir compte de la présence dans la plaine de la Crau d'un empilement local de 50 mètres de conglomérats plio-quaternaires. Cette épaisseur atteint sous la plaine holocène de la Camargue plus de 80 mètres.

L'existence de très nombreux galets poinçonnés ainsi que de niveaux lacustres basculés dans la plaine de la Crau elle-même sont aussi des contraintes de travail très importantes dans la réalisation du modèle sédimentologique.

Un troisième argument fort repose sur le fait que les observations de terrain ne montrent que de très rares incisions fluviales de faible importance il n'est fait mention d'aucune incision majeure au sein des différents ensembles de la Crau les travaux antérieurs.

Les concepts fondamentaux de l'étude des nappes alluviales du bassin de la Crau résident donc dans les observations de base suivantes :

- une préservation exceptionnelle essentiellement en période de chute du niveau de base, significative d'une subsidence omniprésente supérieure à la baisse du niveau de base du fait de l'inexistence de surfaces d'érosions fluviales ;
- une préservation en contexte compressif du fait de l'ubiquité de galets poinçonnés voire fracturés au sein de toutes les nappes alluviales de la plaine de la Crau ainsi que du basculement des niveaux lacustres intercalés.

Ces deux critères accompagnés par les arguments cartographiques sont omniprésents dans l'analyse des observations et des corrélations proposées dans ce travail.

2.2. PRESENTATION GEOGRAPHIQUE DE LA PLAINE DE LA CRAU

Située dans le Sud-Est de la France, dans le département des bouches du Rhône (13), la plaine de la Crau se présente sous la forme d'un triangle équilatéral de 520 km² délimité par les Alpilles, le massif de l'Anellier et les marais des Baux de Provence (ou Combe de Mouriers) au Nord, par les collines de Miramas et d'Istres à l'Est, par les marais de la rive gauche du grand Rhône à l'Ouest.

Les trois sommets du triangle pouvant être assimilés aux villes d'Arles à l'Ouest, de Lamanon à l'Est et Fos sur Mer au Sud (illustration 1 et illustration 2).

Le terme Crau proviendrait du Celtique « *craigh* » qui signifie amas de pierres, dans l'antiquité la Crau était connue des géographes sous le nom de « *Campus lapideus* », champ de pierre.

Cette étendue caillouteuse et infertile ne dispose actuellement d'aucun cours d'eau naturel, elle a cependant été mise en culture depuis le milieu du XVI^e siècle grâce à la réalisation de canaux d'irrigation par Adam de Craponne, les canaux les plus récents remontent à l'aménagement de la basse Durance (1950-1960), ces réalisations ne permettent actuellement d'irriguer que la partie amont de la plaine destinée aux cultures maraîchères, à l'arboriculture, et au célèbre « foin de la Crau », la partie aval infertile garde son aspect de steppe originel et est destinée à l'élevage du mouton.

Sur la bordure Sud-Ouest et dans la partie centrale, des dépressions marécageuses (Marais de Meyrannes, des Chanoines, de St Martin, fossé Meyrol) ou lacustre (La dynamiterie, Les Aulnes, Entressen, Le Luquier) ont reçu l'appellation de « Clar »

Le sous-sol sablo-graveleux de la Crau est exploité par de nombreuses gravières et ballastières, des industries lourdes (raffineries, stockage de carburant, industries chimiques et métallurgiques) occupent les bords de mer et les bordures de l'étang de Berre, elle accueille aussi l'aéroport d'Istres le Tubé.

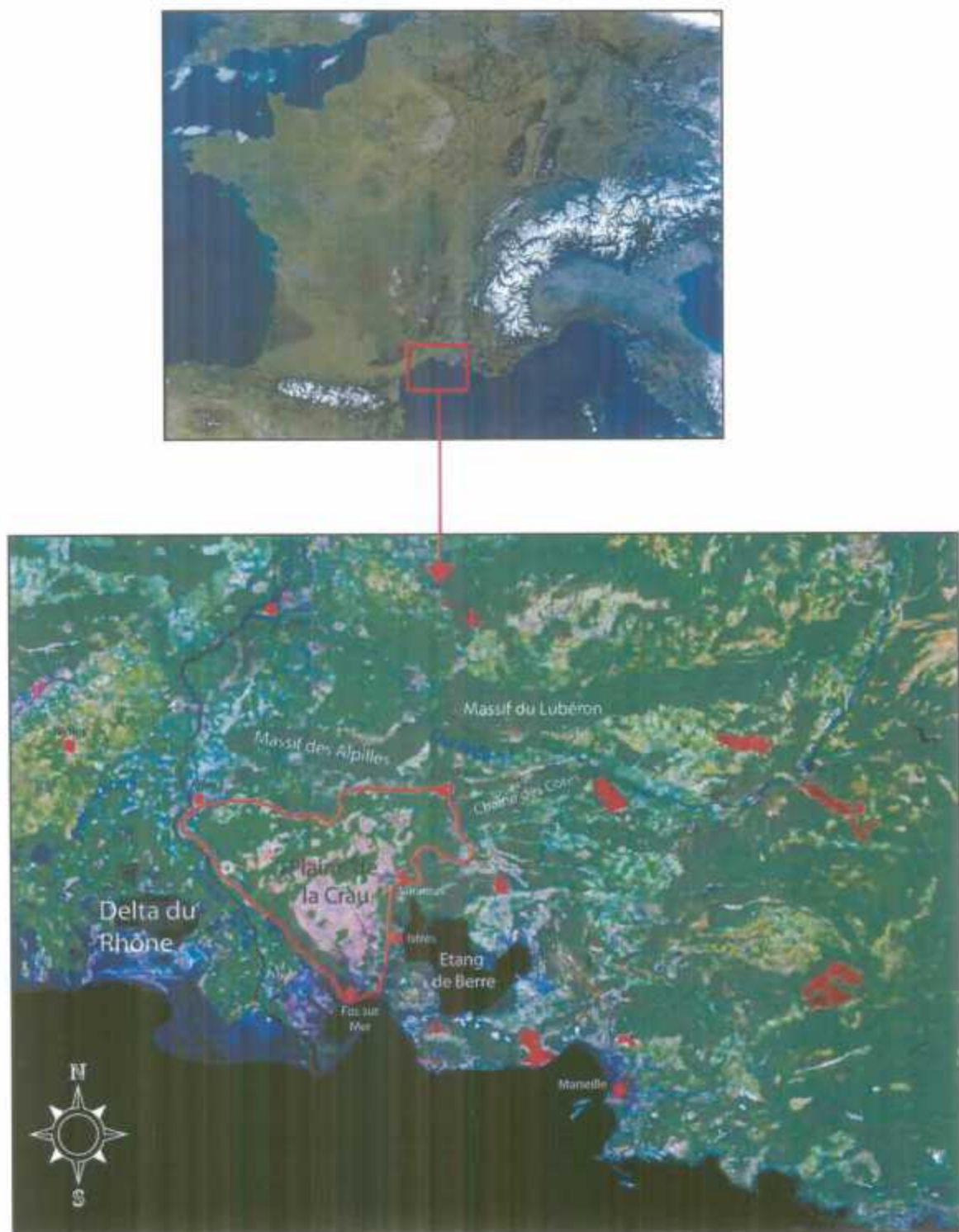


Illustration 1: Localisation sur photo satellite de la Plaine de la Crau.

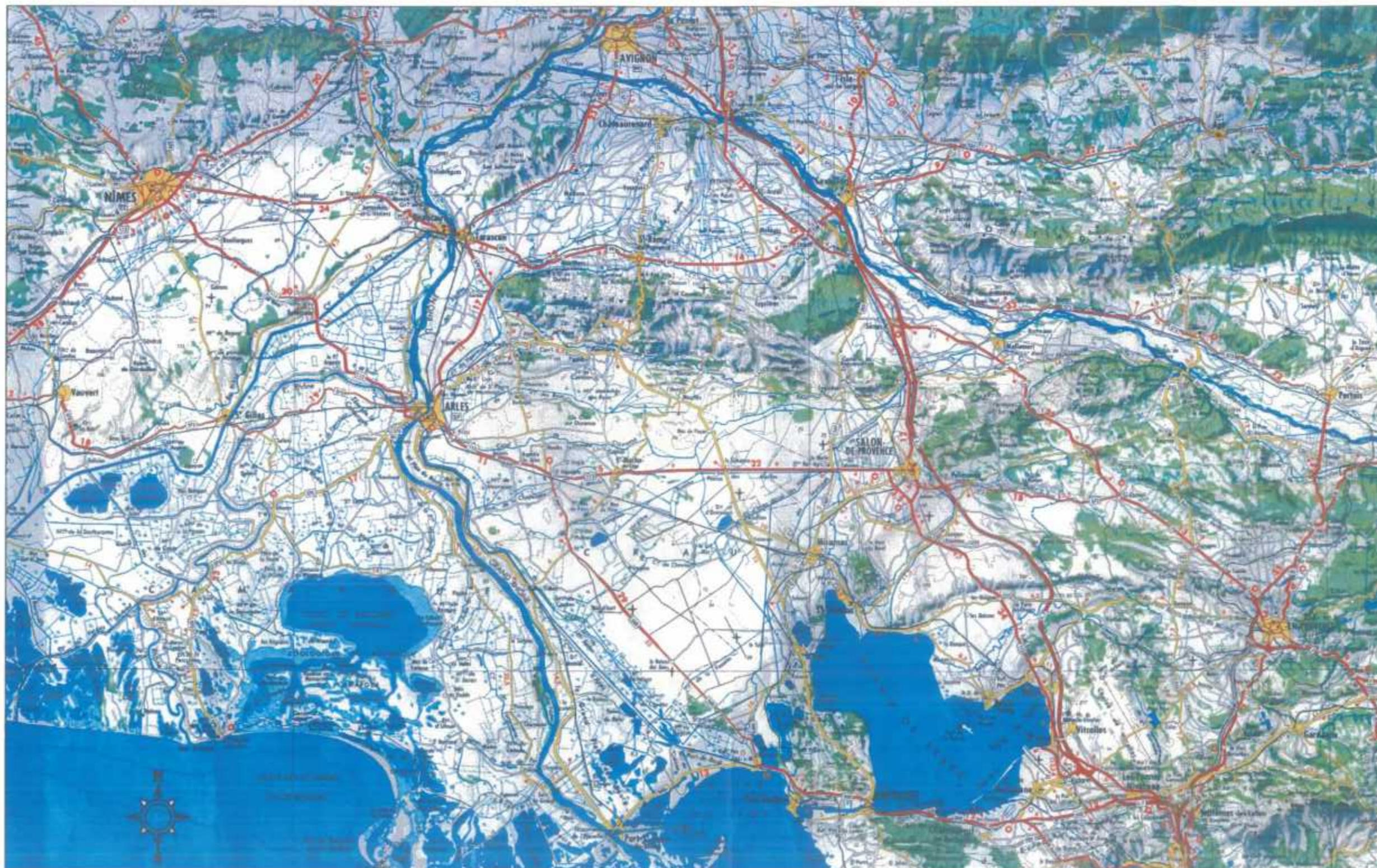


Illustration 2 : Situation géographique de la plaine de la Crau (Carte IGN de Marseille au 1/200 000).

2.3. SYNTHÈSE DES GRANDS DOMAINES GÉOLOGIQUES DE LA PLAINE DE LA CRAU

Située au sud des calcaires d'âge jurassique et crétacé de l'Anellier et de la dépression Holocène de la combe de Mourès, la Crau est limitée à l'Est par les entablements miocènes de Salon de Provence et de Miramas et est recouverte à l'Ouest par les sédiments d'âge holocène du Grand Rhône (illustration 3).

Elle est constituée par un matériel appelé couramment cailloutis (dépôt fluviatile de granulométrie variable). Ces cailloutis sont des dépôts de galets et de graviers avec localement des passées argileuses, ils se sont déposés par des apports successifs du Villafranchien au Pléistocène supérieur (COLOMB et ROUX, 1986).

Les cailloutis reposent sur un substratum représenté au Nord par des argiles et des marnes bleues sableuses pliocènes ainsi que par des calcaires d'âge jurassique et crétacé, représenté à l'Est par des niveaux de calcarénite de l'Helvétien (Miocène) et représenté au Sud par des argiles calcaires ainsi que par des sables gréseux du Burdigalien (Miocène).

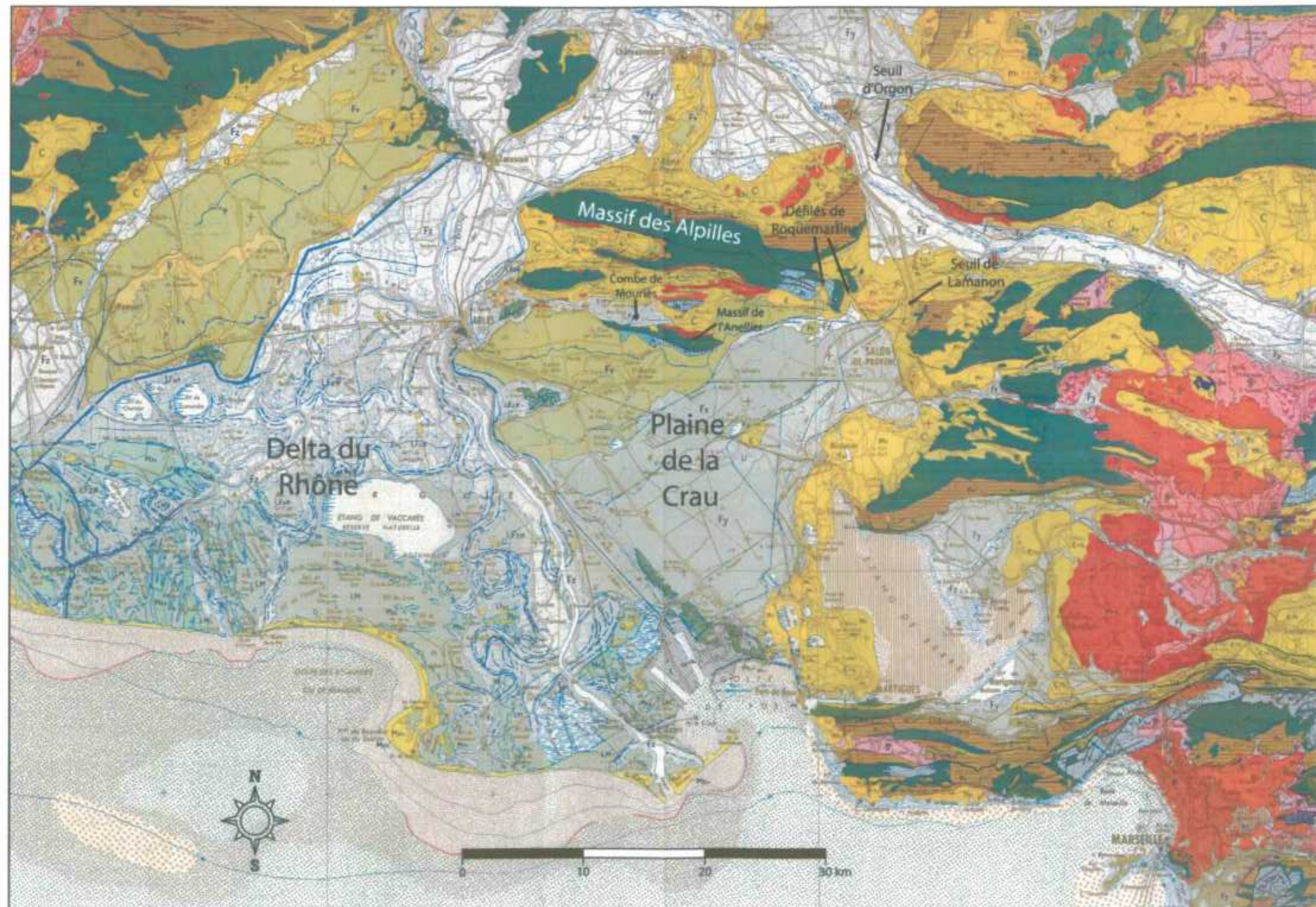


Illustration 3: Contexte géologique de la plaine de la Crau (Carte BRGM de Marseille au 1/250 000).



Illustration 4 : Légende de la carte géologique (Carte BRGM au 1/250 000 de Marseille).

2.3.1. Historique des grands ensembles de la Crau

Dès le XVI^e siècle le géographe Soléry attribue l'origine de la plaine de la Crau à un ancien cours de la Durance débouchant par Lamanon, suivi dans ses observations par l'historien Papon et le naturaliste Robert de Lamanon au XVIII^e siècle (d'après COQUAND, 1869).

Guettard (XVIII^e) au contraire leur attribua une origine Rhodanienne (Bras oriental du Rhône débouchant à Lamanon), H de Saussure au XIX^e siècle a fait appel à une origine marine pour expliquer l'origine des cailloutis de Crau.

Ce matériel a été décrit comme étant des poudingues pour la première fois dans une étude géologique de COQUAND (1869).

COLLOT (1904) est un des premiers à diviser les cailloutis de Crau en plusieurs ensembles, il décrit deux ensembles lithologiques différents :

- au Nord-Ouest la Vieille Crau qui s'étend depuis le débouché du défilé de Roquemartine jusqu'au Grand Rhône ;
- au Sud-Est la Jeune Crau qui prend naissance au col de Lamanon et se développe au Sud-Est de la Vieille Crau jusqu'à Fos/mer

J. REPELIN en 1930 attribuera les dépôts de la Vieille Crau à un bras du Rhône oriental passant par le défilé de Roquemartine, alors que les dépôts de la Jeune Crau sont attribués à un alluvionnement plus récent de la Durance par la cluse de Lamanon.

FONTANNES (1884), DENIZOT (1939), BALLELIO (1972), CLAUZON (1979) attribuent les apports de la Vieille Crau à la Durance qui s'épanchait alors par la cluse de Roquemartine.

La Vieille Crau est estimée d'âge Villafranchien par FONTANNES (1884), COLLOT (1904) et DENIZOT (1933), cette datation sera affinée par DENIZOT (1953), DEMARCO (1961) et BALLELIO (1972) qui l'attribue au Villafranchien inférieur cette datation a été déterminée grâce à des observations de terrain : ce niveau apparaît en continuité stratigraphique avec le pliocène marin.

L'âge de la Jeune Crau ne fait pas l'unanimité elle est tantôt datée du Riss (TRICART (1952), BOURDIER (1962), tantôt datée du Würm (BAULIG (1927), DENIZOT (1939), GOUVERNAT (1959), BONNIFAY (1962)), cette datation repose sur la présence de paléofaune à la base de la série et sur des données archéologiques.

COLOMB et ROUX (1978) subdivisent la Vieille Crau en deux sous-ensembles :

- la Crau d'Arles ou d'Eyguières ;
- la Crau de St Pierre de Vence qui est une formation altérée de la Crau d'Arles.

La Jeune Crau elle aussi est divisée en deux ensembles d'âge différent par E. COLOMB et R.M. ROUX (1978) :

- la Crau de Miramas ;
- la Crau du Luquier.

COLOMB et ROUX (1978) mettent aussi en évidence un certain nombre de terrasses alluviales de dimension modeste (quelques km² au maximum) grâce à leurs caractères

morphologiques, pétrographiques, minéralogiques et paléontologiques : Terrasse des Glauges, d'Entressen, de Brays.

Ils attribuent l'épanchement de la Crau de Miramas superposé à un gisement fossilifère à la phase interglaciaire Riss-Würm et au début du Würm (Würm I).

La fin de l'épanchement des cailloutis Duranciens au sein de la Crau (Crau de Miramas) est déterminée par datation relative : BONNIFAY (1957) affirme que la limite d'âge supérieure serait synchrone à la phase majeure de pédogenèse rubéfiante qui en basse Provence ne peut-être postérieure au Würm II. De plus GOUVERNET (1969) observait une absence de dépôts duranciens antérieurs à la fin du Würm en aval du seuil d'Orgon.

Les épanchements alluviaux qui ont formé la plaine de la Crau se sont donc déroulés depuis le Villafranchien inférieur jusqu'au début du Würm soit entre -2,5 Ma et -50 000 ans environ (COLOMB et ROUX, 1986) (Echelle chronostratigraphique : illustration 5) ; l'origine du matériel Cravenne est majoritairement admise comme Durancienne.

2.3.2. Réalisation d'une carte des différents domaines géologiques

L'approche cartographique et géologique a consisté, à partir des cartes géologiques au 1/250 000 de Marseille (illustration 4), au 1/50 000 d'Arles, d'Eyguières, de Salon de Provence et d'Istres, des données bibliographiques, ainsi qu'à partir des observations de terrain, à construire une carte géologique synthétique des différentes grandes unités géologiques.

La carte obtenue (illustration 6) met en évidence des successions de dépôts fluviaux de nappes qui se sont constitués au cours de plusieurs phases d'apport de la paléo-Durance, les dépressions qui ont accueilli ces dépôts se sont comblées progressivement ce qui a entraîné l'avulsion du système du Nord vers le Sud. Cette carte a ensuite été drapée sur le modèle numérique de terrain (MNT) afin de mieux percevoir les géométries de ces différentes unités de dépôt (illustration 7).

Cette carte met en évidence les trois systèmes de dépôt (Villafranchien à Würm) qui ont avulsé au cours de l'évolution de la Crau ainsi que les différents points d'entrées empruntés par le matériel caillouteux pour déboucher dans la Crau :

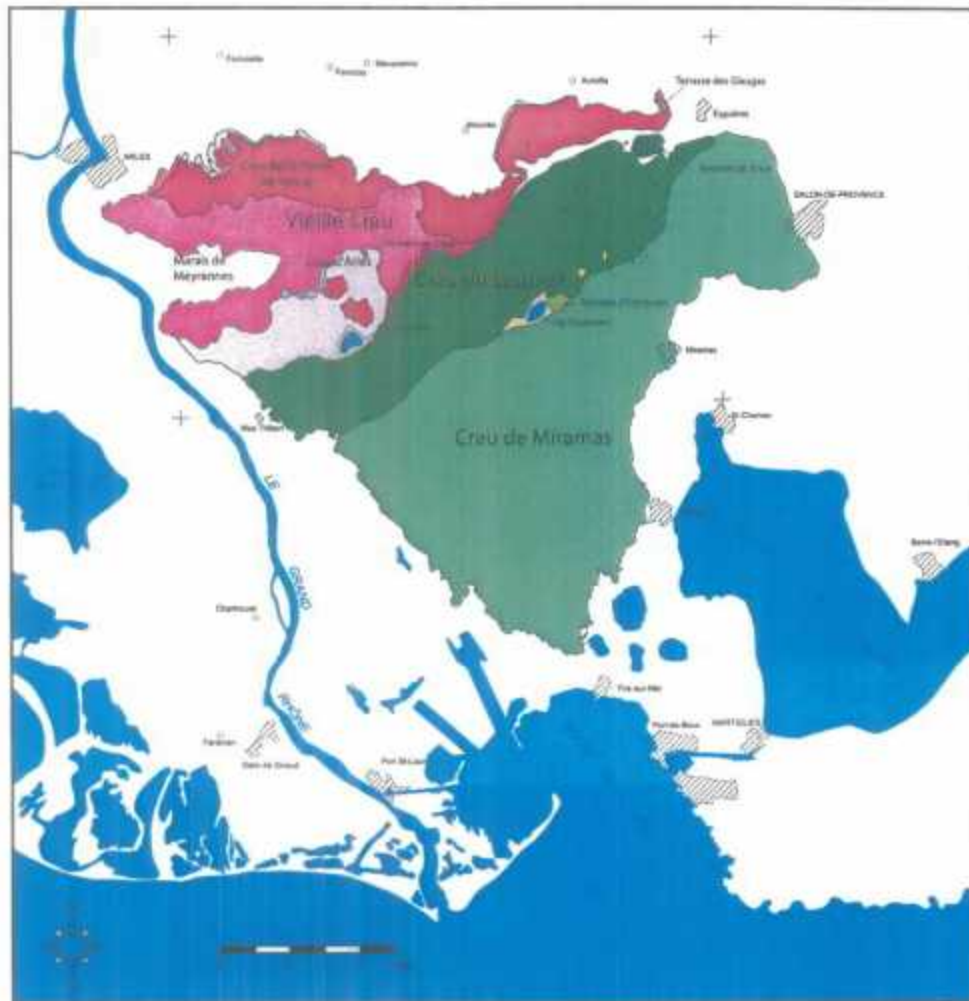
- la « Vieille Crau » qui est constituée par deux unités lithologiques différentes :
 - la Crau d'Arles, elle-même composée par une unité supérieure, une unité inférieure et par un niveau d'argile lacustre intercalé entre ces deux unités ;
 - la Crau de St Pierre de Vence qui est la partie supérieure altérée de la Crau d'Arles.

L'épandage de la Vieille Crau est daté du Villafranchien inférieur.

- la « Crau du Luquier » dont l'épandage est Rissien ;
- la « Crau de Miramas » dont l'épandage est estimé entre l'interglaciaire Riss-Würm et le Würm I

La Crau du Luquier et la Crau de Miramas constituant l'unité de la « Jeune Crau ».

Sur cette carte figure aussi des lambeaux de terrasses intermédiaires entre l'épandage de la Vieille Crau et l'épandage de la Jeune Crau (COLOMB, ROUX, 1978) qui confirme l'avulsion du système entre un épandage Est-Ouest (Vieille Crau) et un épandage NNE-SSW (Crau de Miramas).



Légende

Substratum affleurant au sein de la Crau

- Calcaires Miocène
- Marnes lacustres Pliocène

Unités Quaternaires de la Crau

- Crau de St Pierre de Vence
 - Partie supérieure de la Crau d'Arles
 - Argiles lacustres
 - Partie inférieure de la Crau d'Arles
- } "Vieille Crau"

- Terrasse des Glauges et d'Entressen
 - Terrasse de Brays
 - Crau du Luquier
 - Crau de Miramas
- } "Jeune Crau"

Illustration 6 : Carte synthétique des différentes unités de la Crau.

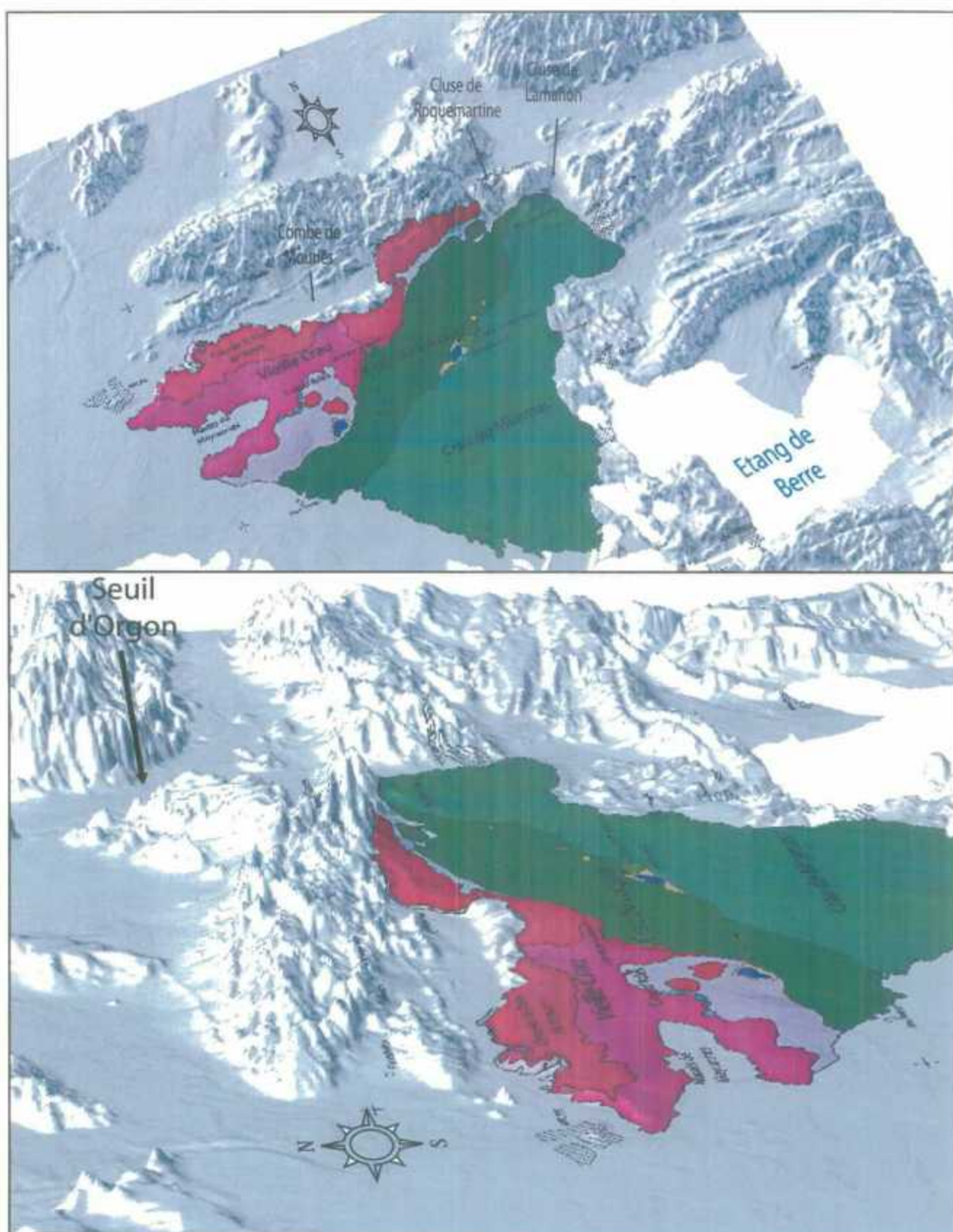


Illustration 7 : Carte synthétique drapée sur MNT (exagération verticale x10).

2.3.3. Description des grands ensembles géologiques

D'un point de vue lithologique, les dépôts Plio-Pléistocènes de la Crau sont constitués par des épandages de nappes alluviales présentant une granulométrie variable en fonction de l'énergie de dépôt.

Ces dépôts oscillent entre :

- un pôle de dépôts conglomératiques à éléments plus ou moins cimentés à éléments de granulométrie de quelques centimètres à quelques décimètres (jusqu'à 40 cm) avec des matrices sablo-argileuses localement indurées ;
- un pôle de dépôts argileux de faible énergie, le pôle argileux étant faiblement représenté par rapport au pôle conglomératique, ce pôle argileux se retrouve dans la partie aval des différentes nappes.

L'épaisseur de ces dépôts est très variable du fait de la morphologie incisée du substratum mio-pliocène, on retrouve ainsi un empilement conglomératique dépassant 50 mètres à l'aplomb de St-Martin-de-Crau alors que le substratum miocène affleure dans la partie Nord-Est de la Crau.

La Crau présente donc une préservation (jusqu'à 50 mètres) des dépôts depuis le Villafranchien jusqu'au Würm en domaine continental fluvial. Il s'agit d'un empilement d'épandages de nappes conglomératiques.

Il n'a été observé de formation chenalisante incisante qu'au sein de la partie aval de la Vieille Crau, les incisions sont absentes dans la partie amont de la Vieille Crau ainsi que dans la Crau du Luquier et dans la Crau de Miramas.

Le matériel conglomératique est préservé en de fin de chute – début de remontée du niveau de base : moment du point d'inversion régression/transgression (VAIL, 1977) seule période possible de préservation du profil de dépôts conglomératiques particulièrement en systèmes fluviaux. La période régressive précédente est réservée au transit du matériel sédimentaire, la période suivante est dévolue au débordement sur les plaines alluviales.

2.3.3.1. La Vieille Crau

Composée par la Crau d'Arles (ou d'Eyguières) et la Crau de St-Pierre-de-Vence, elle constitue l'extrémité Nord de la Plaine, elle présente une direction d'épanchement Est-Ouest entre le défilé de Roquemartine à l'Est qui fut le point d'entrée de la Durance dans la plaine et les dépôts holocènes du Rhône à l'Ouest.

Elle est limitée au Nord par la Combe de Mourès et le massif d'âge jurassique et crétacé de l'Anellier.

La présence de galets siliceux sur les flancs des reliefs d'âge jurassique au Nord de la Combe de Mourès (à proximité du Devenson) indique que celle-ci était préalablement comblée par des cailloutis Villafranchiens contemporains des cailloutis de la Vieille Crau.

Ce remplissage a perduré au moins jusqu'au Würm, la combe a ensuite été évidée postérieurement au Würm (lors de la descente du niveau de base) par un système karstique qui débouche au Nord d'Aureille.

Les cailloutis de la Vieille Crau se redressent de manière significative dans leur partie Nord avec une augmentation de la pente d'Ouest en Est :

- 0,85 % au Sud Ouest du Grand Barbegal ;
- 2 % à l'Est de Mouriers ;
- 45 % à proximité d'Aureille.

La Vieille Crau présente au Nord-est d'Arles un pendage de ses formations de 2 à 3° vers le Sud-Ouest.

Les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques de la Vieille Crau correspondent à celles des termes supérieurs des poudingues de Valensole ou des plus hauts niveaux de la basse Durance (L'HOMER, 1987).

Description des terrains de la Vieille Crau :

Elle est constituée par l'empilement de trois unités distinguables à l'affleurement :

♦ La nappe inférieure de la Vieille Crau (Fu_a)

Elle vient recouvrir sans ravinement net les sables des Glauges (Pliocène), sables continentaux jaunes clairs à stratification oblique fluviatile ou éolienne présentant des valves de Chlamys (Trias remanié).

Elle est constituée de matériaux dérivant en majorité de calcaires jurassiques et crétacés sub-alpins, de grès nummulitiques, de galets siliceux permo-triasiques, de silex ; les roches vertes endogènes sont exceptionnellement rares.

La taille maximale de ces galets excède rarement une vingtaine de centimètres, ces galets présentent un litage en tuile, on n'observe aussi des galets cisailés, un nombre relativement important de ces galets présente des cupules de dissolution (dues à un poinçonnement) indiquant une compression postérieure à la mise en place de la nappe.

Ces galets sont cimentés par un ciment argilo-gréseux jaunâtre constitué de Montmorillonite (dominante), d'illite, de kaolinite et de chlorite (trace).

● Le niveau de marnes lacustres (Fu_b)

Ce niveau de marnes lacustres jaune se retrouve dans la partie aval de la Vieille Crau, endroit où la zone de dépôt s'élargit.

Ce niveau affleure principalement dans un fossé le long de la N568 à 1 km au sud du mas de la Chapelette, ces dépôts lacustres discontinus ne se retrouvent que localement intercalés entre la nappe supérieure et la nappe inférieure, leur puissance oscille entre 2 et 5 mètres.

Ces marnes viennent se déposer de manière concordante sur les dépôts des cailloutis de la nappe inférieure.

Ces niveaux présentent des nodules calcaréo-argileux (illustration 8) ainsi que des traces de paléo-racines. Ces traces d'un paléosol induisent une faible bathymétrie du lac.

Cette faible bathymétrie n'a cependant pas empêché le dépôt de 2 à 5 mètres de marnes.



Illustration 8 : Photo des marnes lacustres de la Vieille Crau.

♦ La nappe supérieure (Fu_c)

Elle est constituée par deux horizons :

L'horizon inférieur vient se déposer en incisant légèrement les dépôts lacustres sous-jacents (illustration 9).



Illustration 9 : Incision des argiles lacustres par la nappe supérieure de la Vieille Crau.

Cet horizon présente le même cortège de matériaux que la nappe inférieure, cependant elle présente localement quelques différences : galets à cortex rubéfié, galet de quartzite du Trias alpin proportionnellement plus nombreux.

On retrouve aussi un nombre plus important de roches vertes et de roche de faciès *verrucano* (faciès de grès et de conglomérat quartzeux, surtout rouge et violacés du Permo-Trias).

On retrouve aussi dans ce niveau supérieur un horizon à forte proportion de niveau argileux rouge de plaine d'inondation (illustration 10), ces niveaux apparaissent en aval de la Vieille Crau (à l'ouest du massif de l'Anellier) et présentent des traces de pédogenèse.

La nappe qui jusqu'alors était confinée entre un point haut sous la Crau de Luquier et le massif de l'Anellier débouche dans un espace beaucoup plus large, induisant une diminution de l'énergie de transport.

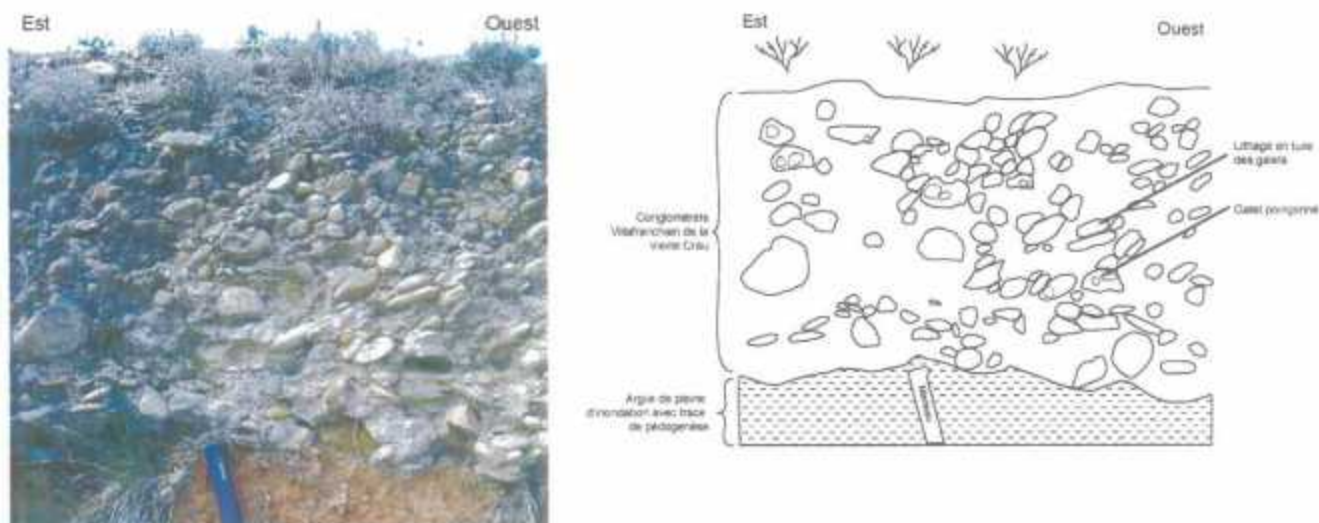


Illustration 10 : Conglomérats de la Vieille Crau reposant sur des argiles de plaine d'inondation.

L'horizon supérieur (A) est un horizon altéré, il s'agit d'un paléosol rubéfié peu épais (épaisseur inférieure à 1 mètre) qui correspond à la Crau de St-Pierre-de-Vence, l'altération ne laisse subsister que les éléments siliceux, cet horizon supérieur présente un enrichissement en roches vertes de type variolite et serpentinite et de roche de faciès *verrucano*.

2.3.3.2. Les « Terrasses » des Glauges et d'Entressen

Ces terrains sont décrits comme des cailloutis à dominante de gros galet siliceux (40 à 50 cm), à roches vertes et à variolites, ces deux ensembles se retrouvent dans la partie Est des nappes de la Crau.

La terrasse des Glauges affleure à l'Ouest d'Eyguières sur les terrains de la Vieille Crau, tandis que la terrasse d'Entressen constitue une fenêtre sous la Crau de Luquier, elle affleure en bordure de l'étang d'Entressen et repose sur des marnes pliocènes lacustres.

Ces deux unités sont décrites comme des terrasses, il s'agit de résidu de nappes, le terme « terrasse » (replat situé sur le versant d'une vallée) étant peu approprié à la nappe d'Entressen.

La nappe des Glauges vient raviner les cailloutis Villafranchiens de la Vieille Crau sous-jacents indiquant donc sa postériorité, ces deux ensembles constitueraient donc un système d'épanchement intermédiaire entre la Vieille Crau et la Crau de Luquier de direction Est-Ouest à E-NE/W-SW.

2.3.3.3. La Terrasse de Brays

Elle est décrite lithologiquement comme des alluvions à prédominance de gros galets de quartzites, elle se situe au débouché du défilé de Roquemartine, entre les épandages Villafranchiens de la Vieille Crau et les épanchements Rissien de la Crau du Luquier.

Elle se retrouve sur une position légèrement surélevée par rapport aux deux nappes qui l'entourent, elle est remarquable par la granulométrie très importante des éléments siliceux qui la compose (40 à 50 cm), ainsi que par l'abondance des roches vertes et des roches du faciès *verrucano*, on retrouve aussi une proportion non négligeable de galets calcaires gélivés et de quartzites éolisés.

Cette unité s'isole de l'unité des Glauges (lithologiquement similaire) par la direction des génératrices du cône d'épandage : les génératrices du cône de l'unité de Brays semblent être orientées Est-Ouest tandis que les génératrices des cônes antérieurs semblent être orientées Nord-Sud, plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer cette direction (COLOMB et ROUX, 1977) :

- la terrasse de Brays serait en fait un niveau de remaniement de la terrasse des Glauges ;
- la terrasse de Brays serait synchrone de la terrasse des Glauges mais serait tectoniquement affaissée ;
- elle aurait été mise en place par un épanchement ne transitant pas par le défilé de Roquemartine mais plutôt par le pertuis d'Eyguières antérieurement à la Crau du Luquier.

Cependant en l'état actuel des recherches il existe encore une grande part d'incertitude concernant le tracé et l'âge des épandages des unités des Glauges, d'Entressen et de Brays.

L'hypothèse envisagée de part leur similarité est que ces trois unités proviennent d'une seule et même nappe intermédiaire entre la nappe Villafranchienne antérieure et la nappe Rissienne postérieure est aussi envisagée.

Il est en effet très probable que durant la longue période entre la fin du Villafranchien et le début du Riss, la Durance qui vraisemblablement transitait par la Crau ait laissé des traces de son passage ; ces unités pourraient aussi correspondre à différentes unités échelonnées sur cette longue période.

2.3.3.4. La Crau du Luquier (Fx_G)

Elle s'étend depuis le seuil de Lamanon qui constitue son point d'entrée dans la Crau jusqu'aux marais holocènes du Rhône sous lesquels elle disparaît, la datation Rissienne est couramment admise pour cette unité.

La Crau de Luquier forme avec la Crau de Miramas l'unité de la Jeune Crau, la distinction entre la Vieille Crau et la Jeune Crau est très ancienne et remonte au-delà des références bibliographiques les plus anciennes.

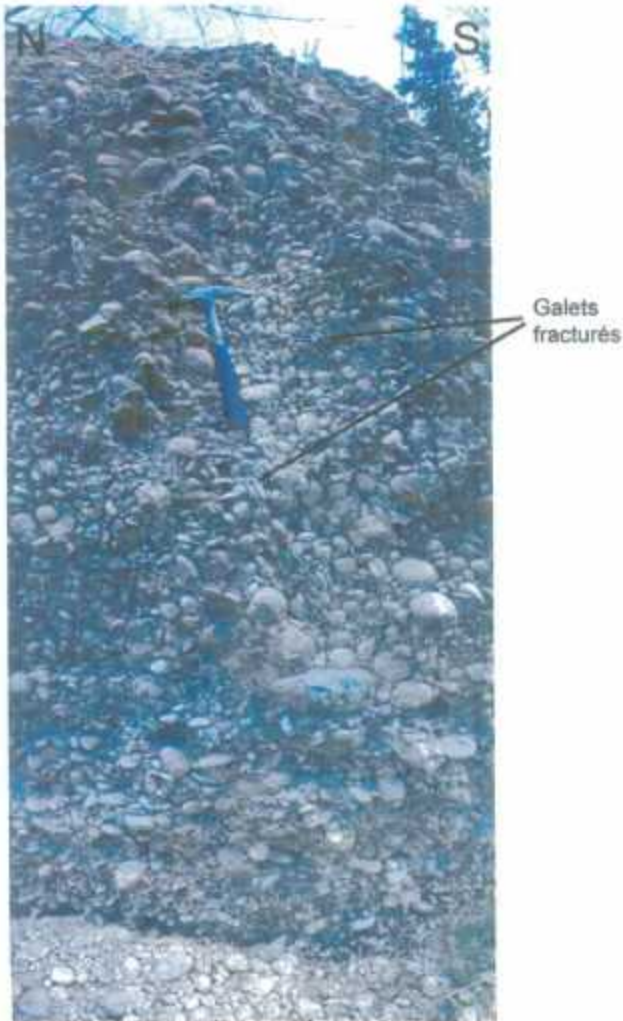
La distinction entre la Crau de Luquier et la Crau de Miramas est beaucoup plus récente, elle ne remonte qu'à l'établissement des cartes géologiques au 1/50.000 d'Eyguières et d'Istres par COLOMB et ROUX (1976-1977), cette distinction n'apparaissait pas sur la carte géologique précédente (carte géologique au 1/80.000 d'Arles – 1970).

La limite entre la Vieille Crau et la Crau du Luquier s'identifie par des différences de faciès et par une variation topographique (visible sur photos aériennes). Cette distinction est beaucoup plus difficile entre la Crau du Luquier et la Crau de Miramas, la limite correspond à une différence de granulométrie marquée entre des éléments de

granulométrie importante (40 cm) de la Crau de Luquier et des éléments de granulométrie plus faible de la Crau de Miramas, cette différence est surtout visible dans la partie avale de la plaine. Cette limite serait marquée selon COLOMB par un petit talus canalisant les eaux de ruissellement.

Un autre critère de différenciation est l'altération plus marquée des galets de roche cristalline de la Crau du Luquier que de la Crau de Miramas

Le poinçonnement des éléments est moins présent que dans la Vieille Crau, la fracturation des galets est elle aussi moins importante (illustration 11).



Cet affleurement montre un certain nombre de galets fracturés ainsi que la présence d'une calcification géotrope autour des galets.

La taille des éléments varie en fonction du litage, l'empilement des éléments à cet endroit du bassin ne semble pas montré d'arrangement particulier.

La Crau du Luquier se caractérise ici par une phase d'aggradation verticale sans variation importante de granulométrie.

Illustration 11 : Empilement conglomératique aggradant de la Crau du Luquier.

La Crau de Luquier présente une très faible épaisseur au maximum une dizaine de mètres, dans la partie amont le substratum miocène affleure au sein de l'épandage de cette Crau.

Du point de vue lithologique les cailloutis de la Crau de Luquier sont constitués en éléments abondants par des calcaires jurassiques et crétacés, des quartzites, des granites, des microgranites, (éléments similaires à ceux que charrient la Durance aujourd'hui), la taille de ces éléments oscille entre 20 et 30 cm.

Les éléments minoritaires sont des protogines (granite verdâtre de texture grossièrement schisteuse, grenue et porphyroïde), des gabbros, des variolites, des roches de faciès *verrucano*, du jaspe et de la lydienne.

Tous ces éléments présentent une cristallisation géotropique (illustration 12).

La matrice est constituée par une matrice sablo-argileuse assez importante de teinte verdâtre, l'importance de cette matrice varie d'un affleurement à l'autre.

Des vestiges d'industries préhistoriques attribuables à l'Acheuléen moyen ou supérieur (600.000 à 80.000 ans BP = Mindel inf. à interglaciaire Riss-Würm) ont été retrouvés dans les formations supérieures de la Crau du Luquier (de LUMLEY H. et al., 1973)



Cristallisation géotropique
sur la partie inférieure
des galets

Illustration 12 : Géotropisme sédimentaire sur la partie inférieure des éléments.

Cette cristallisation largement répandue dans la Crau du Luquier et dans la Crau de Miramas est absente des formations de la Vieille Crau.

La présence de ce concrétionnement indique une forte perméabilité de la formation.

2.3.3.5. La Crau de Miramas (Fy)

La Crau de Miramas est décrite comme une formation de cailloutis à galets siliceux dominants, cette formation est issue du seuil de Lamanon, on la retrouve jusqu'au marais holocènes du Rhône au Sud-Ouest de la Crau. Elle plonge au Sud dans le golfe de Fos/mer.

Des forages en mer ont permis de retrouver les formations pléistocènes attribuables à la Crau de Miramas jusqu'à 10 km au sud de Fos.

Les éléments de datation les plus récents attribuent les cailloutis duranciens de la Crau de Miramas à l'intervalle Riss-Würm à Würm I (début du Würm), ces nappes ravinent à leur base un niveau à malacofaune Rissienne (datation selon J.J. PUISSEGUR).

L'inventaire lithologique de cette nappe est sensiblement le même que celui de la Crau du Luquier, les éléments importants sont représentés par des quartzites du Trias alpin, des éléments de microconglomérat à faciès *verrucano*, des radiolarites, des grès paléogènes, des calcaires mésozoïques sub-alpins. On retrouve aussi mais dans des proportions plus faibles des éléments granitiques, des serpentinites, des variolites, et des gabbros.

A l'affleurement les éléments présentant une granulométrie supérieure à 25 30 cm sont très rares et exclusivement représenté par des quartzites.

La matrice du cailloutis est faiblement présente ou réduite à quelques lits sableux ou limoneux.

Contrairement à la Crau de Luquier, on a pu observer à l'affleurement dans la Crau de Miramas des variations de granulométrie dans l'empilement sédimentaire indiquant des variations d'énergie au moment du dépôt ; on distingue ainsi sur l'empilement sédimentaire une alternance de niveaux de galets de 10 à 15 cm de diamètres à litage en tuile et de niveaux de galets de diamètre inférieur (de l'ordre de 5 cm) ne présentant pas d'arrangement distinct (indiquant une lamination plane) (illustration 13).

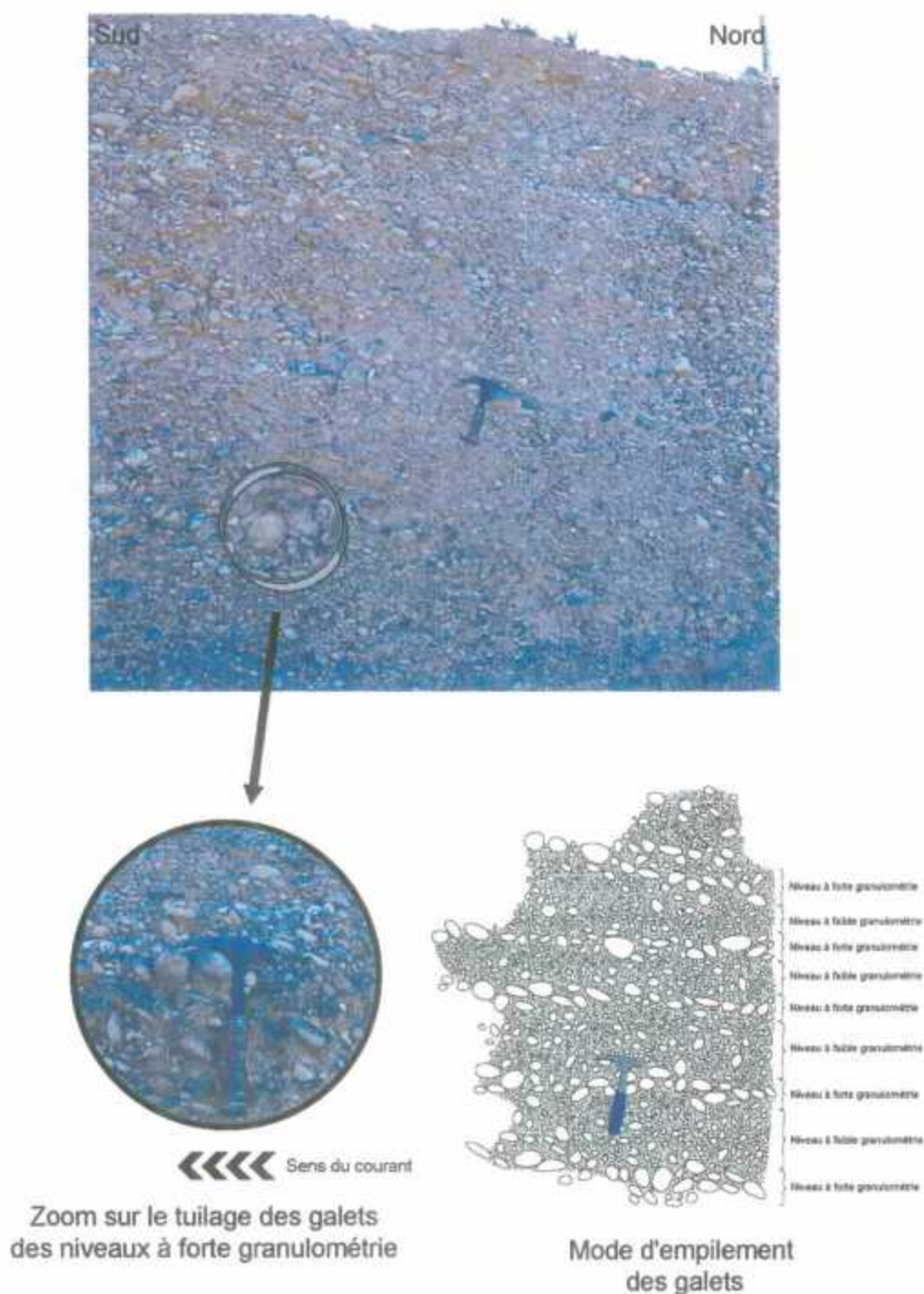


Illustration 13 : Dynamique d'empilement de la Crau de Miramas.

Cet empilement se présente sous la forme d'un empilement de niveaux à gros galets localement tuilés de 10 à 20 cm de diamètre et de petits galets (0,5 à 5 cm), ces empilements présentent une épaisseur moyenne de 30 à 40 cm.

2.3.4. La tectonique et la subsidence de la Plaine de la Crau : état des connaissances

2.3.4.1. Description des grands accidents de la plaine de la Crau

La plaine de la Crau est un bassin compressif délimité par 3 accidents tectoniques majeurs (illustration 14) :

- La faille de l'Anellier au Nord : Cet accident présente une direction Est-Ouest entre Arles et Roquemartine, cet accident se poursuit à l'Est jusqu'aux Alpes il constitue ainsi un grand front de chevauchement à pendage sud, il disparaît à l'Ouest sous le Rhône (ROUIRE, 1979) cet accident est décrit comme ayant eu un jeu inverse au plio-quaternaire (TERRIER, 1991).
On observe au Nord du seuil de Roquemartine des niveaux de sables pliocènes à une altitude de 200 mètres NGF, la zone de dépôt de ces sables se situait à +80 mètres NGF au pliocène (niveau 0 de la mer), la remontée de ces niveaux de plus de 120 mètres implique un jeu de cette faille au cours d'une phase tectonique importante depuis le Pliocène.
- L'accident de Salon-Cavaillon : Cet accident de direction N10, délimite la Crau sur son flanc Est ; cet accident se prolonge au Nord jusqu'à son intersection avec la Faille de Nîmes au niveau du diapir de Suzette. Il disparaît au Sud dans le golfe de Fos sur Mer. La cartographie de cet accident sous la Crau est encore assez incertaine.
Terrier (1991) décrit cet accident comme une faille normale décrochante, cet accident aurait un pendage Ouest
Cet accident est décrit dans la littérature par CONBES (1984), TERRIER (1991) et GABERT (1967) comme ayant eu un jeu décrochant dextre au Würm, cet accident affecterait les cailloutis de la Crau de Miramas (épandage le plus récent), de plus il a été observé des stries décrochantes dans des marnes pliocènes sur le plan principal de l'accident.
Le jeu de cette faille au Würm serait notamment responsable de l'affaissement du seuil d'Orgon, cet affaissement a permis au Rhône grâce à l'érosion régressive de capturer la Durance. Le cours de la Durance a donc migré du seuil de Lamanon vers de seuil d'Orgon (GOUVERNET, 1959 ; COVA, 1975 ; COLOMB et ROUX, 1978).
- La flexure Rhodanienne délimite le dernier flanc du triangle que définit la Crau, cet accident de direction NW-SE aligné sur le grand Rhône est totalement masqué par les dépôts holocènes, son tracé est lui aussi assez mal contraint. Cet accident aurait permis le basculement vers le Sud du delta du Rhône au Quaternaire (Pléistocène et Holocène) (TESSON et ALLEN, 1995 ; BOYER, 2003).

Ces 3 accidents font du bassin de la Crau un domaine géodynamique particulier.

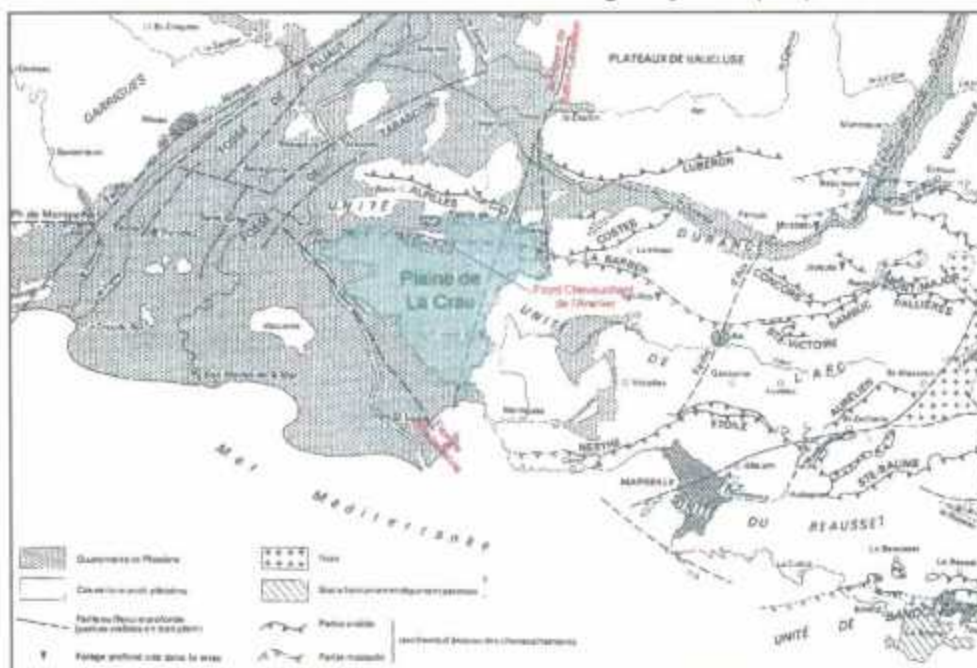


Illustration 14 : Contexte structural de la Provence Occidentale et du bassin de la Crau.
(d'après J. Rouire 1979, modifié)

Il existerait également un certain nombre d'autres accidents sous la plaine de la Crau ; TERRIER (1991) grâce à des mesures gravimétriques émet l'hypothèse de l'existence d'un certain nombre de structures faillées sous la plaine de la Crau. La faille de l'Anellier décrite par Rouire (1979) se séparerait selon Terrier en deux failles sub-parallèles au niveau de Lamanon : la faille d'Aureille au Nord et la faille d'Alleins au sud ; la faille de d'Alleins borderait le dépôt centre Vieille Crau sur son flanc Nord. Elle soupçonne également la présence d'un accident N70 passant sous l'étang d'Entressen et sous Salon de Provence qu'elle appelle faille des Costes (illustration 15).

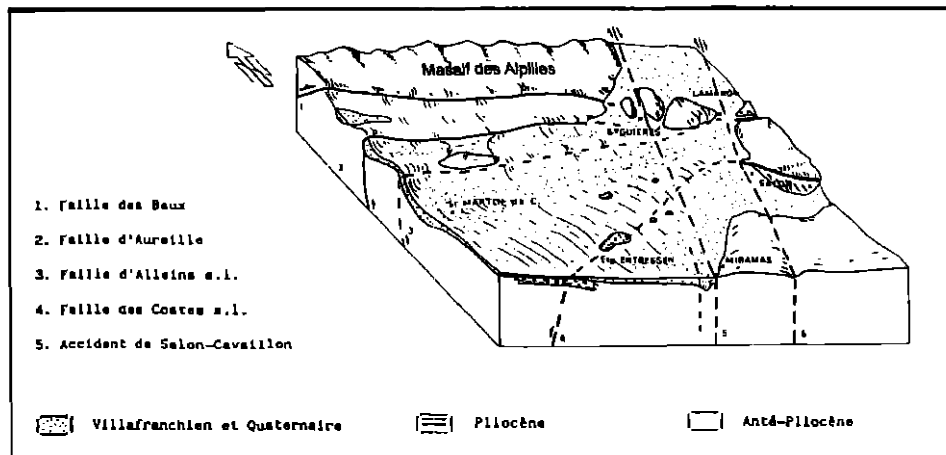


Illustration 15 : Bloc diagramme structural de la Crau.
(d'après Terrier 1991, *modifié*)

La période **plio-quaternaire** correspond à une **période** d'uniformisation de l'état de contrainte compressif dans le domaine du bassin de la Crau ; la contrainte principale (σ_1) est orientée Nord-Sud (TERRIER). Cette tectonique est marquée par le jeu inverse des grands accidents Est-Ouest, l'accentuation des plis Est-Ouest et par le jeu **décrochant** des accidents NE-SW à NW-SE, **cette** compression est responsable du jeu inverse de l'accident de l'**Anellier** et du jeu décrochant dextre de l'accident de **Salon-Cavaillon**.

3. Approche de sub-surface : la géométrie des systèmes plio-quaternaires de la plaine de Crau

3.1. LES DONNEES LITHOLOGIQUES

L'approche de sub-surface a consisté dans un premier temps à recenser l'ensemble des forages de la plaine de la Crau et à créer une base de données de ces ouvrages.

Le BRGM dispose de données de plus de 3000 forages sur la plaine de la Crau et sur sa bordure Ouest, plus de 650 forages disposent de données géologiques (Carte de répartition : illustration 16).

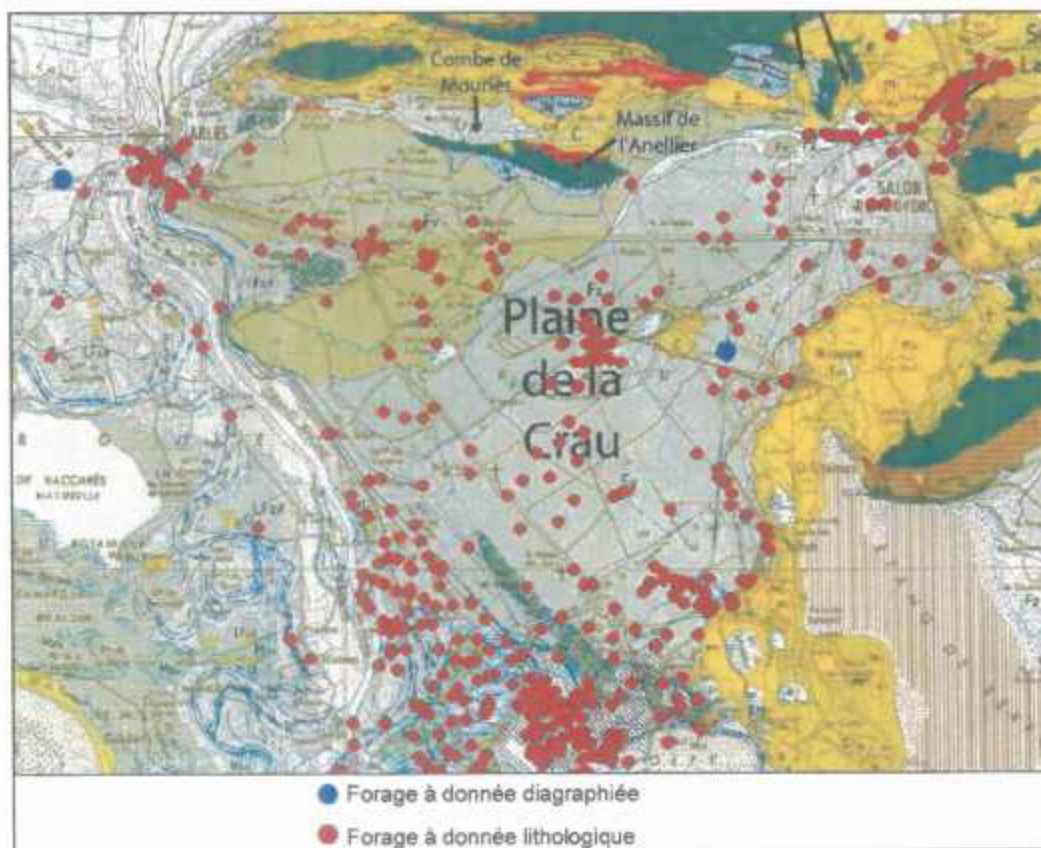


Illustration 16 : Carte de répartition des forages disponible en BSS présentant des données géologiques.

Ces données se présentent sous la forme de logs géologiques dressés par les foreurs au cours du forage. La précision de ces coupes au sein des formations plio-quaternaires permet de dresser des courbes de variation granulométrique (illustration

17). Ces courbes peuvent être interprétées en terme de variation d'énergie de dépôt, on obtient ainsi un empilement de séquences de dépôts que l'on peut interpréter selon les principes de la stratigraphie séquentielle

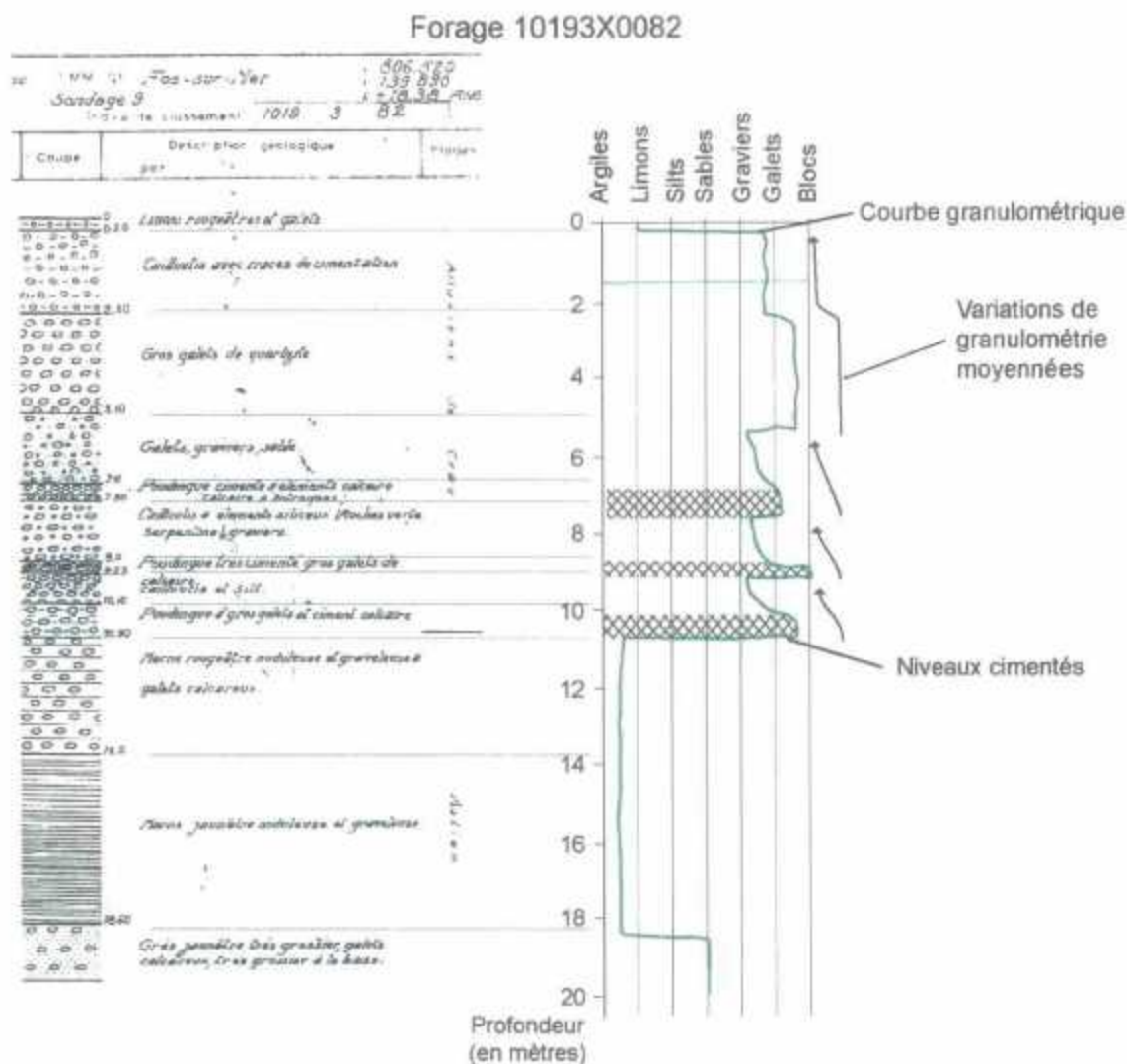


Illustration 17 : Interprétation de données lithologiques en terme de variation granulométrique.

3.1.2. Les données diagraphiés

Ils existent un certain nombre de forages diagraphiés au sein de la plaine de la Crau et du delta du Rhône mais seulement 2 d'entre elles montrent un enregistrement pour les formations des cailloutis plio-pléistocènes.

Un de ces forages diagraphiés se situe dans la Crau du Luquier et enregistre un signal sur une profondeur de 8 mètres ; le deuxième enregistrement plio-pléistocène se situe sous le delta du Rhône et enregistre 40 mètres de signal pour le matériel plio-quaternaire. On retrouve sur cet enregistrement la superposition du signal imputable au matériel de la Vieille Crau celui du matériel Rhodanien (illustration 18).

Diagrammes Electriques "Schlumberger"

Sondage 09923X0002

Arles I

Date des mesures: 29/06/1950

Profondeur atteinte: 120.50 mètres

Première Lecture: 119.00 mètres

Dernière lecture: 13.00 mètres

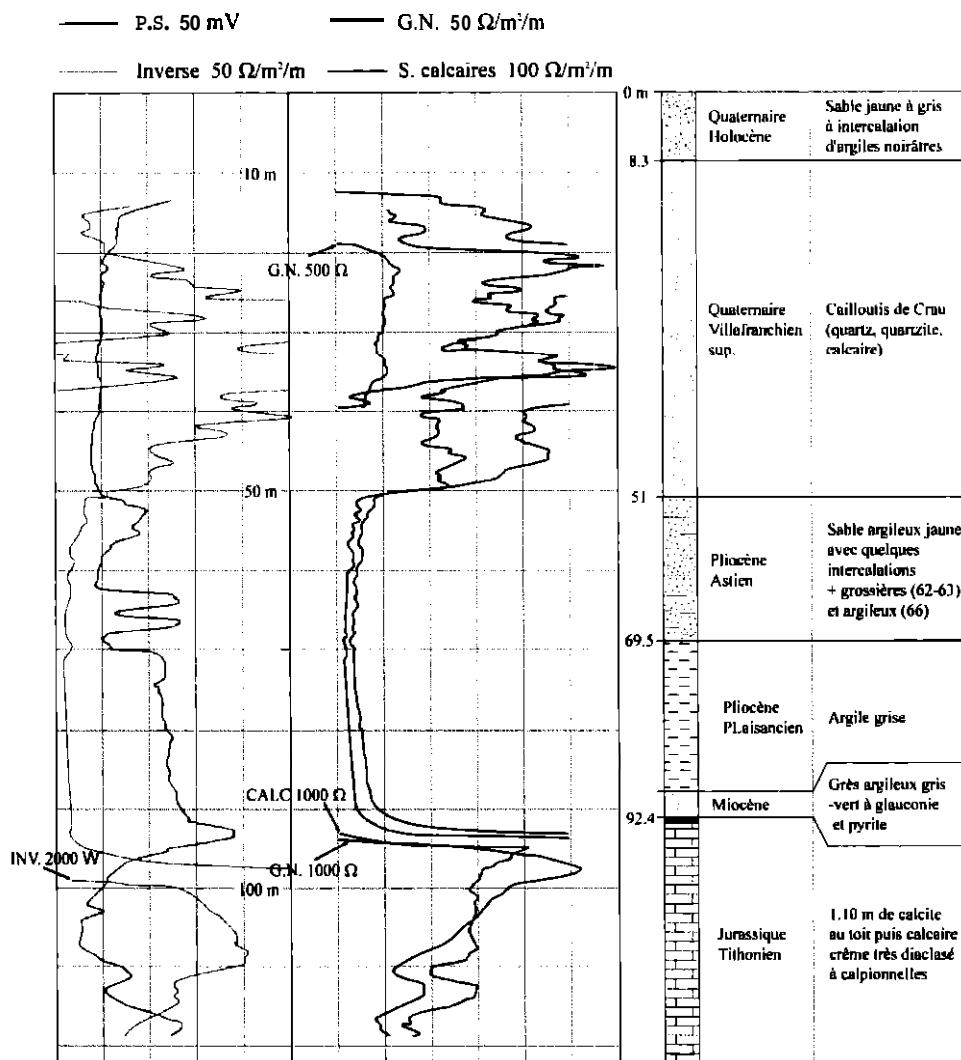


illustration 18 : Courbes *diagraphiques* du forage 09923X0002.

La courbe diagraphique de résistivité inverse (en violet sur l'illustration 18) présente **très** nettement une forme en cloche du signal pour les formations des cailloutis villafranchiens et quaternaires.

La partie supérieure de la courbe montre une diminution de la résistivité de la formation : on trouve des **dépôts très** résistants à la base et des **dépôts** peu résistants

au sommet. Cette diminution de résistance est interprétée comme une migration des dépôts vers le pôle argileux. Cette partie de la courbe peut être interprétée comme une rampe à granulométrie granodécroissante. Ce signal est le signal classique des dépôts en domaine fluvial, il correspond à l'enregistrement classique d'une séquence de dépôt en domaine fluvial (discontinuité + matériel grossier à la base et matériel fin au sommet).

La partie inférieure de la courbe montre une augmentation de la résistivité, il s'agit de la préservation d'une rampe granulométrique progradante, cette augmentation de résistivité peut être interprétée comme une augmentation de la fraction caillouteuse (résistante) de la formation.

La préservation des dépôts de la rampe progradante s'explique par la présence de croissances pendant cette période d'un espace disponible entre la chute du niveau de base et la subsidence.

L'approche a ensuite consisté à réactualiser les cartes isopaques et isohypses des formations des cailloutis de Crau, ces cartes ont ensuite dicté l'emplacement des transects à élaborer, nous avons donc réalisé 5 transects :

3.1.3. Isohypses et isopaques des formations caillouteuses de la plaine de la Crau

Les données de la BSS recueillies depuis 1976 ont permis de compléter les cartes d'isohypses et d'isopaques des formations plio-quaternaires élaborées par COLOMB et ROUX (BRGM, 1976) (illustration 19).

Cette carte n'a pas pu être étendue aux formations plio-quaternaires du delta du Rhône car la profondeur des forages généralement destinés à des recherches hydrogéologiques ne permet pas de d'atteindre la base de ces formations.

L'épaisseur des alluvions déduite grâce à l'analyse des forages est très variable elle oscille entre 0 mètre autour de l'étang des Aulnes et de l'étang d'Entressen ainsi que sur sa partie Nord-Est, mais cette épaisseur peut aussi atteindre plus de 50 mètres à l'Ouest de St-Martin-de-Crau.

Sur le reste de la plaine les épaisseurs varient de 10 à 20 mètres avec deux axes profonds d'épanchement privilégiés :

- un axe Est-Ouest passant par St-Martin-de-Crau en direction d'Arles, appelé sillon d'Arles ;
- un axe N-NE-S-SW suivant le tracé de l'accident de Salon-Cavaillon (selon une ligne Eyguières – Fos/mer), appelé sillon ou couloir de Miramas.

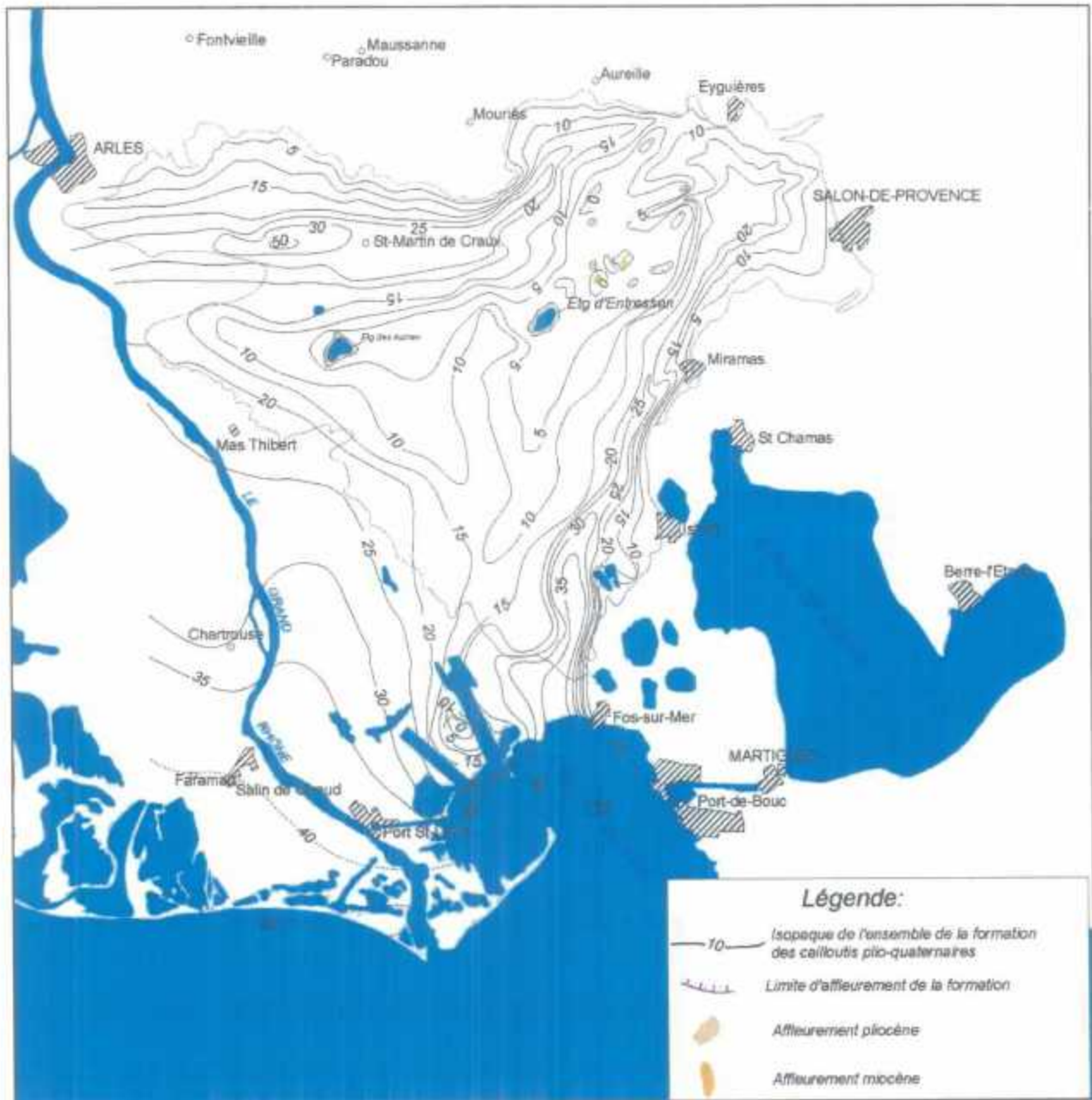


Illustration 19 : Carte des isopaques des formations plio-pléistocènes de la Crau.
(d'après Colomb E. ; Roux R.M. ; 1976, modifié)

Les données de forages ont ensuite permis de réaliser une carte d'isohypses des formations des cailloutis de la plaine de la Crau (illustration 20). Cette carte montre que le toit des cailloutis a été incisé sous le delta du Rhône en plusieurs endroits, on peut distinguer trois chenaux principaux :

Le premier chenal qui a une direction Est-Ouest sous les marais de Meyrannes (à l'Ouest de St-Martin-de-Crau) ce sillon s'infléchit brutalement sous le grand Rhône pour prendre une direction Nord-Sud et se jeter dans le golfe des Saintes-Maries ;
Le deuxième sillon suit le cours du Rhône actuel jusqu'à Arles, se prolonge sous la bordure Ouest de l'étang de Vaccarès et finit sa course dans le golfe des Saintes-Maries ;
Le troisième sillon que l'on peut distinguer est plus occidental, il apparaît à l'Ouest de Arles et se prolonge selon une direction NE-SW vers la Méditerranée.

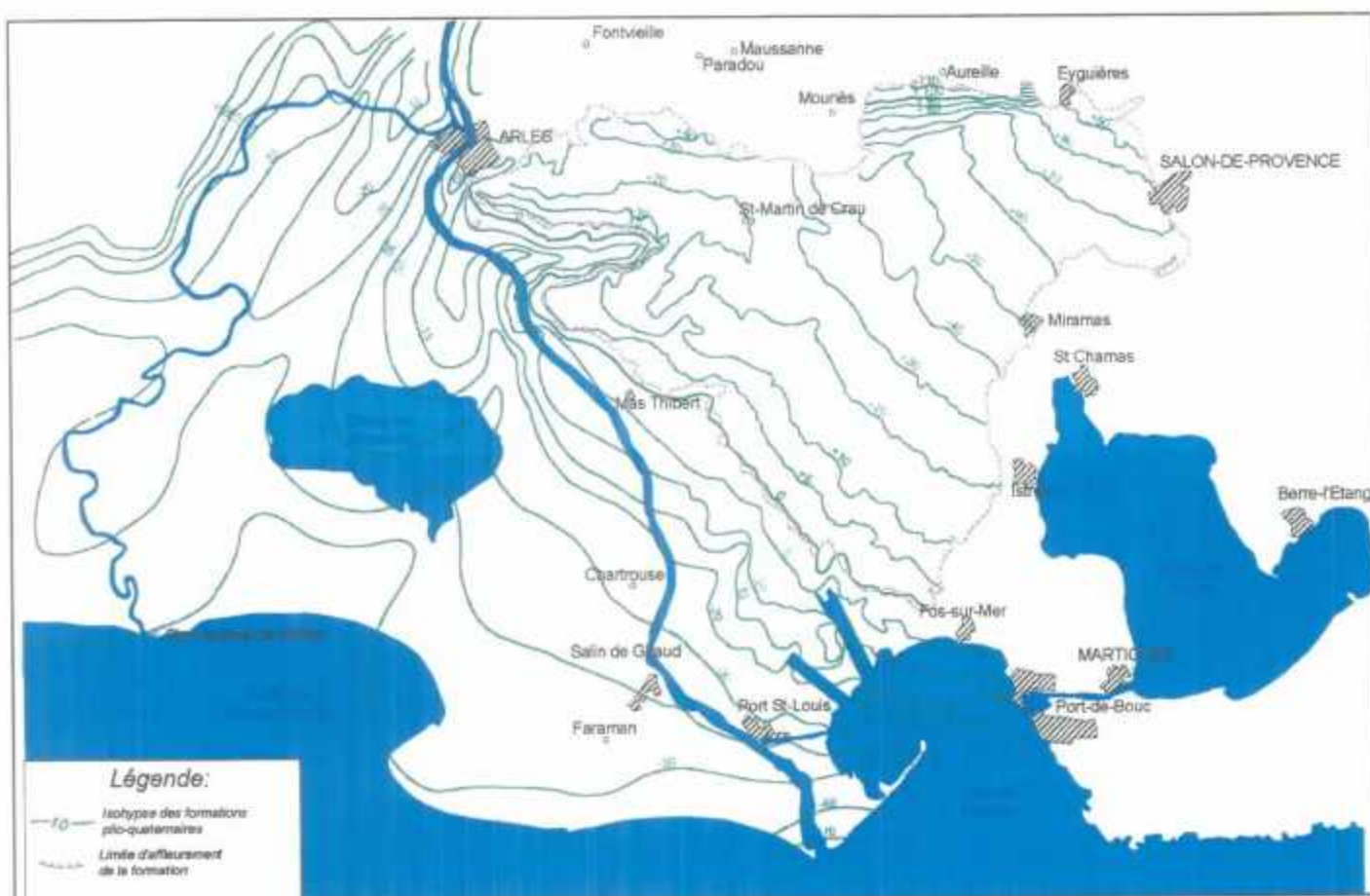


Illustration 20 : Carte des isohypses des formations plio-pléistocènes de la Crau et du delta du Rhône.
(d'après Colomb E. ; Roux R.M. ; 1976)

3.1.4. Les grands transects

La carte des isopaques des formations plio-quaternaires de la plaine de la Crau ainsi que les données disponibles ont dicté le positionnement des grands transects sur

lesquels nous avons positionné les courbes de variations granulométriques de plus de 80 forages.

Nous avons réalisé une série de 5 transects (Plan de positionnement, illustration 21) :

- 3 transects transversaux à la direction d'épandage du matériel de la Crau (transect 3-4-5) ; Ils recoupent les 3 différentes unités de la Crau et pourront montrer les relations entre les différents épandages ;
- 1 transect longitudinal Est-Ouest selon l'axe du sillon d'Arles qui montrera l'évolution amont aval du matériel de la Vieille Crau ;
- 1 transect longitudinal Nord-Sud selon le sillon de Miramas qui décrira l'évolution amont aval de la Jeune Crau.

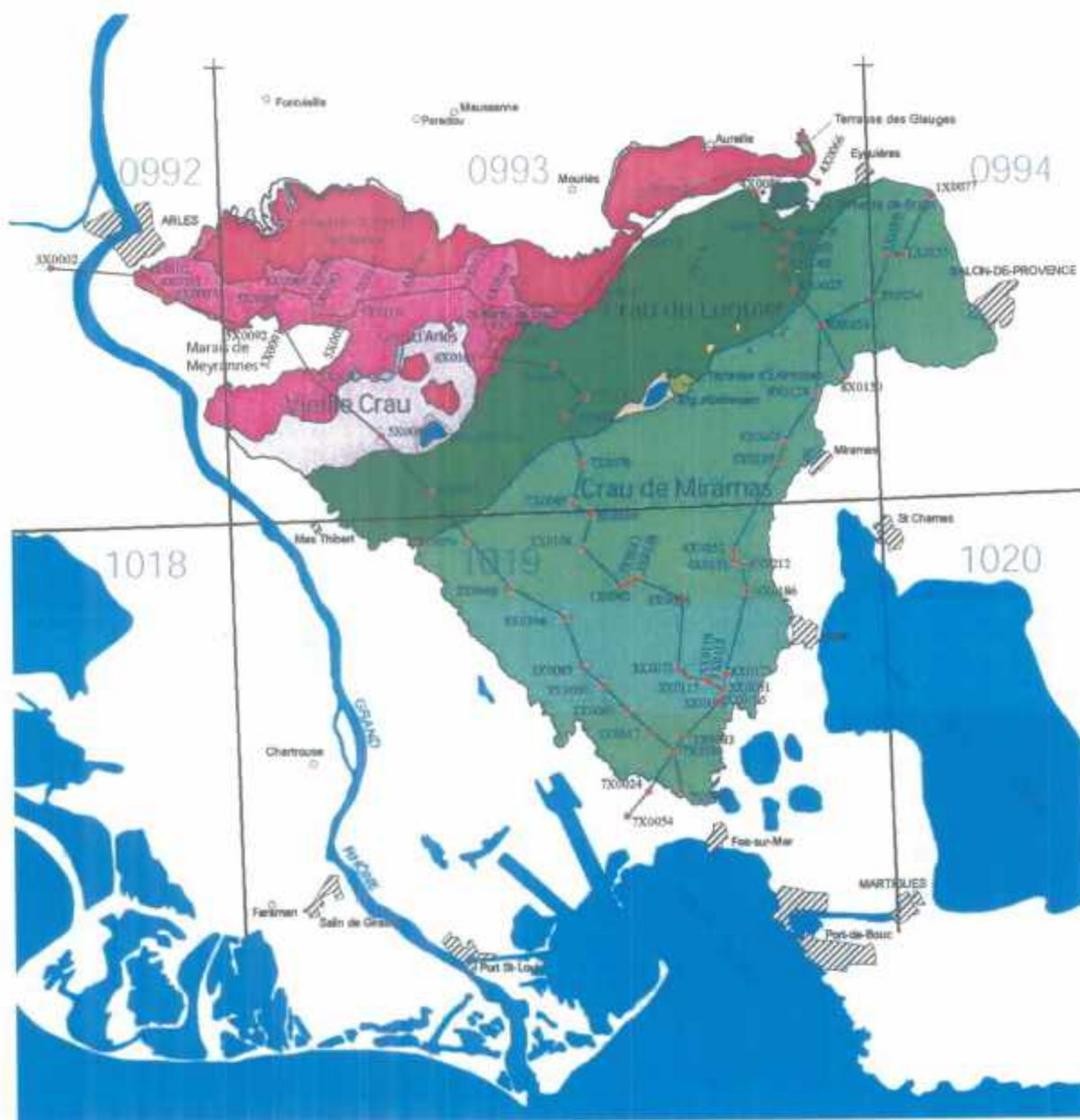


Illustration 21 : Carte de positionnement des grands transects.

4. Interprétation du modèle géométrique de la plaine de la Crau

4.1. MODELE SEDIMENTOLOGIQUE

4.1.1. La notion d'espace disponible

Il est nécessaire de disposer d'un espace entre le niveau d'équilibre et la topographie pour pouvoir préserver les dépôts, l'amplitude de cet espace dépend de deux paramètres :

- la subsidence ;
- les variations du niveau de base lui-même connecté au niveau marin.

De nombreux paramètres témoignent d'une tectonique compressive dans la plaine de la Crau au moment des dépôts des différentes unités ; les variations du niveau de base à elles seules ne suffisent pas à expliquer la présence de plus de 50 mètres à certains endroits de dépôts continentaux.

Les âges déterminés pour les différentes Craus indiquent que ces différents épandages ont été déposés au cours de périodes glaciaires.

Les dépôts de la Vieille Crau attribués au Villafranchien inférieur correspondent à la phase glaciaire Donau, les dépôts de la Crau du Luquier sont attribués à la phase glaciaire Rissienne et les dépôts de la Crau de Miramas s'échelonnant depuis la fin de l'interglaciaire Riss-Würm jusqu'au début du Würm. Ces périodes ne correspondent pas à la phase de préservation habituelle des dépôts conglomératiques, soit la période de fin de chute début de remontée (fin d'une ère glaciaire et début d'une ère interglaciaire), les variations du niveau de base ne peuvent donc pas expliquer la préservation d'une telle quantité de matériel dans les Craus.

La subsidence est donc la grande responsable de la préservation de ces dépôts, l'empilement de plus de 35 mètres de dépôt aux abords de Miramas implique donc une tectonique importante au moment des dépôts.

Cependant les datations des différentes Craus sont des datations relatives, il n'est donc pas à exclure que les variations du niveau de base aient aussi joué un rôle dans la préservation de ces dépôts, rôle vraisemblablement secondaire vis à vis de la subsidence.

4.1.2. La corrélation des grands domaines remarquables

Au sein des transects nous avons corrélié des surfaces remarquables délimitant des domaines présentant une dynamique d'empilement similaire.

Les courbes d'évolution granulométrique permettent d'identifier quatre grands types de domaines (illustration 22) :

- Les domaines d'inondation maximum ; ils sont repérés du point de vue lithologique par des niveaux argileux si l'énergie de transport est faible, ils peuvent aussi être repérés par des niveaux de faible granulométrie intercalés entre deux niveaux de granulométrie plus forte si la diminution d'énergie de transport est moindre.
On retrouve au sein de ces domaines les surfaces d'inondation maximale (MFS) ; ces surfaces en domaine marin sont considérées comme des marqueurs de maxima de bathymétrie, en domaine fluviatile ces niveaux sont assimilés à des niveaux de plaine d'inondation (seul moment où l'on préserve des argiles en domaine fluviatile), ces surfaces sont donc synchrones à l'échelle de la nappe.
- Les domaines de diminution rapide de la granulométrie; ces domaines indiquent une diminution de l'énergie de transport, ils montrent une migration plus ou moins importante des faciès vers le pôle argileux, on retrouve au sein de ces domaines des surfaces que l'on a appelé surfaces d'accélération de transgression (ST) par souhait d'analogie avec le domaine marin. Ces surfaces marquent le point d'inflexion de diminution d'énergie. En domaine marin ces domaines seraient assimilés à des domaines transgressifs.
En domaine marin les surfaces d'accélération de transgression marquent le début de la migration de la ligne de côte vers les terres, en domaine fluviatile ces surfaces peuvent avoir deux origines :
 - Une diminution de l'énergie de transport liée à des conditions climatiques, dans ce cas cette surface sera isochrone à l'échelle de la nappe.
 - Une accélération de la subsidence du bassin cette surface sera isochrone si la subsidence est homogène dans l'ensemble du bassin, cependant si la subsidence est différentielle à l'échelle du bassin cette surface sera une surface diachrone.
- Les domaines de maxima d'énergie, ils se matérialisent à leur base par des surfaces de limites de séquence (SB) (au sens de VAIL, 1977) ; ces surfaces sont liées à une augmentation brutale de l'énergie de transport, cette énergie devient telle que seuls les éléments de granulométrie importante (éléments les plus lourds) peuvent être déposés lors de la préservation du profil de dépôt.
Ces surfaces sont les plus distinctes en domaine fluviatile car elles sont accompagnées par une érosion plus ou moins importante. C'est la période du transit sédimentaire.

En domaine marin elles matérialisent une accélération de chute du niveau de la mer, en domaine fluviatile ces surfaces ont deux origines possibles :

- Une variation du niveau marin relatif ;
- Une origine intrinsèque aux conditions climatiques (variation de l'énergie de transport liée à des précipitations brutales et importantes).

Ces surfaces sont isochrones à l'échelle de l'unité structurale.

- Les domaines à accélération d'énergie de dépôt (à granulométrie croissante = domaine progradant) ; ces domaines sont rares en domaine fluviatile, ils se

définissent lithologiquement par une migration progressive de la courbe granulométrique vers les pôles les plus grossiers. Sur diagraphie la tendance est marquée par une rampe progradante.

Ces domaines n'apparaissent que dans le cas d'une forte subsidence du bassin, en effet le mode de fonctionnement classique d'un système fluvial ne permet pas à ces domaines d'exister, dans un bassin non subsident une phase érosive succède à un domaine d'inondation maximale ou à un domaine transgressif en fonction du taux d'érosion de l'empilement sédimentaire.

Dans le cas du bassin de la Crau on distingue sur certains forages des rampes progradantes marquant une préservation des dépôts alors que l'énergie au sein du système fluvial augmente, la présence de telle rampe est une preuve de la subsidence du bassin.

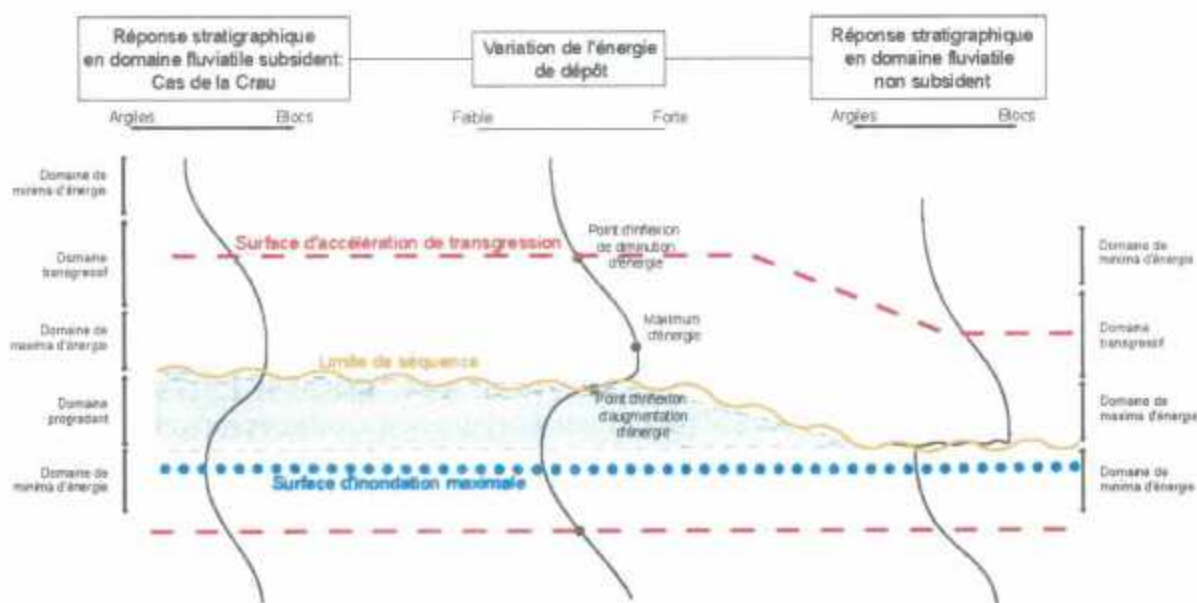


Illustration 22 : Limites des séquences de dépôts : réponse stratigraphique aux variations des énergies de dépôt.

On définit ainsi comme séquence de dépôt, un ensemble délimité par deux limites de séquence ou deux surfaces d'accélération de transgression.

4.2. APPLICATION AU MODELE DE LA CRAU

Au sein des cinq profils choisis au sein des différentes unités de la plaine de la Crau, les puits sont espacés de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. On arrive donc à corréler un certain nombre de surface délimitant différentes séquences de dépôt.

Ces corrélations au sein d'un système fluvial d'épandage en nappe sont possibles de par le fait d'une préservation exceptionnelle des dépôts.

Ces corrélations auraient pu être réalisées en domaine fluviatile chenalissant ou dans un bassin non subsident avec une autre méthodologie de corrélation.

On retrouve ainsi à l'échelle des différents puits un certain nombre de séquences de dépôt délimitées par des surfaces remarquables ; ces surfaces remarquables sont généralement corrélables d'un puits à l'autre.

On obtient ainsi un empilement de dynamiques de dépôts différentes au sein des divers profils.

Les données cartographiques nous permettent de caractériser la dynamique d'empilement de chaque séquence de dépôt de la Crau en fonction de sa position au sein du système (amont, intermédiaire, aval).

L'observation des surfaces remarquables au sein des profils (illustration 23, 24, 25, 26 et 27) permet de distinguer un certain nombre de phénomènes :

- 1) L'avulsion du système de dépôt de la Crau du Nord vers le Sud se fait selon le phénomène suivant :
 - la subsidence crée le dépôt centre ;
 - le dépôt centre est rempli par une aggradation de sédiments ;
 - le système est plein par le jeu subsidence/production sédimentaire/variations du niveau de base, il y a alors avulsion du système vers le point bas le plus proche, c'est à dire dans le cas de la Crau vers le Sud.
- 2) La morphologie des limites de séquences au sein des différentes unités permet de retranscrire le cheminement du dépôt centre pour les différentes nappes
- 3) La non incision des limites de séquence au sein d'une même unité : Les limites de séquences sont relativement planes et non chenalissantes, cette observation est très nette sur les trois profils transversaux ;
- 4) Toutes les surfaces remarquables (limites de séquence ou surface de transgression) apparaissent déformées (plissées ou basculées). Le niveau de marne lacustre de la Vieille Crau apparaît basculé ;
- 5) La limite entre la Crau du Luquier et la Crau de Miramas apparaît sur les profils transversaux et sur le profil Nord-Sud comme une surface transgressive dans la partie avale du système, alors qu'elle apparaît sous la forme d'une limite de séquence dans sa partie amont ;
- 6) La limite entre la Vieille Crau et la Crau du Luquier apparaît comme une frontière de séquence majeure trace d'une incision. Ce type de limite est logique à la vue de l'intervalle de temps séparant le Villafranchien inférieur et le Riss ;
- 7) La Crau du Luquier et la Crau de Miramas se superposent, on retrouve ainsi la dynamique de dépôt de la Crau du Luquier sous la Crau de Miramas, ces deux épandages se sont formés en continuité l'un de l'autre ;
- 8) La morphologie des séquences remarquables permet de mettre en évidence les accidents tectoniques qui ont joué au cours du remplissage du bassin ;
- 9) La morphologie des surfaces remarquables permet de quantifier le jeu des différents accidents du point de vue déplacement et du point de vue temporel.

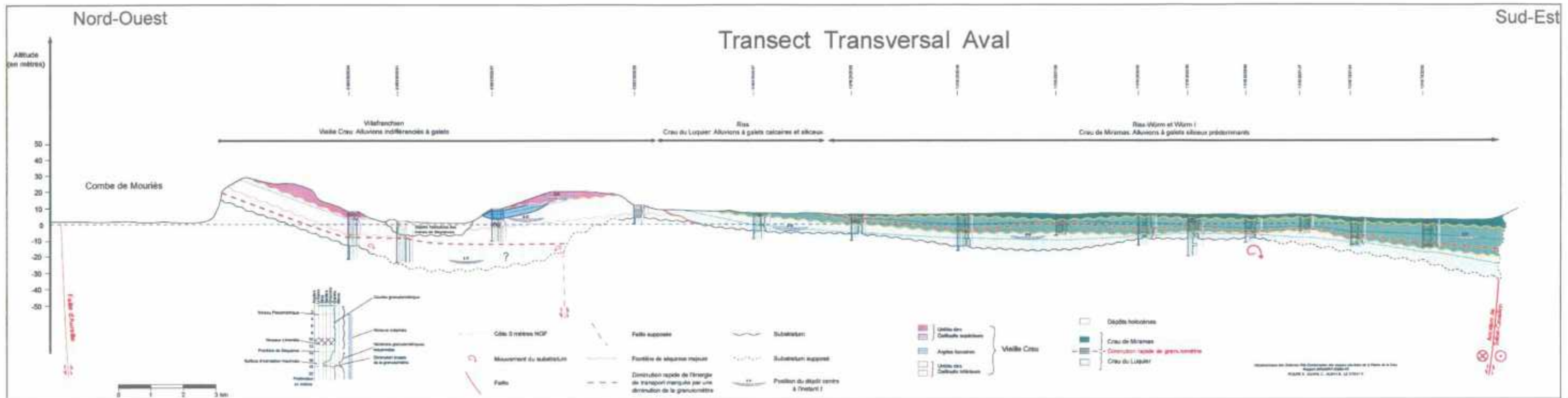


Illustration 23 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal aval.

Description du profil :

- La Vieille Crau (en rose) :

On retrouve au sein de la Vieille Crau un empilement de 3 séquences de dépôts délimitées par des limites de séquence. Ces trois séquences apparaissent basculées ; au sein de ces trois séquences on retrouve également le niveau de marnes lacustres basculé. Ce niveau lacustre marque la position du dépôt centre. On constate donc une migration du dépôt centre du NW vers le SE au cours de l'épandage des nappes Villafranchiennes.

Le remplissage des dépôts Villafranchiens est marqué globalement par une dynamique aggradante, cette dynamique apparaît sous la forme d'un empilement de matériel de forte granulométrie (galets).

Au moment du dépôt les limites de séquence étaient globalement planes, on les retrouve sur les profils transversaux avec une forme concave, cette morphologie indique une subsidence post-Villafranchienne marquée sous les marais de Meyrannes. Cette subsidence pourrait être liée à la faille d'Alleins décrite par Terrier (1991).

- La Jeune Crau (en vert) :

La Jeune Crau est constitué de 3 séquences de dépôts principales, ces séquences de dépôts sont délimitées par des limites de séquence. La limite entre la Crau du Luquier et la Crau de Miramas apparaît sous la forme d'une surface de transgression marquant une diminution rapide de la granulométrie. Cette limite correspond bien à la description de la limite cartographique faite par COLOMB et ROUX (BRGM, 1976) au moment de l'établissement de la carte géologique. Elle délimite deux dynamiques d'empilement différentes :

- La dynamique de la Crau de Luquier semble être constituée par un empilement de série de rampe granodécroissante ;
- La dynamique de la Crau de Miramas semblerait plutôt être constituée par des rampes à forte granulométrie et aggradantes.

On retrouve comme pour la Vieille Crau une migration du dépôt centre vers le SE.

Les limites de séquence apparaissent ondulées, ces surfaces apparaissent nettement basculés vers le SE dans la partie SE du transect. La seule explication possible pour comprendre ce basculement est un jeu à composante normale de l'accident de Salon-Cavaillon au cours de l'épanchement de ces différentes nappes. Les nappes de la partie inférieure apparaissent plus basculées que les nappes de la partie supérieure (morphologie en éventail).

Cette morphologie des limites de séquences nous permet d'estimer la position d'un point de basculement (flèche rouge) de la partie Sud de la Jeune Crau.

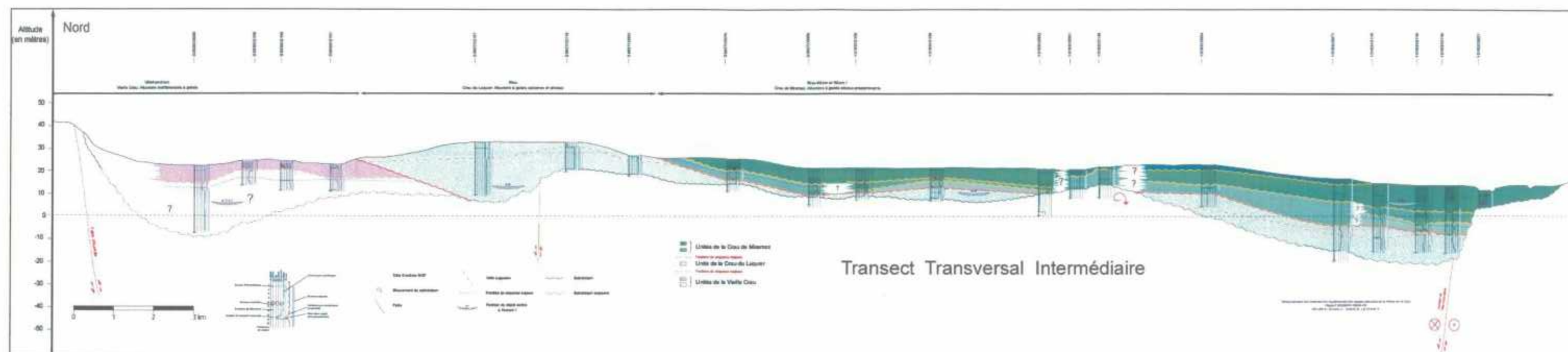


Illustration 24 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal intermédiaire.

Description du profil :

– La Vieille Crau (en rose) :

On a pu distinguer dans cette unité un empilement d'au moins deux nappes. Ces deux nappes apparaissent comme pour le transect aval avec une dynamique de remplissage aggradante forte. La succession de dépôt centre ne présente pas d'avulsion nette ; cet empilement des dépôts centres peut être expliqué par le fait qu'au niveau du transect, l'épanchement de la Vieille Crau était délimité sur son flanc Nord par le massif de l'Anellier et vraisemblablement par un point haut quelque part sous la Crau du Luquier.

– La Jeune Crau (en vert) :

La Crau du Luquier apparaît avec une seule unité d'une épaisseur plus importante que dans sa partie aval, elle présente sur ce transect une forte dynamique aggradante. La limite marquée entre la Crau du Luquier et la Crau de Miramas apparaît sous la forme d'une limite de séquence majeure.

La Crau de Miramas se présente sous la forme d'un empilement vertical de 2 à 3 nappes principales, cet empilement présente pour sa partie Nord un remplissage avec des limites de séquence ondulées mais globalement parallèles. Dans sa partie Sud les limites de séquence présente une morphologie en éventail, avec un épaississement des nappes vers le Sud en direction de l'accident de Salon-Cavaillon. De plus la dynamique de remplissage, qui pour la partie Nord des dépôts était caractérisées par des empilements de séquences granodécroissantes, se marque aux abords de l'accident de Salon-Cavaillon par un empilement de séquences aggradantes voire progradantes pour certains puits.

Toutes ces observations tendent à confirmer un jeu à composante normale de l'accident de Salon-Cavaillon au cours du remplissage de la Crau de Luquier et de la Crau de Miramas. On peut donc estimer la position d'un point de basculement sous la Crau de Miramas (marqué par la flèche rouge sur le transect). On peut émettre l'hypothèse que ce point de rotation se superpose à un accident tectonique. Cette composante normale a entraîné la migration du dépôt centre vers le Sud ; ce dépôt centre n'a jamais dépassé la limite de l'accident de Salon-Cavaillon.

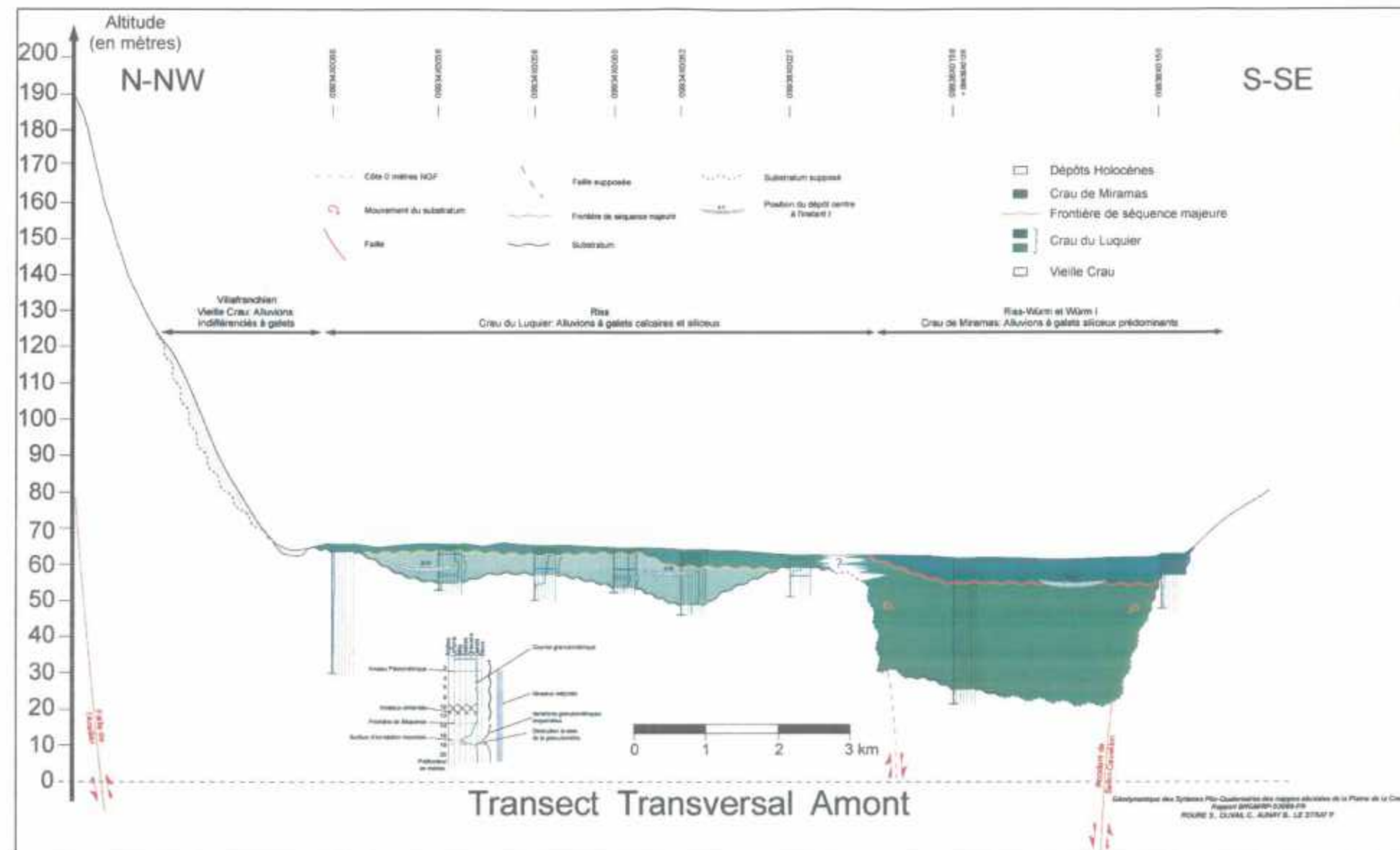


Illustration 25 Corrélation selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect transversal amont.

Description du profil :

– La Vieille Crau (en rose) :

Elle apparaît ici avec une pente très forte de l'ordre de 45% : il s'agit d'un lambeau basculé d'une nappe de la Vieille Crau.

– La Jeune Crau (en vert) :

La Crau du Luquier présente un empilement de 2 nappes. A ce niveau du profil de dépôt ces deux nappes présentent une dynamique essentiellement aggradante. La faible largeur de ce profil ne montre qu'un faible plissement des surfaces remarquables. La limite entre la Crau du Luquier et la Crau de Miramas est une limite de séquence.

Il apparaît une forte différence d'épaisseur entre la partie Sud et la partie Nord des nappes de la Crau du Luquier. L'hypothèse émise pour expliquer cette différence d'épaisseur serait la formation d'un graben lié à une structure de faille en fleur de l'accident de Salon-Cavaillon.

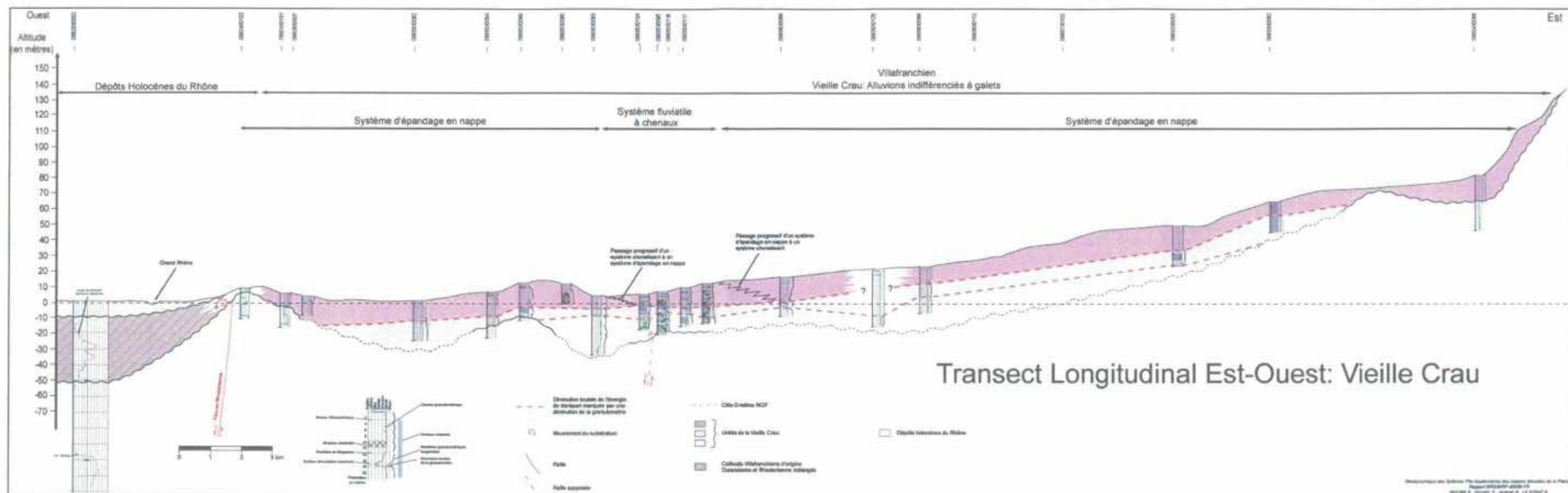


Illustration 26 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect longitudinal du dépôt centre de la Vieille Crau.

Description du profil :

Ce transect se situe dans l'axe du sillon d'Arles est ne touche que les formations Villafranchiennes de la Vieille Crau.

On retrouve au sein de la partie Est de ce profil du matériel exclusivement durancien. La partie Ouest de ce profil montre un mélange de matériel d'origine rhodanienne et d'origine durancienne.

On a pu isoler, au sein de ce transect, 3 grands épisodes d'épandages par des surfaces d'accélération de transgression (diminution rapide de granulométrie). On peut donc penser, au vu des corrélations, entre les profils transversaux et ce profil longitudinal, que la Crau Villafranchienne se serait déposée au cours de trois épisodes principaux.

Il semblerait que l'on retrouve deux dynamiques de remplissage différentes au sein de ce profil. La présence de nombreux niveaux argileux au sein de la partie médiane de la nappe supérieure de ce profil conduit à penser que l'on peut décomposer l'unité supérieure en trois domaines :

La partie amont semble montrer une dynamique de nappe ;

La partie intermédiaire montre une dynamique fluviatile chenalisanse marqué par de nombreux niveaux argileux de plaine d'inondation ;

La partie aval semble être à nouveau dominée par une dynamique d'épandage en nappe.

La présence relativement nombreuse de ces niveaux de plaine d'inondation indique donc un taux de préservation important : ces niveaux tendres devraient normalement être incisés par la venue de matériel grossier supérieure. Cette forte préservation atteste encore une fois d'une influence majeure de la subsidence par rapport à l'évolution du niveau de base.

Les surfaces de transgression qui délimitent ces 3 séquences présentent un pendage Ouest selon la direction d'épandage. Ces surfaces ne présentent pas d'ondulation ou de forme en éventail selon cet axe Est-Ouest comme le montre les profils transversaux Nord-Sud. Cette non-déformation des surfaces remarquables selon ce profil Est-Ouest peut s'interpréter par une contrainte Nord-Sud majoritaire pendant la période plio-pléistocène.

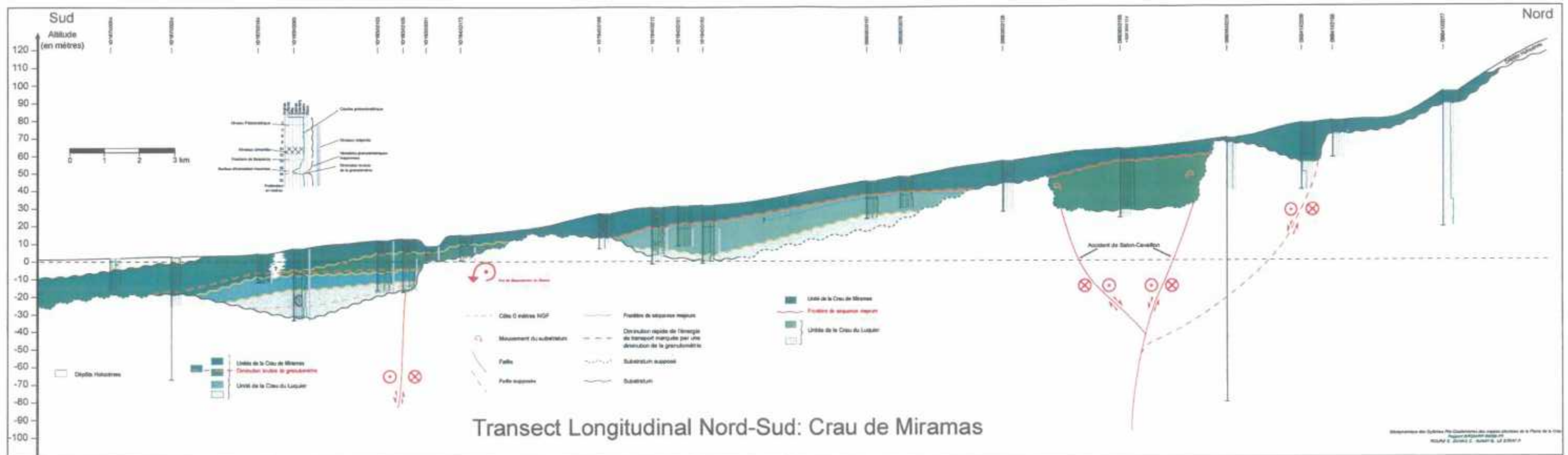


Illustration 27 : Corrélations selon les principes de la stratigraphie séquentielle du transect longitudinal de la Crau de Miramas.

Description du profil :

Ce transect Nord-Sud est situé dans l'axe du sillon de Miramas. Le tracé de ce sillon est dicté par l'accident de Salon-Cavaillon. On observe au sein de ce sillon les formations de la Crau du Luquier et de la Crau de Miramas qui se superposent.

La limite entre ces deux Craus est constituée au Nord du profil par une limite de séquence et au Sud par une surface de transgression. Cette observation majeure implique un basculement du bassin du Nord vers le Sud. L'axe de basculement du bassin est figuré sur le profil par une flèche. La discontinuité qui distingue les deux Craus serait donc imputable à une accélération de la subsidence du bassin.

Les surfaces remarquables de ce profil Nord-Sud au droit de l'accident de Salon-Cavaillon apparaissent étrangement « tranquilles » alors que sur les profils transversaux ces mêmes surfaces apparaissent ondulés voir plissés. Cette observation semblerait indiquer que ce profil se situerait sur une même unité structurale ou que les contraintes seraient moins importantes à proximité de l'accident de Salon-Cavaillon ?

L'obliquité du transect oblige à recouper l'accident de Salon-Cavaillon en plusieurs point ce qui pourrait donner l'illusion de la présence d'un graben selon un axe Est-Ouest. Ce transect permet de cartographier l'accident de Salon-Cavaillon avec une précision importante, si l'on accepte que l'axe du dépôt centre et l'accident de Salon-Cavaillon sont confondus.

5. Prospectives d'extrapolation au delta du Rhône

La plage de Maguelone (Hérault) permet l'observation de galets de variolites. On peut donc se poser la question de l'origine de telles roches en sachant qu'il n'existe aucun affleurement de niveaux variolitiques dans le massif Central.

La seule origine possible pour ces galets est une origine alpine.

De plus on ne retrouve de roche variolitique sur aucune plage entre le delta du Rhône et Maguelone.

On peut donc émettre l'hypothèse pour expliquer la présence de telle roche à Maguelone, de la possibilité d'une connexion Est-Ouest sous le delta holocène du Rhône entre la Crau et Maguelone.

La Vieille Crau apparaît donc être le seul système qui aurait pu poursuivre son itinéraire selon un axe Est-Ouest jusqu'aux environs de Maguelone.

L'hypothèse d'un chenal Est-Ouest « Vieille Crau – Maguelone » est étayée par les faits suivants :

- galet de variolites d'origine alpine sur la plage de Maguelone ;
- présence d'un chenal plio-pléistocène Est-Ouest sous la plaine holocène du Languedoc au droit de l'étang de l'Or (RAFFY, DUVAIL et Le STRAT, 2002) ;
- chenal plio-pléistocène Est-Ouest de la Vieille Crau ;
- la structure mésozoïque et cénozoïque alpine d'axes structuraux Est-Ouest (Alpilles).

D'autres observations sont aussi à prendre en compte :

- la vallée messinienne du delta du Rhône. Cette vallée d'orientation Nord-Sud (CLAUZON, RUBINO et al., 1999) doit être automatiquement comblée pour permettre le passage du chenal plio-pléistocène Est-Ouest ;
- le relèvement structural des Alpilles (+120 mètres des niveaux pliocènes (transitionnel marin-continental) au Nord de Roquemartine).

Il est donc clair que la disposition des différentes nappes de la Crau a eu des incidences majeures dans la distribution et la production sédimentaire au sein du delta du Rhône et du Languedoc pendant tout le plio-pléistocène.

Ce travail sera abordé dans une étape ultérieure.

6. Conclusion

Ce travail a permis d'aborder, au sein d'un ensemble sédimentaire majeur que sont la plaine de la Crau et le delta du Rhône, la question de l'application des techniques de stratigraphie séquentielle, stratigraphie génétique, et de géomorphologie dans un complexe détritique de nappes alluviales en domaine partiellement compressif.

Ce travail a permis tout d'abord de valoriser des données de sub-surface existant dans la région.

Ce travail est d'autant plus intéressant qu'il a permis la réalisation d'un modèle sédimentologique de bassin à partir de données, qui apparaissent humbles en comparaison des données collectées actuellement grâce aux techniques modernes.

On a ainsi pu retranscrire l'histoire des systèmes plio-pléistocènes des nappes alluviales de la plaine de la Crau en terme de relation sédimentation-tectonique, en utilisant une méthodologie nouvelle qui s'appuie sur les principes fondamentaux de la sédimentologie moderne.

Ce travail a aussi permis une réinterprétation et une actualisation de toutes les observations géologiques recensées dans la plaine de la Crau jusqu'à nos jours.

Il permet enfin de structurer l'histoire plio-pléistocène de la Crau dans le complexe du delta du Rhône et de repositionner ces termes géologiques dans la géodynamique générale.

Il faut rappeler que cette étude s'intègre dans un cadre plus général qui est celui de la marge passive du Golfe du Lion au contact de la zone alpine.

Bibliographie

- AMBERT, P., M. AMBERT, et al. (1982). "Littoraux miocènes et quaternaires du Languedoc occidental." Comptes rendus de l'Académie des Sciences tome 295: p. 251-254.
- BALLESIO, R. (1972). "Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien." Doctorat, Laboratoire de Géologie de la faculté des Sciences de Lyon n° 53: 333 p.
- BAULIG, H. (1927). "La Crau et la glaciation Würmienne." Annales de Géographie Tome 36: p. 498 - 508.
- BONNIFAY, E. (1962). "Recherches sur les terrains quaternaires dans le Sud-Est de la France." Thèse, Travaux Inst. Préhist. Univ. Bordeaux Tome II: 194 p.
- BOURDIER, F. (1962). "Le Bassin du Rhône au Quaternaire." Géologie et Préhistoire Paris, CNRS: 2 tomes, 657p.
- BOYER, J. and al. (2003). "Le delta du Rhône: géodynamique de l'Holocène post-maximum glaciaire." Rapport BRGM: RP-52179-FR: 99 p.
- BRGM (1969). "Carte géologique 1/80 000 d'Arles."
- BRGM (1971). "Carte Géologique 1/50 000 de Salon de Provence."
- BRGM (1971). "Carte géologique 1/50 000 des Stes Maries de la Mer."
- BRGM (1976). "Carte géologique 1/50 000 d'Istres."
- BRGM (1977). "Carte géologique 1/50 000 d'Eyguières."
- BRGM (1979). "Carte géologique 1/250 000 de Marseille."
- BRGM (1987). "Carte géologique 1/50 000 d'Arles."
- CALVET, M. (1996). "Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne ; les Pyrénées Orientales." Documents du BRGM, BRGM éd, Orléans n° 255, 3t.: 1177 p.
- CLAUZON, G. (1979). "Le canyon Messinien de la Durance (Provence, France): une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation." Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology v. 29: p. 15 - 40.
- CLAUZON, G., J. L. RUBINO, et al. (1999). "Physiographie et architecture du remplissage de la partie distale de la Ria Pliocène du Rhône (Camargue, Provence)." Poster congrès ASF Nancy.

COLLOT, L. (1904). "Pliocène et Quaternaire de la région du Bas-Rhône." Bulletin de la Société Géologique de France Tome IV: p. 401 - 415.

COLOMB, E. and R. M. ROUX (1978). "La Crau. Données nouvelles et interprétation." Géologie Méditerranéenne Tome V, n° 3: p. 303 - 324.

COLOMB, E. and R. M. ROUX (1986). "La Crau, histoire Plio-Pléistocène." Méditerranée Vol. 58, n° 3: p. 31 - 42.

COQUAND (1869). "La Crau, sa composition géologique et son origine." Bulletin de la Société Géologique de France Tome 27, 2e série: p. 541 - 583.

COVA, R. (1965). "Etude hydrogéologique de la partie Septentrionale de la Crau et de reliefs de bordure." Thèse de 3ème cycle, Université de Montpellier: 105p.

De LUMLEY, H., J. C. MISKOVSKY, et al. (1973). "Dépôts du Riss et du Riss-Wurm dans le Midi méditerranéen. Riss and Riss-Wurm deposits of the Mediterranean region of the South of France." Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire Supplément no.36: p.62-67.

DEMARCO (1961). "Les faciès du Miocène supérieur et du Pliocène inférieur et la limite miocène-pliocène dans la vallée du Rhône." Comptes rendus du coll. Néog. Méditer. Sabadell-Madrid: 7p.

DENIZOT, G. (1933). "Sur l'âge des vieux poudingues de la Durance et de la Crau." Comptes rendus de l'Académie des Sciences Tome 196: p. 1906 - 1908.

DENIZOT, G. (1939). "La Crau, La Camargue et l'Etang de Berre." Annales de la Faculté des Sciences de Marseille Tome XI, 2e Série: 178 p.

DENIZOT, G. (1953). "Pliocène dans la vallée du Rhône." Rev. Géogr. Lyon v. 27: p. 327-357.

DUVAIL, C., P. LE STRAT, et al. (2002). "Architecture et géométrie haute résolution des prismes sédimentaires plio-quaternaires au droit du Roussillon suivant un profil Terre-Mer." Rapport BRGM: RP-51972-FR: 71 p.

ESCHARD, R. (1989). "Géométrie et dynamique de séquences de dépôts dans un système deltaïque (Jurassique moyen, bassin de Cleveland, Angleterre). Implications sur l'architecture tridimensionnelle des corps sédimentaires." Thèse de 3ème cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg: 104 p.

ESCHARD, R., C. RAVENNE, et al. (1991). "Three dimensional reservoir architecture of a valley-fill sequence and deltaic aggradational sequence: Influences of minor relative sea-level variations (Scalby formation, England). In: The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery, Miall A.D., Tyler N.éd., SEPM, Concepts Sedimentol. Paleontology: p.133-147.

FONTANNES, F. (1884). "Note sur la constitution du sous-sol de la Crau et de la plaine d'Avignon." Bulletin de la Société Géologique de France IIIe série, Tome 12e: p. 463 - 473.

GABERT, P. (1965). "Phénomènes périglaciaires du Quaternaire supérieur et Néotectonique dans la région de l'Étang de Berre (Basse Provence Occidentale)." 90ème Congrès des Soc. Savantes Tome II.

GOVERNET, C. (1959). "Evolution géologique des relations du Bas-Rhône/Basse-Durance pendant les temps Pliocène et Quaternaire." Annales de la Faculté des Sciences de Marseille Tome II, XXIX, 1: p. 273-279.

GOVERNET, C. (1969). "Excursions du certificat de géologie appliquée." Non publié.

HOMEWOOD, P. W., F. GUILLOCHEAU, et al. (1992). "Corrélation haute résolution et stratigraphie génétique: une démarche intégrée." Bulletin Centre de Recherche Exploration Production Elf Aquitaine 16: p. 357-381.

HOMEWOOD, P. W., P. MAURIAUD, et al. (1999). "Best practices in Sequence Stratigraphy for explorationists and reservoir engineers (Vade-mecum de Stratigraphie Séquentielle pour géologues, géophysiciens et ingénieurs réservoirs)." Bulletin du Centre de Recherche Elf Exploration Production Mémoire 25: 81 p.

L'HOMER, A. (1987). "Notice explicative de la feuille d'Arles à 1/50 000." Carte Géologique d'Arles (BRGM).

RABINEAU, M. (2001). "Un modèle géométrique et stratigraphique des séquences de dépôt quaternaires sur la marge du Golfe du Lion: enregistrement des cycles climatiques de 100 000 ans." Thèse de 3ème cycle, Université Rennes I: 455 p.

RAFFY, A., C. DUVAIL, et al. (2002). "Contribution des bassins d'alimentation superficiels et souterrains à l'étang de l'Or (Hérault)." Mémoire de DESS, Université d'Avignon.

REPELIN, J. (1930). "Constitution Géologique de la Crau." Comptes rendus de la Société géologique de France: p. 971 - 976.

ROUIRE, J. (1979). "Notice explicative de la carte géologique de Marseille au 1/250 000." BRGM.

SEGURET, M., A. BENEDICTO, et al. (1997). "Structure profonde du Gard Rhodanien, Apport du retraitement et de la Réinterprétation de données sismiques régionales." Comptes rendus des Journées Scientifiques, Bagnols-sur-Cèze 20 et 21 Octobre 1997.: p. 31-32.

TERRIER, M. (1991). "Néotectonique de la Provence Occidentale: Vers une analyse multicritère des déformations récentes

Application à la classification des structures sismogènes." Thèse de l'Université de Provence (Aix Marseille I): 215 p.

TERRIER, M. (2002). "Identification et hiérarchisation des failles actives de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Bilan et synthèse des connaissances sismotectoniques actuelles." Rapport BRGM: RP-51910-FR: 52 p.

TESSON, M. and G. P. ALLEN (1995). "Contrôle tectonique et eustatique haute fréquence de l'architecture et la stratigraphie des dépôts de la plate-forme péricratonique. Exemples du Golfe du Lion (Méditerranée, France) et les dépôts quaternaires." Comptes rendus de l'Académie des Sciences 320: p. 39-46.

TRICARD, J. (1954). "Périglacière, fluvio-glaciaire: essai de corrélations du quaternaire de la Durance." Mém. de Doc. Tome IV, CNRS éd: p. 173 - 202.

VAIL, P. R. (1976). "Seismic stratigraphy overview." Lecture notes prepared for AAPG SEG School on Stratigraphic Interpretation of seismic data, Houston, Texas.

Annexes

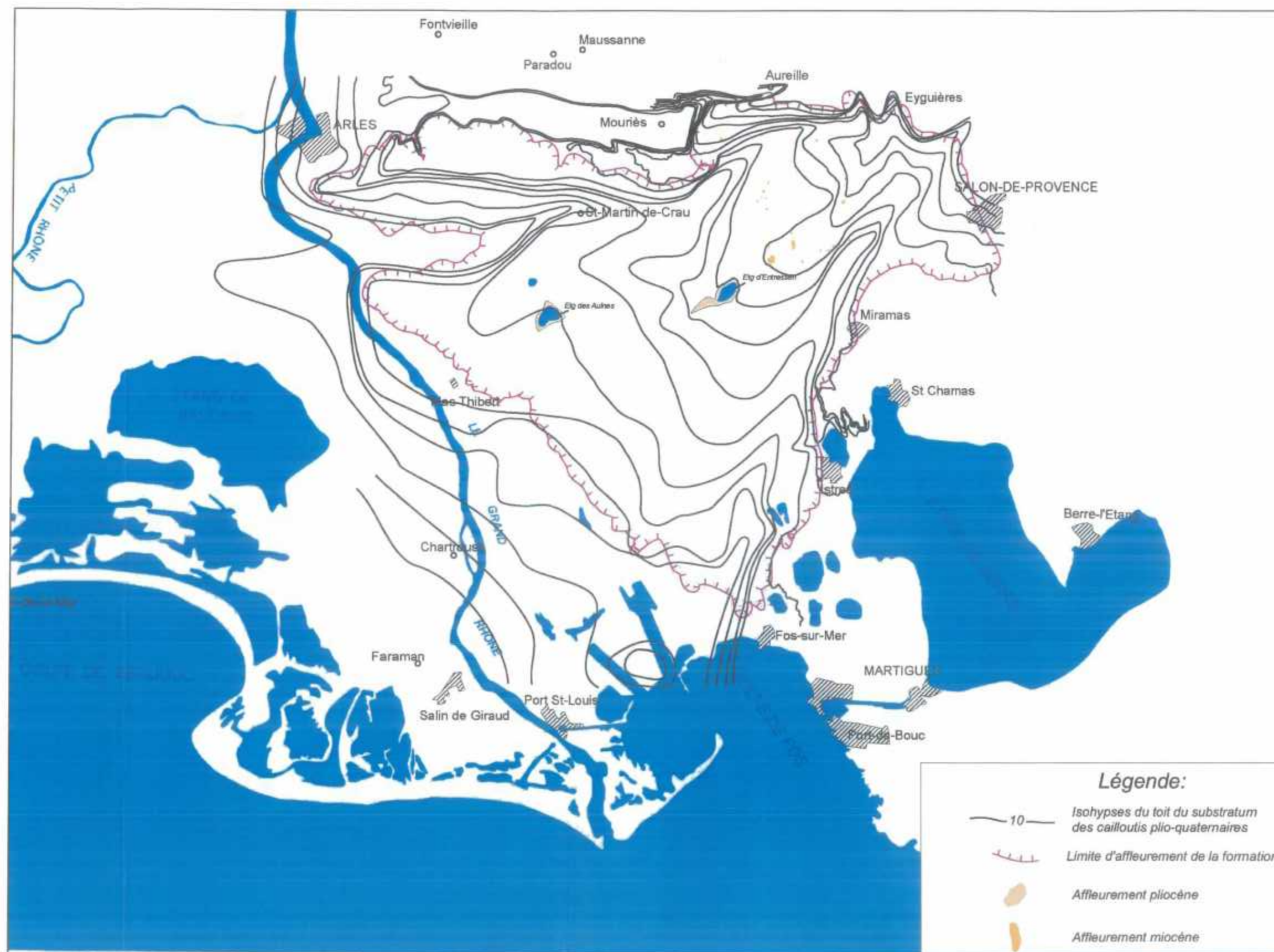


Illustration 28 : Isobathes du toit du substratum des nappes alluviales de la plaine de la Crau

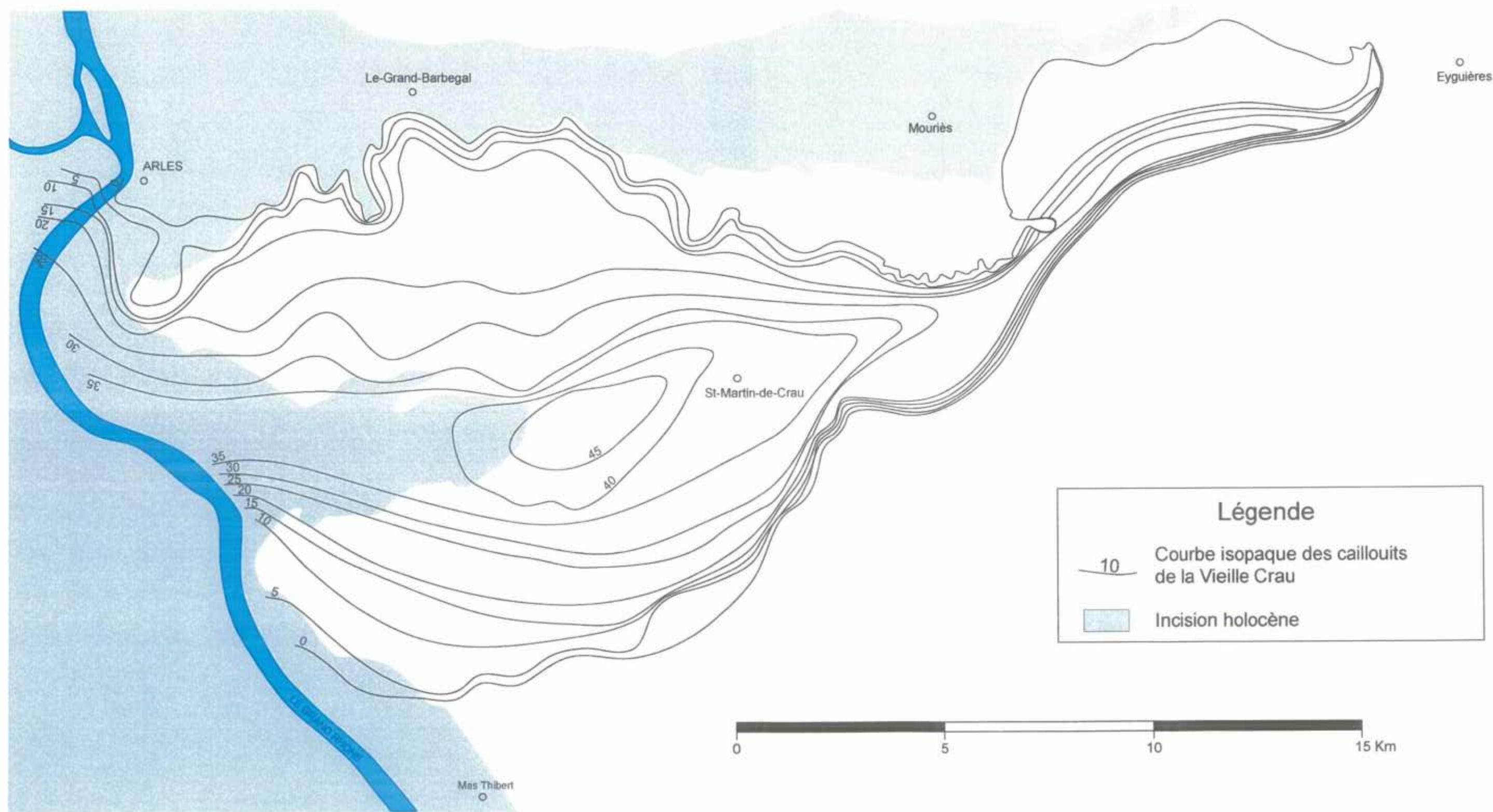


Illustration 29 : Isopaques de la nappe alluviale de la Vieille Crau