

Les systèmes hydrologiques et hydrogéologiques de Camargue et leur interactions

La structure en 3 couches mise en évidence par la géologie doit avoir des conséquences sur la répartition verticale des perméabilités et donc sur la structure et le fonctionnement de plusieurs réservoirs aquifères. Ainsi ces 3 couches individualisent des systèmes hydrogéologiques différents (Fig. 22) : l'aquifère des cailloutis, l'aquitard et l'aquifère superficiel. Des caractéristiques hydrogéologiques différentes du niveau des cailloutis en Crau et en Camargue (respectivement libre/captif) conduisent à séparer ce niveau en 2 entités dont les relations sont à préciser.

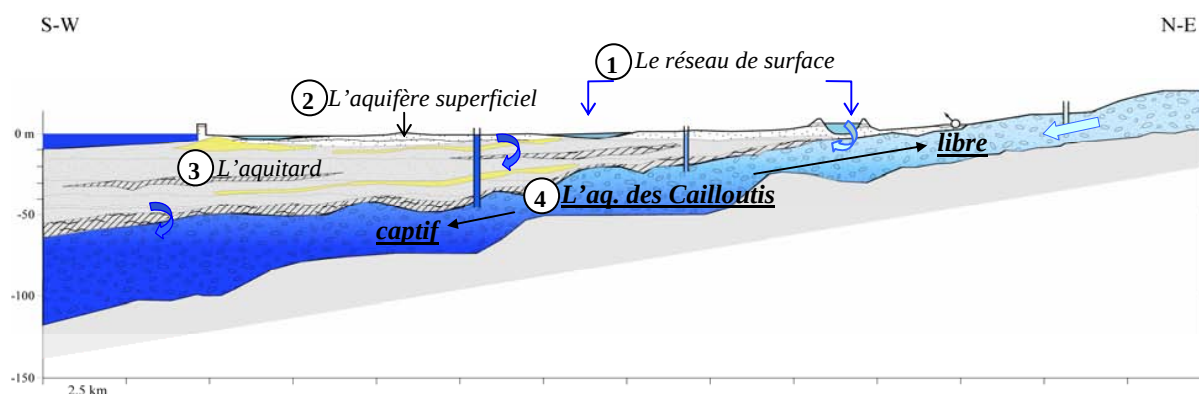


Fig. 22. Localisation respective des différents systèmes hydrogéologiques

Différents systèmes hydro(géo)logiques sont donc en connexion. Il est donc important de connaître les caractéristiques propres à chacun de ces systèmes pour évaluer leur influence sur l'aquifère captif des cailloutis.

II.3.1. Le réseau hydrographique

Le système hydrologique de la Camargue est enserré entre la Méditerranée et les deux bras actuels du Rhône. Comme de nombreux deltas, la Camargue est sujette à une force anthropisation. Au XIX^{ème} siècle, l'achèvement de l'endiguement du Rhône (1859) et la construction de la digue à la mer (1856) mettent fin aux invasions des étangs par la mer et aux inondations par les crues du fleuve. Ces nouvelles lignes de reliefs artificielles isolent encore plus la Camargue, la protégeant des apports de sels par la mer mais la privant également des apports d'eau douce du Rhône. La culture non irriguée devint presque impossible à partir de la fin du XIX^{ème} siècle : un important réseau de canaux d'irrigation et de drainage vit alors le jour, modifiant fortement le régime hydrologique du delta (Chauvelon, 1998).

Le Rhône

Le bras du grand Rhône charrie la plus grande partie des eaux et de leur charge solide. Il est relativement étroit à Arles (150 m) mais atteint 400 m de large près de son embouchure. La pente est très douce d'Arles à la mer (10 cm par km).

Le lit du Grand Rhône est généralement limoneux, plus rarement sableux. Il est constitué d'une succession de mouilles et de seuils (Fig. 23) lui conférant ainsi une profondeur variable (de 4 à 10 m en moyenne). Le Rhône est au contact direct des cailloutis au nord d'Arles et au seuil de Terrin (Fig. 23). Cependant, les cailloutis étant consolidés en poudingue dans ces secteurs, l'infiltration du Rhône doit être très limitée.

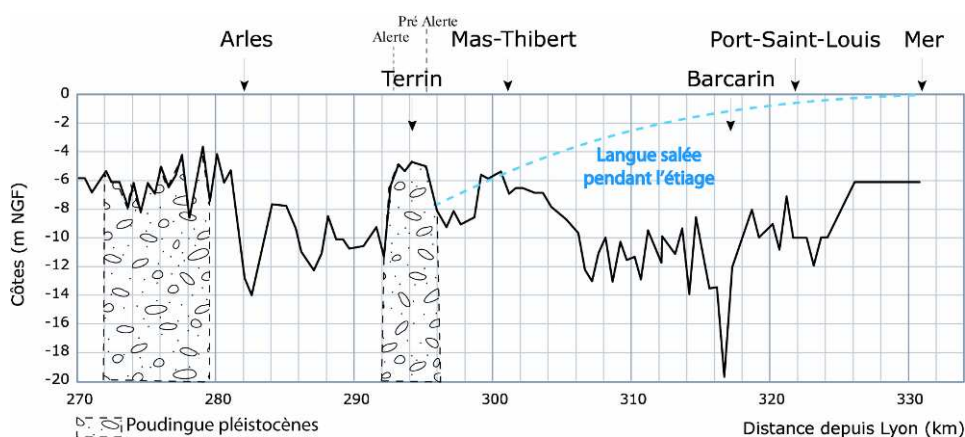


Fig. 23. Profil longitudinal du Grand Rhône d'Arles à Port St Louis (d'après les données de la CNR, dans Antonelli (2002); complété)

Le seuil de Terrin, à 10 km en aval d'Arles, constitue le plus haut fond de la portion amont du grand Rhône. Avant 1991, ce seuil remontait à -3.70 m NGF (Davey, 2005) et constituait une barrière naturelle au phénomène du coin salé (remontée d'une langue d'eau de mer dans le lit du fleuve). En 1991, il a fait l'objet d'un déroctage pour le passage de barges fluvio-maritimes, abaissant son niveau

à -4.75 m NGF et augmentant ainsi les risques de remontée du coin salé au-delà de ce seuil, en direction d'Arles. Actuellement, la remontée du coin salé fait l'objet d'un suivi régulier par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) avec la mise en place de stations de pré-alerte et d'alerte (seuil de Terrin). Marée haute, vent du Nord modéré et débit inférieur à 600 m³/s sont les conditions favorables à une remontée du coin salé au-delà de la station de pré-alerte (Davey, 2005).

Le régime hydrologique du Rhône présente en général deux maxima, en automne et au printemps, et une période d'étiage d'août à fin septembre. Le régime normal du fleuve à Beaucaire correspond à un débit compris entre 1000 et 3000 m³/s (débit moyen annuel de 1700 m³/s) ; le débit d'étiage est de l'ordre de 650 m³/s (VCN10) et le débit de la crue décennale est de 8400 m³/s (Arnaud-Fassetta, 1998; Antonelli, 2002).

Pendant la période étudiée, les débits moyens journaliers du Rhône ont été relativement faibles (Fig. 24) avec des valeurs moyennes maximales ne dépassant pas les hautes eaux ($Q < 3500$ m³/s) ou les crues moyennes (3500 m³/s $< Q < 5000$ m³/s) et de très basses eaux notamment en juillet-août 2005 et octobre- novembre 2007 ($Q < 500$ m³/s).

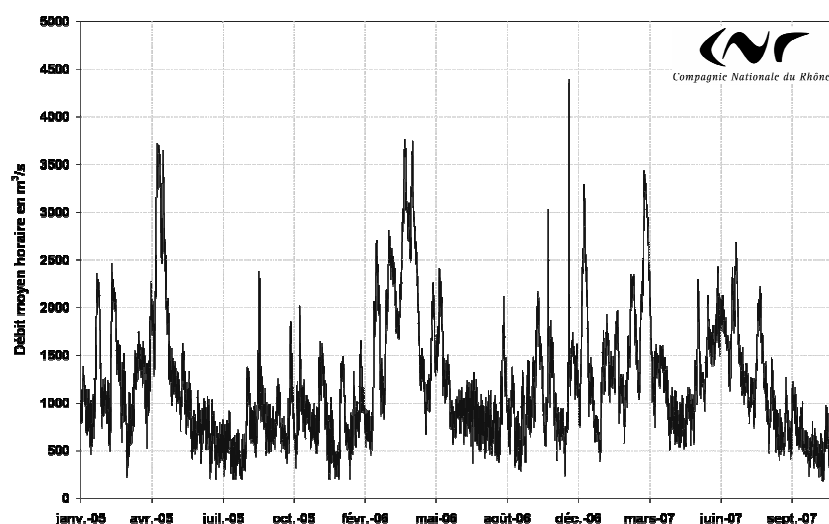


Fig. 24. Débits moyens journaliers du Rhône à Arles entre janvier 2005 et décembre 2007 (données de la CNR)

Le Petit Rhône a un débit très réduit par rapport à celui du Grand Rhône (de l'ordre de 1/10). Sa pente est légèrement plus faible que celle du Grand Rhône (9 cm par km) et son lit a une profondeur moyenne de 3 à 6 m.

Les canaux

Il n'existe aucun cours d'eau naturel dans le territoire compris entre les deux bras du Rhône. Le développement des cultures, et plus particulièrement l'essor de la riziculture après la guerre, a nécessité la mise en place d'un aménagement hydraulique important dans l'île de grande Camargue. Un réseau de canaux d'irrigation apporte l'eau pompée dans le Rhône aux cultures puis des canaux de

drainage évacuent les eaux de colatures vers le Rhône ou le Vaccarès. Plusieurs anciens cours du Rhône ont, à ce titre, été aménagés en roubine (St Féréol, Ulmet et Albaron).

Le Vaccarès et les étangs

Le Vaccarès, étang principal de la Camargue, est essentiellement alimenté par les eaux de drainage des rizières (canaux de Fumemorte et de Roquemaure principalement). L'évacuation des eaux du Vaccarès vers la mer se fait via les étangs inférieurs (nette surcharge hydraulique du Vaccarès (Chauvelon *et al.*, 2003)) au travers d'une unique écluse (pertuis de la Fourcade) entièrement contrôlée par la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ce drainage gravitaire reste cependant tributaire des conditions éolio-marines. Ainsi, des précipitations intenses associées à des niveaux marins élevés limitent le drainage gravitaire des étangs et peuvent ainsi conduire à des situations d'inondation.

La salinité du Vaccarès est à peu près constante dans l'année (~15 g/l) alors que la salinité des étangs inférieurs varie de 20 g/l en hiver à 50g/l en été (Réserve Nationale de Camargue, 2006).

Bilan hydrologique simplifié

Un bilan hydrologique simplifié de la Camargue peut être proposé. Les entrées du système sont les précipitations, l'irrigation et la mer ; les sorties correspondent à l'évapotranspiration, au drainage et aux sorties d'eau par les étangs. Les termes de ce bilan sont extrêmement variables d'une année à l'autre, fonction des aléas climatiques, des pratiques culturales, et de la gestion des pompes et des vannes qui contrôlent les échanges.

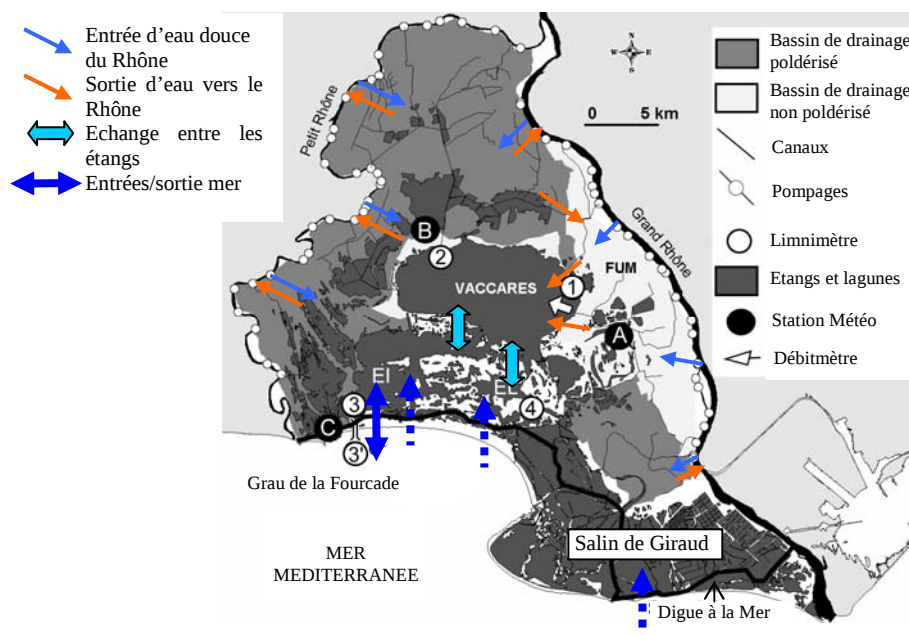


Fig. 25. Fonctionnement hydrologique simplifié des eaux de surface en Camargue (d'après Chauvelon *et al.* (2003) ; modifié)

Ces circulations de surface ont fait l'objet de nombreuses études depuis 1970 par la DDA des Bouches du Rhône puis par la station biologique de la Tour du Valat ou le Parc naturel régional de Camargue. Ces études ont permis, entre autres, l'établissement d'un modèle hydrodynamique du fonctionnement de l'hydrosystème de l'île de Camargue (Chauvelon *et al.*, 2003).

Si le réseau hydrologique superficiel est relativement bien connu, l'état des connaissances est bien moins avancé pour la circulation et la distribution des eaux en profondeur. Les eaux souterraines en Camargue se subdivisent en deux aquifères principaux superposés: un aquifère dit profond, situé dans les cailloutis plio-pléistocènes, objet de cette étude, et un aquifère superficiel situé dans les niveaux supérieurs des sédiments fins holocène du delta du Rhône.

II.3.2. L'aquifère superficiel

L'aquifère superficiel correspond aux dépôts continentaux modernes du delta. Il est limité en profondeur par des argiles, des limons et des lits de tourbes formant un niveau imperméable (aquitard) qui marque la séparation avec l'aquifère sous-jacent des cailloutis. Ces dépôts, de nature sableuse, limoneuse ou argileuse (cf. II.2.3. Edification holocène du delta du Rhône), ont une répartition non uniforme en surface comme en profondeur, liée à l'évolution récente du delta (déplacements de chenaux fluviaux, des marais saumâtres ou des étangs salés). La variabilité de la répartition et de la nature de ces sédiments provoque de fortes variations latérales et verticales de perméabilité qui induisent la nature lenticulaire et discontinue de cet aquifère.

Les travaux réalisés depuis 1970 permettent de dresser une synthèse des spécificités de l'aquifère superficiel et plus particulièrement de l'impact de l'irrigation et de la riziculture sur le régime des eaux de la nappe (Jean et Tony, 197x; Heurteaux, 1969; Godin, 1990; Cary, 2005).

Caractéristiques hydrogéologiques

La perméabilité des sols est faible dans l'ensemble (Marinos, 1969) mais présente une répartition fonction de la géomorphologie (Fig. 26) : les bourrelets alluviaux des chenaux du Rhône (anciens et actuels) présentent des perméabilités assez bonnes et renferment ainsi une nappe réelle alors que les marais constituent des bassins quasi imperméables où l'eau n'est retenue que sous la forme d'eau d'imbibition. Enfin, les dunes et cordons littoraux sableux de Basse Camargue présentent une bonne perméabilité mais contiennent une nappe limitée dont la « lentille » d'eau douce est souvent insignifiante (Marinos, 1969).

Près de la surface comme en profondeur, il n'existe donc de nappes véritables que dans la limite d'extension des dépôts sablo-limoneux des bras anciens et actuel du Rhône.

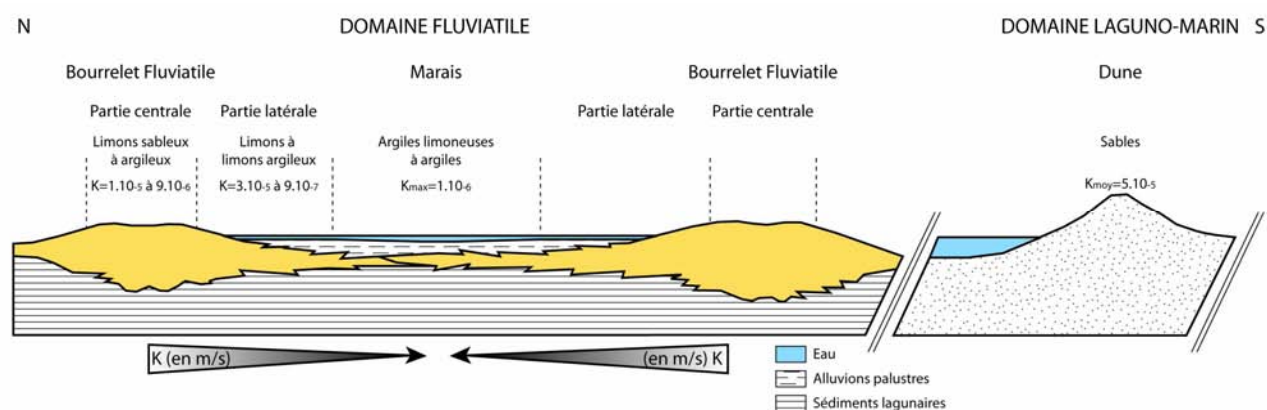


Fig. 26. Répartition latérale de la perméabilité des sol en fonction de la géomorphologie (morphologie d'après L'Homer (1975) ; modifié)

Alimentation

Les cartes de piézométrie et de salinité établies pour le rapport Camargue ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant de l'hydrologie et plus particulièrement de l'irrigation sur l'alimentation de la nappe (Marinos, 1969; Godin, 1990). Ainsi, les caractéristiques physiques et chimiques de l'aquifère sont étroitement liées à la position du réseau hydrographique. Plus particulièrement, la riziculture avec les volumes d'eau importants qu'elle nécessite, régit le régime des hautes eaux et des basses eaux dans les zones cultivées, indépendamment des conditions climatiques.

Enfin, le Rhône ne participe pas directement, en général, à l'alimentation de la nappe à cause de la mauvaise perméabilité des terrains et son influence se limiterait aux zones qui le bordent.

Morphologie et écoulements

La nappe est libre, captive à semi-captive en fonction de la perméabilité des terrains. Elle demeure très près de la surface, la rendant fortement dépendante des facteurs climatiques dans les zones non cultivées. Ses niveaux piézométriques sont au maximum à 2.5 m/NGF et bien souvent inférieurs au 0 m NGF (Marinos, 1969). La surface piézométrique de la nappe épouse assez étroitement la morphologie du terrain. Les courbes isopiézométriques, espacées dans les zones hautes des bourrelets, se resserrent dans les zones basses par diminution de la perméabilité. Ces caractéristiques confèrent à la nappe une forme cylindrique d'écoulement radial convergeant vers les zones basses. Les eaux de la nappe superficielle s'écoulent donc depuis les zones hautes irriguées, à meilleure perméabilité vers des bassins fermés localisés sous les marais. Dans les zones basses (parties externes des bourrelets, marais) la faible perméabilité des terrains entraîne des pertes de charges souvent très élevées rendant l'eau pratiquement stagnante (Marinos, 1969).

Salinité

Les piézomètres (Fig. 11), implantés par couple atteignant deux niveaux différents, mettent en évidence la superposition de lentilles d'eau douce centrées sur les bourrelets alluviaux, à des eaux présentant tous les intermédiaires de salinité jusqu'à celle de l'eau de mer, sans interface franche à cause de l'hétérogénéité des sédiments, du climat et des influences artificielles (Jean et Tony, 197x). Des lentilles d'eau sursalée, correspondant à des héritages sédimentaires, sont également présentes en profondeur (Jean, 1975). La répartition spatiale de la salinité dépend de la période de l'année :

(i) En période estivale, sur les parties hautes irriguées, l'eau douce surmonte des eaux saumâtres alors que les zones basses constituent des bassins soumis à des phénomènes évaporatoires intenses donnant lieu à la formation d'efflorescence saline en surface (Marinos, 1969)

(ii) En automne, les eaux à fortes salures des zones basses régressent en réponse aux précipitations alors que les eaux saumâtres s'étendent dans les zones hautes suite à l'arrêt de l'irrigation.

L'aquifère superficiel du delta est donc en grande partie salé. L'apport d'eau douce par l'irrigation dessale les terrains, ce qui conditionne l'utilisation des sols à des fins agricoles. Cependant, cette irrigation et les précipitations ne permettent de maintenir qu'une réserve en eau douce très limitée ne pouvant constituer une ressource exploitable suffisante pour l'adduction en eau potable. Elle n'est utilisée à cet effet que par quelques mas situés sur des bourrelets alluviaux (Notre Dame d'Amour par exemple).

II.3.3. L'aquitard

Fonctionnement

Il existe peu d'indications sur la partie plus profonde des sédiments holocènes au contact des cailloutis. En effet, les piézomètres implantés dans l'aquifère superficiel ont une longueur maximale de 7 m pour une épaisseur de sédiment de plus d'une trentaine de mètres dans la partie sud du delta (Fig. 27). Or, du fait de la nature et de la structure des dépôts (lentilles imbriquées ; 2.2.3.2. Structure et nature des dépôts postglaciaires), il est peu vraisemblable que le fonctionnement en profondeur corresponde à celui de l'aquifère en surface, ni que l'eau contenue dans les premiers mètres de l'aquifère soit en connexion hydraulique directe avec de l'eau plus en profondeur.

Importance et salinité des eaux en profondeur

Lors de l'exécution des sondages profonds en 1970, de faibles pompages ainsi que des mesures de salinité ont été réalisés par tranche de 3 m afin d'estimer l'importance de la nappe en profondeur (Fig. 27). Le pompage, d'une durée d'une heure, a été réalisé par soupapage avec un très faible débit pour ne pas influencer la salinité (Marinos, 1969).

La répartition des salinités en profondeur (Fig. 27) confirme la nature discontinue et lenticulaire de l'aquitard. Des eaux douces ou peu salées (<15 g/l) n'existent sur toute l'épaisseur qu'en Haute Camargue, près du Rhône (S₃, S₇, S₁₀) où les sols sont restés sous l'influence du fleuve depuis le dépôt du cailloutis. Les dépôts des 7 autres sondages présentent des salinités très variables. Les eaux douces des premiers mètres correspondent à l'aquifère superficiel « flottant » sur des eaux salées. La répartition de ces eaux salées reflète dans l'ensemble assez bien le cône des dépôts laguno-marins. Néanmoins, on constate, que la partie la plus profonde de l'aquitard, au contact des cailloutis, est toujours moins salée que les termes supérieurs ; les salinités les plus importantes (>35g/l) étant obtenues entre 9 et 15 m de profondeur. De manière plus précise, il ne ressort pas de lien clair entre le degré de salinité et la profondeur ou la nature des dépôts.

Pour la majeure partie des sondages, les termes supérieurs ont pu être vidés avec un faible pompage (flèches en tireté ; Fig. 27) démontrant des niveaux de mauvaise productivité. De même, les niveaux salés du S₈ et du S₉ ont pu être vidés ce qui indique une faible réserve de ces dépôts salés.

Enfin, concernant d'éventuelles circulations, Marinos (1969) indique que « la nappe phréatique n'ayant pas non plus en profondeur d'exutoire latéral possible doit demeurer pratiquement immobile ».

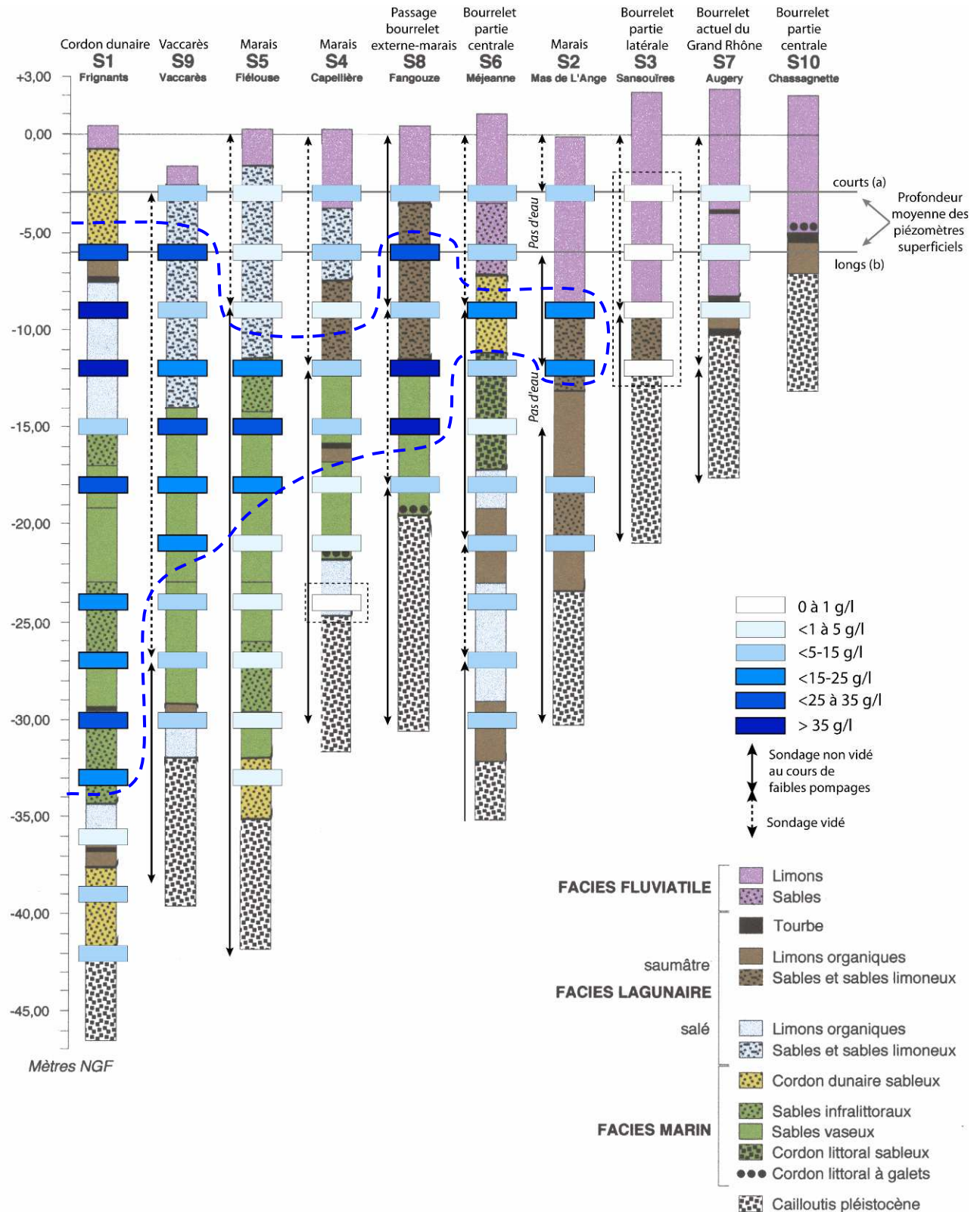


Fig. 27. Répartition des salinités de l'aquifère superficiel obtenues lors du forage des sondages profonds. La profondeur moyenne des piézomètres superficiels a également été reportée (Arnaud-Fassetta, 1998; modifié).

II.3.4. L'aquifère des Cailloutis

II.3.4.1. En Crau : la partie libre de l'aquifère des cailloutis

D'une superficie de 520 km², l'aquifère de Crau correspond à la zone d'affleurement des cailloutis plio-pléistocènes (cf. II.2.2. Les cailloutis plio-pléistocènes) située dans le triangle Arles/Lamanon/Fos-sur-Mer. Cette vaste étendue caillouteuse se caractérise par l'absence de réseau hydrographique en surface. De la même manière qu'en Camargue, les terres caillouteuses et stériles du nord de la Crau ont été mises en culture (foin, arboriculture, cultures maraîchères) grâce à un important réseau de canaux d'irrigation apportant de l'eau provenant cette fois de la Durance. La partie aval de la Crau, « Crau sèche », a gardé son aspect de steppe originel (coussoul). A l'extrême sud, un imposant complexe industrialo-portuaire occupe les bords de la mer et de l'étang de Berre (Port autonome de Marseille, raffinerie, stockage de carburant, industries chimiques et métallurgiques).

Caractéristiques hydrogéologiques

Le substratum de l'aquifère est constitué par les argiles et les marnes gréseuses du Pliocène (Astien-Plaisancien ; cf Contexte géologique p 30) dans sa partie aval et par le Miocène marneux ou argilo-sableux à l'amont. Le réservoir, de 10 à 30 m d'épaisseur, contient une nappe libre dans sa partie amont puis captive sous le recouvrement holocène en bordure est du Rhône (limons argileux du grand Plan du Bourg). Au contact de ces formations imperméables, une succession de marais constituent la ligne d'émergence de la nappe : « les Laurons ».

Pour l'ensemble de la nappe, les perméabilités sont bonnes, s'échelonnant de 10⁻² à 10⁻⁴ m/s (transmissivités en général comprises entre 5.10⁻³ m²/s et 5.10⁻¹ m²/s ; d'après la carte hydrogéologique d'Istres-Eyguières). Le coefficient d'emménagement varie de 1.10⁻² à 6.5.10⁻² avec des valeurs plus élevées pour les cailloutis würmiens récents (Crau de Miramas ; cf. p 33). Les cailloutis villafranchiens présenteraient donc une porosité efficace plus faible.

Alimentation

La recharge de la nappe de la Crau se fait principalement par infiltrations des eaux d'irrigation provenant de la Durance ; ce mode de recharge représente ~2/3 de l'alimentation de la nappe tandis que la pluviométrie ne participe que pour ~1/3. Cette recharge n'est pas répartie uniformément puisque l'essentiel des irrigations a lieu dans la partie nord.

Une ligne de partage des eaux souterraines sépare la nappe en 2 sous bassins qui correspondent aux entités géologiques de la Vieille et de la Jeune Crau (cf. p 32). Les écoulements se font selon 3 axes préférentiels depuis Salon et le Col de Lamanon au Nord-Est (isohydrohypes entre +60 et 100 m) en direction des marais au Sud-Ouest qui constituent une limite de potentiel (entre 1 et 0 m ; Fig. 28).

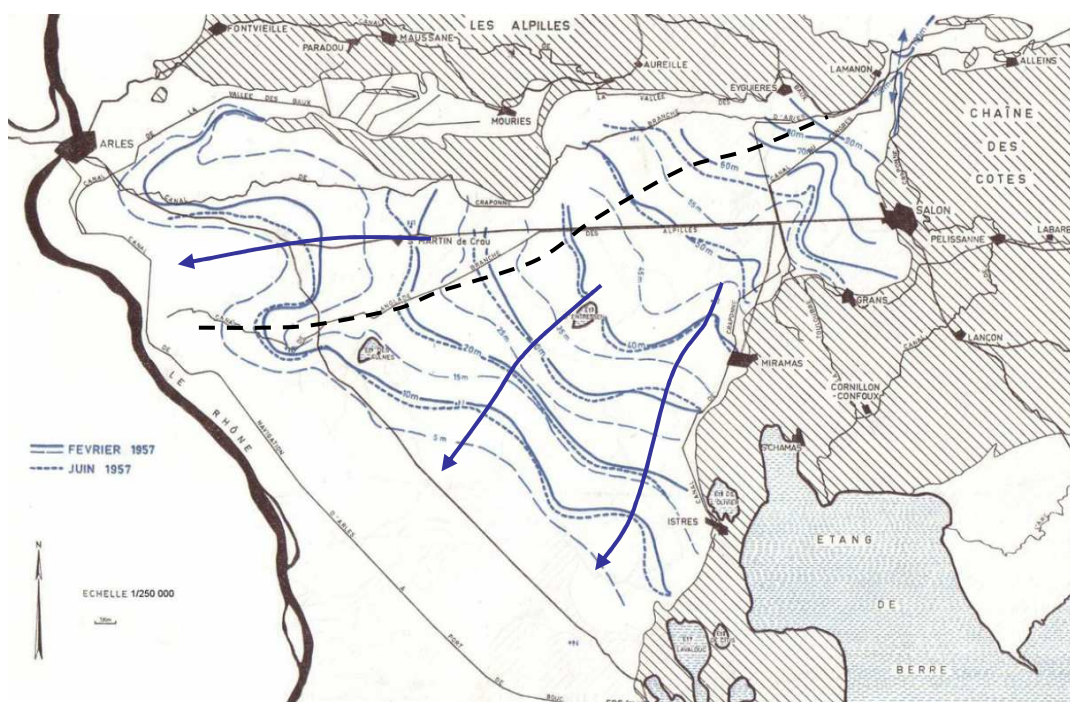


Fig. 28. Surface piézométrique de la nappe de la Crau (CERH, 1965; modifié)

Dans la partie nord, les irrigations contrôlent le régime piézométrique de la nappe, avec des hautes eaux après la période d'irrigation (fin d'été) et des basses eaux en hiver. Au Sud-Ouest de la nappe, en aval de la zone de Marais (Basse Crau), l'aquifère est en contact avec la mer au travers d'un « biseau salé ».

Les travaux d'aménagement du complexe industriel et portuaire de Fos-sur-Mer entre 1969 et 1972 ont profondément modifié les conditions naturelles à proximité de la côte, avec en particulier la construction (i) de darses qui constituent des avancées maritimes à l'intérieure des terres creusées dans les cailloutis et (ii) d'une tranchée drainante mise en service en 1972. Ce dernier ouvrage long de 5 km est construit perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe dans le but :

- d'évacuer les hautes eaux de la nappe pour éviter les variations de pression sous la plate-forme industrielle,
- d'empêcher la remontée du biseau salé en maintenant le niveau d'eau douce à une cote de sécurité de +1.20 m NGF.

Qualité et utilisation de la ressource

La nappe des cailloutis de Crau assure une ressource abondante et de qualité (Agence de l'eau RMC, 2007). Les eaux sont bicarbonatées calciques, pauvres en chlorures et de composition proche de celle des eaux de la Durance à l'exception de la Basse Crau où la présence du biseau salé entraîne une augmentation de la salinité. Néanmoins, le toit de la nappe tend à s'aplatir dans la partie aval, ce qui indique une dynamique d'écoulement en régression (CERIC HORIZON, 1993; Conrad, 1994). Cette diminution des écoulements souterrains est en relation avec l'accroissement des prélèvements

industriels ou urbains mais aussi avec le développement de l'arboriculture fruitière dans la Crau sèche. Les prélèvements pour l'agriculture se font par pompage dans la nappe sans restitution ce qui représente une ponction globale de l'ordre de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Conrad, 1994). La tendance à l'abaissement de la nappe sur le secteur des vergers a été confirmée par des mesures récentes de niveaux piézométriques ($-1 \text{ m} / \text{sol}$; ANTEA, campagne d'août 2000, dans Agence de l'eau RMC, 2007). Néanmoins selon ANTEA, de manière globale, les prélèvements seraient nettement inférieurs aux apports par l'irrigation.

La qualité et la quantité de la ressource en Crau résultent donc d'un équilibre fragile entre les prélèvements et l'irrigation. La mauvaise répartition entre les prélèvements (au Sud et Sud-Ouest) et les apports (plus au Nord) a une influence importante sur la position et l'étendue de la zone de transition eau douce/eau de mer dans la nappe.

II.3.4.2. En Camargue : la partie captive de l'aquifère des cailloutis

Si en Camargue, l'aquifère superficiel a fait l'objet de nombreux travaux, il n'en est pas de même pour l'aquifère captif des cailloutis et les données préexistantes à ce travail sont plus restreintes. Les principales informations proviennent des années 70 (Marinos, 1969; DDA des Bouches du Rhône, 1970; Griolet, 1972; Griolet, 1976) et de 2 mémoires de DEA plus récents (Ambrosy, 2003; Paul, 2004).

Caractéristiques hydrogéologiques

Les deux faciès principaux mis en évidence par la lithologie (Jeune Crau-cailloutis gris/Vieille Crau-cailloutis jaunes ; p 33) présentent des perméabilités différentes. Les cailloutis gris ont une meilleure perméabilité (jusqu'à $10^{-3} - 10^{-2} \text{ m/s}$; Marinos(1969)) que les cailloutis jaunes qui présentent des passées de poudingue en Haute Camargue près du Grand Rhône ($K = 10^{-5} \text{ m/s}$ au niveau de Augery (S_7) ; Marinos (1969)). La nappe est partout sous pression. Elle est artésienne temporairement au Nord de la Camargue (Sud du Petit Rhône ; Griolet (1972)) et de manière permanente au Nord du Vaccarès (S_2). Néanmoins, le débit d'artésianisme reste faible de l'ordre de 0.2 l/s (Marinos, 1969).

Alimentation

L'alimentation de l'aquifère captif est à rechercher dans les zones limitrophes présentant une continuité géologique avec le cailloutis de Camargue : la Crau à l'Est et la plaine de Beaucaire au Nord. A l'Ouest du delta, l'accident de Beaucaire-St-Gilles mettant en contact les cailloutis de Camargue avec le soubassement pliocène imperméable de la Costière, l'hypothèse d'une alimentation par la Costière a donc souvent été écartée. L'alimentation de l'aquifère captif a cependant fait l'objet de nombreuses controverses :

- Marinos (1969), en se basant sur (i) le sens des écoulements des cartes piézométriques de ces régions (écoulement préférentiel vers le Golfe de Fos pour la Crau et en bordure de la Costière pour la plaine de Beaucaire) ainsi que (ii) sur des mesures de tritium positives dans les zones d'alimentation potentielles et inférieures au seuil de détection en Camargue, conclut que « la nappe captive de Camargue serait une nappe fossile, sans alimentation par le Rhône, la Crau ou la nappe de Beaucaire ». Il note cependant que « des relations aquifères doivent exister avec la Crau si l'on veut expliquer la charge de la nappe, mais sans manifestation de circulation ». De plus, selon lui, même si des communications éventuelles peuvent exister avec l'aquifère superficiel, ce dernier ne peut constituer une réelle source d'alimentation pour l'aquifère des cailloutis.

- Dans un premier temps, en 1972, Griolet ne remet pas en question ces conclusions (même s'il suggère une alimentation par drainance à partir de l'aquifère superficiel), puis il indique en 1976 que l'essentiel de l'alimentation de la nappe se fait en amont de la séparation du Rhône en 2 bras par infiltration dans le lit du fleuve mais qu'il existe également une alimentation latérale par la Crau.

- Le Rapport Camargue, à l'aide de profils de résistivités, a mis en évidence une limite eau saumâtre/eau salée extrapolée pour le nord du Vaccarès (Fig. 29). Cette limite affectant le même dessin que celui du cours du Grand Rhône, indiquerait, d'après ce rapport, une alimentation par le Rhône au Nord Est du Vaccarès.

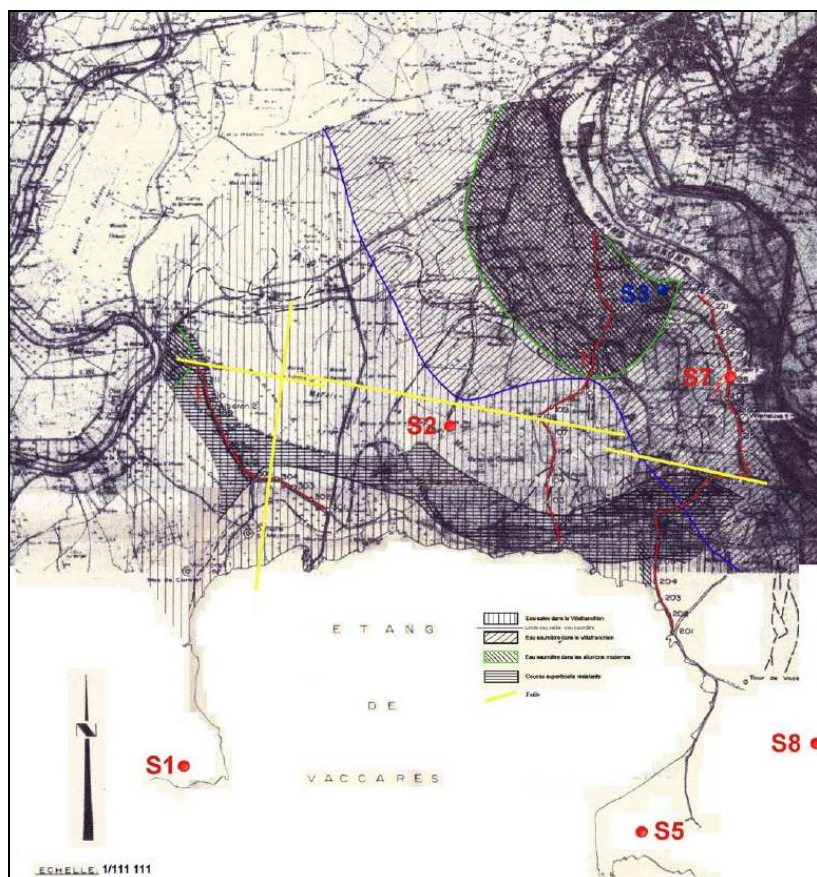


Fig. 29. Limite eau salée/eau saumâtre (en bleu) en haute Camargue (dans DDA des Bouches du Rhône, 1970; Ambrosy, 2003)

Cependant, la comparaison de cette limite avec les isohypses du toit des cailloutis montre que l'avancée salée correspond également à une paléo-vallée du toit des cailloutis à la faveur de laquelle l'eau salée aurait pu préférentiellement remonter. Cette limite suit également le tracé des isopièzes de la nappe de la Crau. Ainsi, le « dessin » de la limite salée/saumâtre ne pourrait correspondre au tracé du Rhône que de manière fortuite. Cet argument semble donc difficilement exploitable.

- Plus récemment, à l'aide d'études hydrochimiques et isotopiques, Ambrosy (2003) réaffirme l'alimentation lente par le Rhône au Nord-Est mais indique également une alimentation localisée plus rapide au niveau du sondage S₁. Il conclut également sur une origine fossile de la nappe et réfute le contact avec l'eau de mer actuelle. Ainsi, les eaux salées auraient une origine lagunaire et dateraient de la mise en place des cailloutis.

- En revanche, Paul (2004) suggère une intrusion marine actuelle, l'eau de mer pénétrant sous forme d'un biseau salé jusqu'au nord de l'étang du Vaccarès, avec éventuellement la présence d'un troisième pôle correspondant à une eau fossile.

Morphologie et écoulement

L'écoulement se fait en direction du Sud-Ouest avec un gradient faible (Fig. 30).

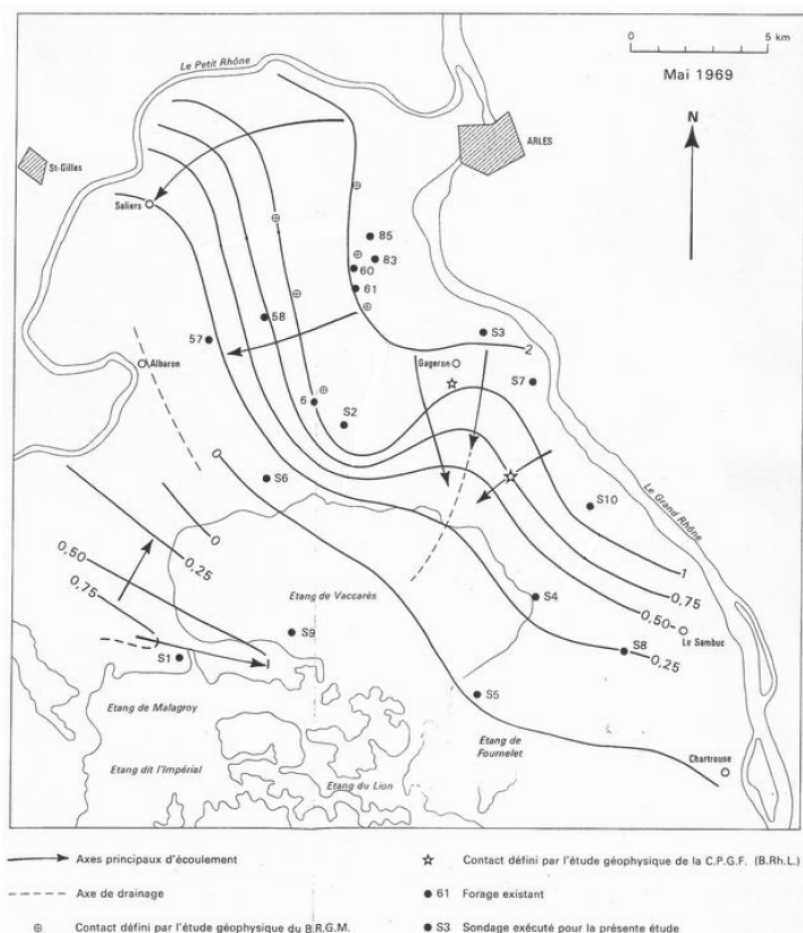


Fig. 30. Représentation schématique de la surface piézométrique de la nappe des cailloutis en mai 1969 (dans L'Homer *et al.* (1987) ; modifié)

Salinité

Dans les années 70, la salinité de l'aquifère captif était de 2 g/l en moyenne (sur 13 points de mesure) avec des salinités inférieures au Nord Est du delta (~0.5 g/l) et supérieures pour les piézomètres S₆, S₉, S₁₀ à 12 g/l et S₈ à 28 g/l. Marinos (1969) mentionne de plus l'existence d'un forage très salé en Basse Camargue à proximité du grand Rhône, et d'un forage de salinité supérieure à 10 g/l aux Saintes-Marie de la Mer. La salinité montre une grande stabilité saisonnière (Marinos, 1969; Griolet, 1972).

La salinité a depuis fortement évolué et les piézomètre S₁ et S₅, de salinité inférieure à 2 g/l dans les années 70, présentent maintenant des valeurs de salinités importantes (Fig. 31).

Relation entre l'aquifère superficiel et l'aquifère captif des cailloutis

Marinos (1969) note que la descente des eaux vers la nappe du cailloutis doit être très peu importante à cause de la faible perméabilité du sol et souvent de la grande épaisseur à traverser. De plus, les quantités d'eau susceptibles de s'infiltrer sont très peu importantes. Cependant, d'après Griolet (1976), la structure en lentille des dépôts récents et la discontinuité des niveaux de tourbe ne s'opposent pas à l'idée d'une possible communication entre les deux aquifères. La variation verticale de salinité dans l'aquifère des cailloutis relevée pour certains sondages (S₂ et S₃) pourrait être un indice de ces infiltrations. L'absence de tritium dans l'aquifère des cailloutis pourrait alors indiquer un très faible écoulement de la nappe superficielle. Enfin, l'auteur note qu'il est possible que ces communications, si elles existent, « n'affectent pas l'individualité de chaque aquifère ».

Néanmoins, en 1970, les salinités les plus importantes (> 35 g/l) sont obtenues entre 9 et 15 m de profondeur tandis que la partie la plus profonde de l'aquifère superficiel, au contact des cailloutis, était moins salée que les termes supérieurs, ce qui pourrait témoigner d'une drainance ascendante (Manzano *et al.*, 1990). De plus, les niveaux salés du S₈ et du S₉ ont pu être vidés par pompage dénotant une faible productivité. Enfin, contrairement à l'aquifère superficiel, la salinité de l'aquifère des cailloutis présente une grande stabilité saisonnière. Il semble donc peu probable que l'aquifère superficiel soit la source de la salinité observée actuellement dans l'aquifère des cailloutis.

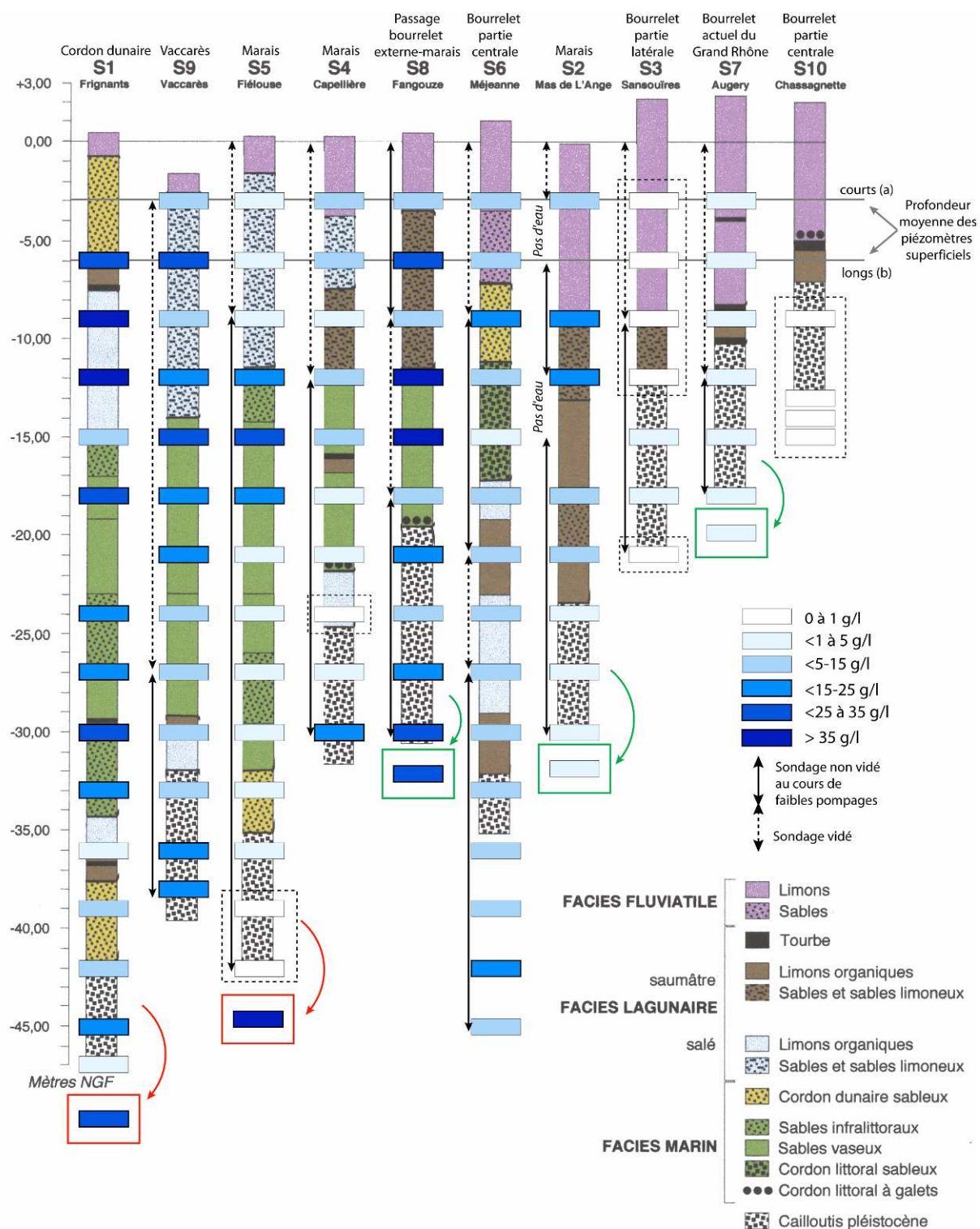


Fig. 31. Répartitions des salinités dans l'aquifère captif des cailloutis en fonction de la salinité des dépôts sus-jacents (d'après Arnaud-Fassetta, 1998; modifié). Les valeurs actuelles dans le cailloutis ont également été ajoutées lorsqu'elles étaient disponibles. Les forages pour lesquels la salinité a varié de manière importante par rapport à 1970 sont indiqués en rouge.

II.3.5. Apports récents de la géochimie

- Des travaux récents portant sur les pesticides en Camargue ont révélé la présence dans les eaux de surface de pesticides spécifiques de la riziculture et de leurs dérivés de dégradation à 90% mais également des eaux du Rhône à 10%. La variabilité temporelle des concentrations en pesticides se caractérise par deux pics de pollution majeure en avril et en juin.

- Dans l'aquifère superficiel, les analyses isotopiques (^{18}O , ^2H), réalisées par Ambrosy (2003) et Paul (2004) ont mis en évidence (i) l'importance des eaux douces rhodaniennes dans l'alimentation de l'aquifère superficiel (via l'irrigation) et (ii) l'influence de l'évaporation sur les eaux les plus salées. Les analyses chimiques confirment la répartition de la salinité en fonction de la géomorphologie, avec des eaux de type bicarbonaté calcique rhodanien dans les zones hautes (partie centrale des bourrelets) évoluant vers des eaux chlorurées sodiques marines dans les zones basses.

Compte tenu de la répartition des zones hautes principalement en Haute-Camargue, on observe globalement un gradient de salinité du nord au sud du delta. Dans le détail, la minéralisation de la nappe superficielle dépend de la position du réseau de surface et des parcelles irriguées. Dans les zones non irriguées (zones de marais) la nappe est principalement influencée par l'évaporation donnant lieu à des salinités élevées ($> 100 \text{ g/l}$). Ces eaux sont de plus caractérisées par des fortes teneurs en HCO_3^- , et faibles en K^+ et SO_4^{2-} . Les processus d'évolution géochimique de ces eaux n'ont pas été déterminés précisément.

Enfin, des travaux sur les pesticides (Comoretto *et al.*, 2007) ont révélé une contamination de la nappe superficielle très élevée et quasi-permanente à la Bentazone confirmant l'influence du réseau de surface dans l'alimentation de la nappe superficielle. Le niveau de contamination est non conforme aux exigences de potabilité et de potabilisation (PNR Camargue, 200X).

- Dans l'aquifère captif, l'analyse des isotopes de la molécule d'eau (Ambrosy, 2003; Paul, 2004) a montré (i) l'existence d'un mélange entre de l'eau d'influence marine et de l'eau douce rhodanienne, (ii) une stabilité temporelle des teneurs isotopiques. Les analyses chimiques ont mis en évidence de faibles teneurs en SO_4^{2-} , et fortes en Ca^{2+} et HCO_3^- par rapport à l'eau de mer. Les processus d'évolution géochimique de ces ions n'ont pas été déterminés précisément.

CONCLUSION DE LA PARTIE 1

L'étude géologique a montré la présence dans le delta de dépôts de cailloutis de nature différente :

- au nord, des dépôts de cailloutis principalement calcaires fortement altérés et peu perméables,
- au sud, des cailloutis à dominante calcaire mais plus diversifiés, peu altérés et plus perméables.

La nature différente de ces dépôts peut avoir un impact sur la minéralisation de l'aquifère captif et sur les connexions hydrauliques (différence de perméabilité).

Pendant la transgression marine holocène, les cailloutis ont été recouverts à différentes époques de marais saumâtres à salés. Au sud du Vaccarès, les nombreux dépôts de tourbe témoignent d'arrêts prolongés du niveau marin pendant la transgression holocène. D'après la faune marine retrouvée au S₈, la salinité de ce dernier pourrait être héritée et pourrait provenir soit d'un remaniement des cailloutis par la mer soit d'un dépôt des cailloutis en milieu marin dans cette zone (Marinos, 1969). De plus d'après la carte piézométrique de cette époque, ce point ne semble pas être situé dans un axe d'écoulement préférentiel ce qui pourrait expliquer la conservation de cette salinité. Au S₁ la paléo-vallée du toit des cailloutis aurait permis une intrusion plus lointaine de la mer que sur le plateau incliné de la partie Est (aggradation plus prononcée).

L'étude des différents systèmes hydrogéologiques a permis de préciser les relations avec l'aquifère des cailloutis.

- Il existe une connexion directe entre le Rhône et l'aquifère captif des cailloutis au nord d'Arles et au seuil de Terrin (au niveau du piézomètre S₇). Cependant, les cailloutis étant consolidés en poudingue dans ces secteurs, l'alimentation par le Rhône doit être très faible.

- La carte piézométrique de l'aquifère de Crau montre très nettement un écoulement en direction de la nappe captive. Malgré une zone de débordement au niveau des marais du Rhône, il est très vraisemblable qu'une partie des écoulements se prolongent dans l'aquifère captif. Dans ce cas, la dynamique d'écoulement en régression constatée pour l'aquifère de Crau peut avoir des répercussions sur l'aquifère captif.

- La nappe superficielle est de faible extension et contient une nappe principalement limitée aux zones d'extension des dépôts sablo-limoneux des bras anciens et actuels du Rhône. La géomorphologie et donc l'histoire géologique conditionnent les écoulements de l'aquifère superficiel. Cette nappe demeure très près de la surface, et subit des phénomènes d'évaporation intense dans les

zones non irriguées induisant l'existence d'eaux sursalées par rapport à la mer. Des phénomènes de drainance de l'aquifère superficiel vers l'aquifère captif semblent peu plausibles en particulier pour les zones salées de l'aquifère superficiel.

- Dans les années 70, la partie la plus profonde de l'aquitard au contact des cailloutis était moins salée que les termes supérieurs, en particulier au piézomètre S₁ et S₅, ce qui pourrait témoigner d'une drainance ascendante d'eau douce contenue dans l'aquifère des cailloutis. Une répartition similaire de la salinité a été observée sur l'aquitard du delta du Llobregat et interprétée de cette manière (Manzano *et al.*, 1990). Les dépôts salés semblent de plus contenir de faibles réserves.

- Enfin, la minéralisation de l'aquifère captif semble témoigner d'une influence marine mais avec une évolution particulière encore à préciser.

Les hypothèses concernant l'alimentation de l'aquifère captif, l'origine et l'évolution de sa minéralisation ainsi que ses conditions aux limites sont donc encore à préciser.

Dès les années 1970, les études hydrogéologiques menées par la DDA mentionnaient la faible qualité de l'eau de l'aquifère captif des cailloutis. Cependant, même si un forage présentait déjà de fortes salinités (S_8 ; Fig. 31), la salinité des deux forages les plus proches de la mer (S_1 et S_5) ne dépassait pas 2 g/l. Depuis 30 ans, la situation s'est fortement dégradée, et ces deux forages présentent maintenant les plus fortes salinités (38 g/l pour S_5 ; Fig. 31), ce qui soulève la question de l'origine de cette salinité et de la raison de cette augmentation.

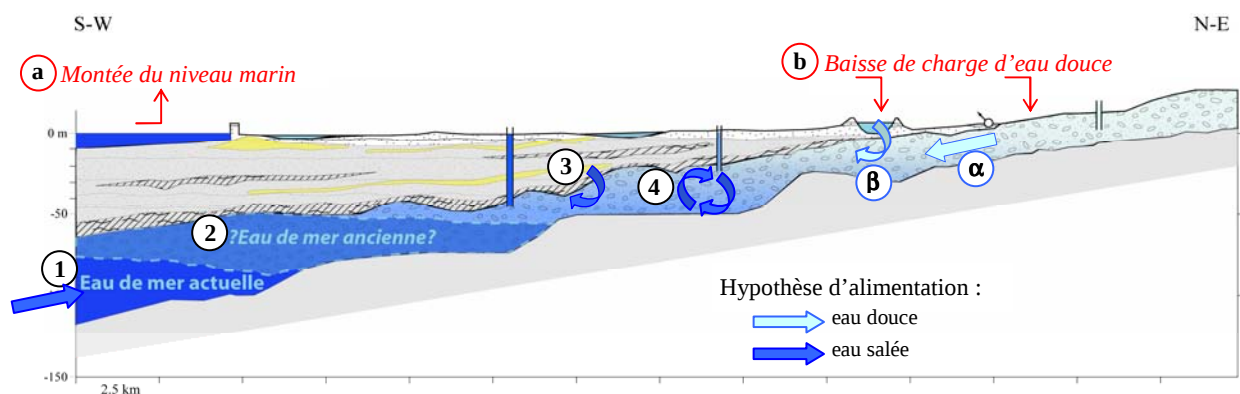


Fig. 32. Coupe schématique de l'aquifère des cailloutis présentant les hypothèses d'origine de la minéralisation

Ainsi, ce travail cherche à répondre à 3 questions principales, illustrées sur la Fig. 32 :

➤ (i) Comment s'explique la minéralisation de l'eau actuelle et quelle est l'origine de la salinité de l'aquifère profond ? La géologie n'ayant pas mentionnée la présence d'évaporites dans les formations, les hypothèses les plus probables de l'origine de la salinité sont :

- (1) une intrusion d'eau de mer « actuelle »

- (2) une avancée d'eau marine ancienne héritée de la dernière transgression marine poussée par effet piston par une intrusion d'eau de mer actuelle
- (3) des phénomènes de drainance descendante depuis l'aquitard
- (4) des interactions géochimiques avec la matrice et/ou l'aquitard

Les interactions géochimiques (4) ne sont pas directement liées aux conditions de charge dans l'aquifère et peuvent se surimposer aux 3 premiers processus qui correspondent à la rupture d'un équilibre préexistant entre la charge de l'aquifère et la charge de l'eau salée (marine et/ou de l'aquifère superficiel).

Rechercher les raisons de ce déséquilibre correspond à la deuxième question :

➤ (ii) Quelle est la raison de l'augmentation de salinité observée depuis les années 1970 ?
L'augmentation de la salinité indique une augmentation de la charge d'eau salée par rapport à celle d'eau douce. Deux cas sont possibles :

- (a) augmentation de la charge d'eau salée. Il s'agit dans ce cas d'évaluer si l'augmentation de salinité dans l'aquifère captif correspond à l'impact de la montée du niveau marin
- (b) baisse de la charge de l'aquifère par diminution de la recharge de la nappe. Il s'agit dans ce cas d'évaluer l'impacte de l'anthropisation du delta du Rhône sur la ressource en eau à la fois de surface (baisse des débits du Rhône, augmentation des prélèvements) et d'eau souterraine (augmentation des prélèvements dans la nappe de la Crau - *développement important des zones industrialo-portuaires et urbaines de Fos* ou baisse de la recharge - *diminution de l'agriculture irriguée ou baisse de la pluviométrie*).

Pour répondre à cette question il est donc primordial de rechercher :

- (iii) Quelle est la recharge de l'aquifère :
- (α) la partie libre de l'aquifère des cailloutis i.e. l'aquifère de Crau
 - (β) le Rhône.

Ainsi, à partir de l'exemple du delta du Rhône, cette étude cherche à apporter des éléments de réponse aux problématiques actuelles des zones côtières :

- Quels sont les impacts du changement climatique et plus particulièrement :
- de la montée du niveau marin sur les aquifères côtiers et deltaïques d'un point de vue qualitatif mais également quantitatif ?
 - du changement du régime pluviométrique sur la recharge d'eau douce des aquifères côtiers ?
- Quelles sont les conséquences de prélèvements importants dans les fleuves côtiers ou de détournements d'une partie de leur débit?
- Quelles sont les conséquences du développement important des zones industrielles, portuaires et urbaines sur la ressource en eau souterraine des aquifères côtiers et deltaïques d'un point de vue qualitatif et également quantitatif ?