

Document public
Accès différé

Identification des sites potentiels de stockage de CO₂ et première estimation des capacités **PROJET VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins - Tâche 5.2.**

Rapport final

BRGM/RP-64302-FR

Novembre 2012



Identification des sites potentiels de stockage de CO₂ et première estimation des capacités **PROJET VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins - Tâche 5.2.**

Rapport final

BRGM/RP-64302-FR

Novembre 2012

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Recherche VASCO

S. Grataloup, R. Couëffé, B. Tourlière

Avec la collaboration de

P. Le Thiez

Vérificateur :

Cas de co-traitance – se référer à
l'IM165 du rapport

Approbateur :

Cas de co-traitance – se référer à
l'IM165 du rapport

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978. *Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.*

Mots-clés : stockage géologique du CO₂, sélection de site, capacité de stockage, Synclinal de l'Arc, Crau, Camargue, domaine offshore de Marseille.

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

Grataloup S., Couëffé R., Tourlière B., Le Thiez P. (2012) – Identification des sites potentiels de stockage de CO₂ et première estimation des capacités. PROJET VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins - Tâche 5.2. Rapport final. BRGM/RP-64302-FR, 63 p., 8 fig., 9 tabl., 15 ann.



Identification des sites potentiels de stockage de CO₂ et première estimation des capacités

Identification of potential sites for CO₂ storage and first estimation of capacities

PROJET VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins - Tâche 5.2

Rapport final

Novembre 2012

Convention n° 11 04 C0001 par Pôle Risques

Coordination technique : Stéphanie Arnoux, Département Recherche et Technologies Avancées–
Direction Recherche et de la Prospective– ADEME (Angers)

Confidentialité : Confidentiel



L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Copyright

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

About ADEME :

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr

Copyright

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Note liminaire

Le présent rapport présente les résultats finaux des travaux menés sur l'identification, la sélection des sites potentiels pour le stockage géologique de CO₂ et les estimations de capacités de stockage pouvant leur être associées sur la période janvier 2012 – novembre 2012.

Le BRGM a fourni à Geogreen en juillet 2012 une liste préliminaire de sites et de capacités afin que Geogreen puisse réaliser les travaux de dimensionnement du réseau de transport du CO₂ (Tâche 7 du projet VASCO). Or, ces données sont différentes de celles qui sont exposées ci-après.

Cette différence s'explique par le fait que les résultats préliminaires transmis en juillet s'appuyaient sur une partie seulement des résultats et analyses des données à disposition. En effet, à cette époque, la tâche 5.1 n'était pas encore achevée et le cours normal d'avancement de la tâche 5.2 ne disposait pas encore de l'ensemble des éléments (cartes d'isopaques, analyses des anomalies gravimétriques, analyses des données de forages...) qui ont par la suite conduit à élaborer les conclusions du présent rapport. De plus, à cette époque, les questions de sélection de sites et de calcul de capacités n'avaient pas encore été abordées.

Les sites, les estimations de paramètres associés et les capacités de stockage produits en juillet correspondent donc à une version provisoire et diffèrent des résultats finaux exposés dans le présent rapport. En revanche, les principes et les méthodologies employées sont restées les mêmes – à l'exception de la présentation des paramètres et capacités de stockage sous forme de triplets « P10, P50, P90 » dans le présent document.

Après vérification par Geogreen, les sites potentiels de stockage identifiés dans ce travail ne remettent pas en cause le dimensionnement du réseau de transport réalisé dans la Tâche 7.

Sommaire

NOTE LIMINAIRE	3
TABLE DES FIGURES	5
TABLE DES TABLEAUX.....	5
RESUME	6
ABSTRACT	7
INTRODUCTION	8
1 SELECTION DE ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES AU STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO₂.....	10
1.1 QUELQUES PRINCIPES DE LA SELECTION DE SITE.....	10
1.2 CRITERES DE SELECTION ET IDENTIFICATION DES SITES.....	11
1.2.1 <i>Type de stockage géologique possible et critères pris en compte pour l'identification de sites potentiellement favorables.....</i>	<i>11</i>
1.2.2 <i>Salinité et chimie des eaux des formations cibles.....</i>	<i>11</i>
1.2.3 <i>Identification de structures géométriques favorables au stockage au niveau des formations cibles</i>	<i>15</i>
1.2.4 <i>Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations cibles est favorable</i>	<i>19</i>
1.2.5 <i>Identification des sites favorables au stockage : étanchéité des structures.....</i>	<i>21</i>
1.2.6 <i>Prise en compte de critères de qualification de sites.....</i>	<i>23</i>
2 ESTIMATION DES CAPACITES DE STOCKAGE DES SITES POTENTIELLEMENT FAVORABLES AU STOCKAGE DE CO₂.....	26
2.1 METHODOLOGIE DE CALCUL DE LA CAPACITE DE STOCKAGE D'UN SITE EN AQUIFERE SALIN	26
2.2 PROPRIETES PETROPHYSIQUES DES COUCHES CIBLES.....	29
2.2.1 <i>Inventaire des données pétrophysiques disponibles</i>	<i>29</i>
2.2.2 <i>Evaluation des propriétés pétrophysiques des couches cibles</i>	<i>33</i>
2.3 EVALUATION DES CAPACITES DE STOCKAGE DES SITES POTENTIELS IDENTIFIES	34
3 PERSPECTIVES POUR DES ETUDES COMPLEMENTAIRES	38
CONCLUSION	39
BIBLIOGRAPHIE	40
ANNEXES.....	42

Table des figures

Figure 1 : Localisation des données de salinité répertoriées	14
Figure 2 : Principales structures géologiques résultant des déformations pyrénéo-provençales et de l'extension oligo-aquitaine, visibles à l'affleurement ou supposées sous couverture cénozoïque en Camargue et en Provence (Paragraphe 5.3, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012).....	17
Figure 3 : Délimitation des zones où les formations réservoirs présentent une géométrie favorable. Fond : Carte du gradient vertical des anomalies de Bouguer (BRGM, 2012)	18
Figure 4 : Comparaison des contours des sites identifiés avec les épaisseurs de recouvrement tertiaire et quaternaire	24
Figure 5 : Comparaison des contours des sites identifiés avec le zonage sismique de la France	25
Figure 6 : Pyramide techno-économique des capacités de stockage en CO ₂ (Bachu et al., 2007 ;CSLF, 2007)	26
Figure 7 : Carte de position des forages disposant d'informations sur les propriétés réservoir pour le Crétacé inférieur (ANNEXE 11, ANNEXE 12).....	31
Figure 8 : Carte de position des forages disposant d'informations sur les propriétés réservoir pour le jurassique supérieur (ANNEXE 13, ANNEXE 14)	32

Table des tableaux

Tableau 1 : En-têtes des tableaux compilant les données d'analyses chimiques des eaux pour les formations cibles (ANNEXE 7 et ANNEXE 8).....	12
Tableau 2 : Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations réservoir est favorable - structures de horst.	20
Tableau 3 : Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations réservoir est favorable - structures anticlinales.....	21
Tableau 4 : P10, P50 et P90 du coefficient d'efficacité (E_E) pour différentes lithologies et l'échelle de la formation géologique (Gorecki et al. dans IEA GHG, 2009)	29
Tableau 5 : En-têtes des tableaux compilant les données pétrophysiques quantitatives pour les formations cibles (ANNEXE 11, ANNEXE 13)	30
Tableau 6 : En-têtes des tableaux compilant les données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations cibles (ANNEXE 12, ANNEXE 14)	30
Tableau 7 : P10, P50 et P90 du coefficient d'efficacité calculés pour les sites identifiés	34
Tableau 8 : Paramètres de calcul et résultats des estimations de capacités de stockage dans le cas de base pour les sites potentiels.....	36
Tableau 9 : Paramètres de calcul et résultats des estimations de capacités de stockage dans le cas « optimiste » pour les sites potentiels	37

RESUME

Le projet VASCO, « Valorisation et Stockage du CO₂ », a pour objectifs d'étudier les opportunités de réduction et de valorisation des émissions de CO₂ sur la zone de Fos-Berre-Beaucaire-Gardanne. Le stockage géologique constitue l'une des quatre voies étudiées à l'horizon 2030.

Dans le cadre de VASCO, l'étude du stockage géologique du CO₂ vise à caractériser les formations géologiques du sous-sol de manière à identifier, au sein de deux formations cibles (formations carbonatées du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur), les zones favorables au stockage et d'apporter des premières estimations de capacités de stockage. Cette étude est menée sur quatre domaines géographiques proches de Fos-sur-Mer : la Crau, la partie occidentale du vaste synclinal de l'Arc, la Camargue et le domaine offshore au large de Fos-sur-Mer et Marseille.

L'objectif de la présente tâche était d'identifier les zones favorables au stockage géologique du CO₂ dans l'emprise de la zone d'étude et pour les deux formations cibles considérées et d'estimer des premières capacités de stockage au sein de ces sites.

La prise en compte et la combinaison de critères de sélection relatifs à la salinité des aquifères cibles, la géométrie des couches cibles et la présence ou non de couverture efficace a permis d'identifier quatre sites favorables au stockage géologique de CO₂. La synthèse structurale issue de la tâche 5.1 a entre autre permis de mettre en évidence que deux types de structures sont favorables au stockage : les horsts, structures liées à un régime extensif et les anticlinaux sur rampe, liées à des épisodes compressifs.

Grâce aux données disponibles (données de forages, de sismique, de gravimétrie), les caractéristiques majeures de chaque site ont pu être décrites, qualitativement et quantitativement. Des premières estimations de capacités de stockage ont enfin pu être calculées grâce à ces estimations de paramètres. Elles montrent des capacités de stockage réelles dans la zone d'étude mais le processus de calcul a aussi démontré la nécessité de disposer de paramètres plus précis sur les formations et les sites potentiels pour être en mesure de fournir des estimations de capacité plus fiables.

Mot clés : stockage géologique du CO₂, sélection de site, capacité de stockage, Synclinal de l'Arc, Crau, Camargue, domaine offshore de Marseille.

ABSTRACT

The VASCO project, « Valorization and Storage of CO₂ », aims at studying the reduction and valorization opportunities of CO₂ emissions on the area of Fos-Berre-Beaucaire-Gardanne. Geological storage is one of the four studied routes by the year 2030.

Within the framework of this project, study of geological storage of CO₂ aims at characterizing geological formations in order to identify, within two target layers (carbonated formations of lower Cretaceous and of upper Jurassic), favorable areas for storage and to propose first estimations of the associated capacities. This study is led on four geographical domains, close to Fos-sur-Mer: the Crau area, the western part of the vast Synclinal de l'Arc, the Camargue area and the offshore domain off Fos-sur-Mer and Marseille.

The objective of this task was to identify, on the study area and for the two target formations, the favorable areas for CO₂ geological storage and to estimate first storage capacities for these sites.

The consideration and combination of selection criteria relative to target aquifers salinity, to target layers geometry and to the presence or not of an efficient cap-rock allowed identifying four favorable sites for CO₂ geological storage. The structural synthesis provided by task 5.1 also allowed observing that two types of structures are favorable to storage: horst structures, linked to extensive periods and ramp anticlines, linked to compressive periods.

Thanks to available data (well, seismic, gravimetrical data) the main qualitative and quantitative characteristics have been described for each site. First storage capacities have been calculated thanks to these estimated parameters. These capacities are notable on the study area but the calculation process also showed the need for more precise parameters on formations and sites in order to provide more reliable estimations.

Keywords : CO₂ geological storage, site selection, storage capacity, Synclinal de l'Arc, Crau area, Camargue area, offshore domain of Marseille.

Introduction

Objectif du projet VASCO

Le projet VASCO, « Valorisation et Stockage du CO₂ », a pour objectifs d'étudier les opportunités de réduction et de valorisation des émissions de CO₂ sur la zone de Fos-Berre-Beaucaire-Gardanne.

La stratégie de réduction des émissions de CO₂ se base sur le concept de CSCV – « Captage - Stockage géologique du CO₂ et sa Valorisation ». Quatre axes de diminution et valorisation du CO₂ sont envisagés, à l'horizon 2030 :

1. Exportation du CO₂ (capté sur les installations industrielles) par voie maritime pour injection dans des champs d'hydrocarbures (récupération assistée) avec création à Fos d'un terminal de liquéfaction du CO₂,
2. Bioremédiation du CO₂ avec production de micro-algues servant à la fabrication de farines végétales, biocarburants, ...
3. Valorisation du CO₂ pour des applications industrielles comme le traitement des eaux,
4. Transport par pipeline et stockage du CO₂ en aquifères salins profonds proches de la zone d'étude.

Une mutualisation des émissions industrielles de CO₂ sur la zone de Fos-Berre-Beaucaire-Gardanne permet d'envisager l'optimisation des infrastructures nécessaires à leur collecte et transport, d'un point de vue environnemental et économique. Une telle mutualisation à l'échelle d'une zone industrielle peut rendre attractif le captage du CO₂ pour des sites faiblement ou moyennement émetteurs. Le projet VASCO vise donc à proposer le schéma directeur d'une chaîne intégrée de management du CO₂ sur la zone d'étude.

D'autre part, les axes de valorisation pressentis pouvant inclure des contraintes spécifiques (procédés induits) relatives à la concentration optimale recherchée en CO₂, ou à la composition globale des flux entrants, il est primordial d'identifier :

- Le CO₂ directement valorisable,
- Les possibilités de captage du CO₂ applicables à chaque source,
- Les possibilités de regroupement des émissions pour un captage / conditionnement commun,
- La valorisation après captage, le cas échéant.

Ce projet se propose de plus de prendre en compte les possibilités d'intégration énergétique et foncière sur les différents sites concernés.

Objectifs de la tâche 5.2

Cette tâche vise à identifier les zones favorables au stockage géologique du CO₂ dans l'emprise de la zone d'étude et pour deux formations cibles considérées et d'estimer des premières capacités de stockage au sein de ces sites.

Pour rappel, la zone d'étude correspond à quatre domaines géographiques proches de Fos-sur-Mer : la Crau (immédiatement au Nord de Fos-sur-Mer), la partie occidentale du vaste synclinal de l'Arc (environs de l'étang de Berre), la Camargue avec un intérêt particulier pour sa partie orientale (à l'Est et au Sud-Est de l'Etang de Vaccarès), le domaine offshore situé au large de Fos-sur-Mer. Les deux formations cibles correspondent aux formations carbonatées du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur.

La tâche précédente du projet VASCO (5.1) a permis de caractériser la géométrie des terrains tertiaires et quaternaires recouvrant les formations cibles et de qualifier celles des couches cibles, notamment au travers de l'interprétation sismique de 44 profils sismiques et de la réalisation d'une carte de synthèse sur la structuration des séries pré-rift.

Quelques principes de la sélection de site sont tout d'abord exposés. La sélection de site est ensuite effectuée grâce à l'analyse des résultats de la tâche 5.1 et des données collectées en complément dans la cadre de la présente tâche.

Par la suite, la méthodologie de calcul des capacités de stockage est rappelée. Enfin, les estimations de capacités de stockage sont présentées pour chacun des sites de stockage identifiés.

1 Sélection de zones potentiellement favorables au stockage géologique de CO₂

1.1 Quelques principes de la sélection de site

Une méthodologie de sélection de site en aquifère salin a été formalisée par Grataloup *et al.* en 2009 sur un cas d'étude du bassin de Paris (Grataloup *et al.*, 2009a, 2009b, ANNEXE 1).

Cette approche considère qu'un site de stockage (ANNEXE 2) approprié pour le stockage de CO₂¹ en aquifère salin doit respecter simultanément les objectifs suivants :

- la maximisation des capacités de stockage et de l'injectivité,
- la minimisation des risques de fuite du CO₂ stocké,
- le respect des réglementations en vigueur et des utilisations existantes du sous-sol et en surface,
- le respect d'un certain nombre d'autres contraintes, d'ordre économique, sociales, politiques...

Ces objectifs sont exprimés sous forme de critères qui seront pris en compte et combinés pour le processus de sélection de site. Ces critères peuvent ainsi être par exemple :

- afin de maximiser les volumes stockés et l'injectivité, on recherchera préférentiellement des conditions souterraines telles que le CO₂ puisse être injecté et stocké dans un réservoir capable de le contenir sous un état supercritique² (ANNEXE 3) ; cela suppose alors de rechercher des conditions de pression et de température au-delà du point critique du CO₂ (31°C et 73 bars) ce qui correspond, dans des conditions moyennes de gradients géothermiques et de pression, à cibler des pièges géologique au-delà de 800 mètres de profondeur (ANNEXE 4). De même, afin de maximiser les capacités de stockage, les zones de plus fortes porosités ou d'épaisseur sont à privilégier. L'injectivité³ du CO₂ est quant à elle fonction de la perméabilité du réservoir ;
- en ce qui concerne la minimisation des risques de fuite du CO₂ stocké et assurer le piégeage de celui-ci, l'existence d'un piège (géométrique, hydrodynamique..., ANNEXE 5), la qualité de la couverture (facies, perméabilité, épaisseur), le nombre d'ouvrages souterrains abandonnés, la distance aux failles potentiellement perméables et aux zones d'activité sismique sont par exemple autant de critères pertinents à prendre en compte ;
- respecter la réglementation en vigueur inclura par exemple d'éviter les zones environnementales protégées pour l'implantation des équipements de surface. Intégrer un stockage souterrain au sein des usages déjà existants du sous-sol nécessitera aussi par exemple la prise en compte des zones d'exploitation d'eau ou de ressources fossiles ;
- des contraintes complémentaires peuvent aussi importer sur le choix d'un site de stockage : afin de limiter ou d'optimiser le coût économique, une distance maximale entre source d'émissions et lieu d'injection ou l'adéquation entre volumes émis et volumes de stockage possibles sont des critères qui peuvent être pris en compte.

Selon le contexte local considéré et les objectifs spécifiques au stockage, les critères disponibles pour l'identification des sites peuvent être classés en deux catégories :

- les critères d'exclusion, qui vont totalement disqualifier certaines zones pour le stockage géologique ;

¹ Pour plus de détails sur les principes du stockage géologique de CO₂, consulter par exemple le site du CO₂CRC : <http://www.co2crc.com.au/aboutccs/>

² Un fluide est dit supercritique lorsqu'il se trouve dans des conditions de température et de pression au-delà de son point critique. Les fluides supercritiques ont une viscosité proche de celle des gaz, une densité proche de celle des liquides et une diffusivité élevée.

³ L'injectivité est la facilité avec laquelle le CO₂ peut être injecté dans la roche réservoir.

- les critères de qualification de site, qui vont permettre de hiérarchiser les différents sites possibles et ainsi d'identifier les sites les plus intéressants.

La combinaison simultanée des différents critères pour l'identification des zones favorables peut être conduite à deux niveaux :

- en profondeur, en fonction de critères géologiques et d'exploitation du sous-sol, afin d'identifier les zones appropriées au stockage ;
- en surface pour délimiter les zones possibles pour l'implantation des installations de surface (lieu d'injection et réseau de transport).

Ce croisement de contraintes est particulièrement facilité par les outils SIG (Système d'Information Géographique) qui permettent de superposer simultanément et combiner ces différentes données.

1.2 Critères de sélection et identification des sites

1.2.1 Type de stockage géologique possible et critères pris en compte pour l'identification de sites potentiellement favorables

Etant donné les deux cibles privilégiées dans le cadre de cette étude et la complexité géologique de la région étudiée – compartimentalisation, variabilité des contextes stratigraphiques, structuration des unités géologiques... – un piégeage de type structural est celui qui semble le plus approprié. L'objectif est donc d'identifier des configurations géométriques des formations du sous-sol telles qu'elles pourront assurer le piégeage du CO₂.

Compte tenu de cet objectif et des données à disposition, les critères rédhibitoires pris en compte pour la délimitation de zones favorables au stockage sont les suivants :

- Nécessité de considérer un aquifère salin, impropre à la consommation humaine ;
- Nécessité de disposer d'un piège structural i.e. géométrie particulière du réservoir délimitant un espace délimité pour le stockage associée à l'étanchéité de la structure par des couvertures sus-jacentes et latérales.

Une fois les zones potentiellement favorables identifiées, ces différents sites pourront être comparés et faire l'objet de sélection plus fines grâce à des critères de qualification de site :

- Profondeur du toit du réservoir préférentiellement comprise dans l'intervalle de profondeur 1000-3000 m afin de se situer en conditions supercritiques (i.e. par rapport à un état gazeux, d'augmenter la masse de CO₂ stocké dans un même volume de roches) et de limiter les coûts économiques (limite des 3000 m choisie arbitrairement) ;
- Capacités de stockage ; selon les volumes mis en jeu, un site réunissant l'ensemble des critères rédhibitoires peut ne pas être retenu au final car ses capacités sont trop faibles ;
- Bonne injectivité, inférée sur la base de la perméabilité du réservoir
- Eviter les zones de fuites potentielles, en privilégiant des sites éloignés de failles majeures potentiellement conductrices ou des sites situés dans des zones de moindre aléa sismique.

1.2.2 Salinité et chimie des eaux des formations cibles

Les aquifères pouvant accueillir un stockage géologique doivent avant tout présenter des eaux impropres à la consommation humaine afin de ne pas compromettre une potentielle future source d'eau potable. C'est pourquoi les aquifères ciblés pour le stockage géologique de CO₂ sont qualifiés de « salins ». Il n'existe pas de limite réglementaire fixe sur les caractéristiques chimiques qu'un aquifère doit présenter afin d'être éligible pour le stockage de CO₂. Le département à l'énergie américain (DOE) considère par exemple qu'un aquifère est salin et apte au stockage de CO₂ lorsque sa teneur en solides dissous totaux (TDS) dépasse 10 g/l.

La législation française spécifie que, pour effectuer des tests d'injection ou exploiter un site de stockage géologique de CO₂, le requérant doit justifier que les eaux présentes au sein du complexe de stockage⁴ ont été rendues « de façon permanente impropre à d'autres utilisations » (décret n° 2011-1411, 2011). L'analyse du Code de l'Environnement permet de considérer que ces utilisations s'entendent comme celles respectant les exigences pour la santé, la salubrité publique, la sécurité civile, l'alimentation en eau potable de la population, la vie biologique des écosystèmes terrestres ou aquatiques autres que souterrains dont le fonctionnement dépend des nappes souterraines concernées (Bouc et al., 2012).

La première des exigences est donc de s'assurer que les eaux ciblées présentent des caractéristiques telles qu'elles sont impropres à la consommation humaine. L'annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007 fournit les « limites de qualité⁵ des eaux brutes⁶ de toute origine utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine ».

Afin de s'assurer que les formations géologiques ciblées dans cette étude contiennent des eaux qui respectent bien cette caractéristique et ainsi d'exclure des zones où les eaux pourraient être exploitées pour la consommation humaine, les données existantes sur la chimie des eaux des deux cibles considérées ont été compilées. La source principale de données exploitables pour cette question correspond aux ouvrages pétroliers, les connaissances hydrogéologiques des formations géologiques ciblées n'apportant pas souvent d'information puisqu'elles sont focalisées à faible profondeur et dans les zones où les séries cibles sont potables.

L'ANNEXE 6 présente l'ensemble des données de forages pétroliers consultées, i.e. l'ensemble des forages situés sur les quatre domaines d'étude et quelques ouvrages situés en bordure de ces domaines. Soixante-treize forages ont ainsi été passés en revue. Le Tableau 1 présente les types de données compilées sur chaque forage disposant de données. Les ANNEXE 7 et ANNEXE 8 réunissent l'ensemble des données collectées :

- quatre forages pétroliers seulement disposent de données de salinité pour le Crétacé inférieur et un seul est renseigné par une analyse d'eau. En complément de ces données d'origine pétrolière, deux forages miniers visant à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du synclinal de l'Arc fournissent deux analyses d'eau de l'Urgonien ;
- concernant le Jurassique supérieur, douze forages apportent des valeurs de salinité et sept d'entre eux présentent des analyses d'eau.

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Salinité équivalente NaCl (g/l)	Remarques	Analyses d'eau (g/l)
---------	--------	----------	-------------------------	-------	----------------------	--------------------	------------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------	----------------------

Domaine	N° BSS	Nom du forage minier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Analyses d'eau (mg/l)
---------	--------	----------------------	-------	----------------------	--------------------	------------------------	--------------------------	-----------------------

Tableau 1 : En-têtes des tableaux compilant les données d'analyses chimiques des eaux pour les formations cibles (ANNEXE 7 et ANNEXE 8)

Deux types d'observations peuvent être tirés des données des formations du Crétacé inférieur :

- les analyses d'eau des deux sondages miniers du Synclinal de l'Arc montrent des eaux peu minéralisées, dont les caractéristiques permettent une exploitation en tant qu'eau brute pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (Arrêté du 11 janvier 2007). Par ailleurs, le forage géothermique de Meyreuil, réalisé en 2009, et situé à un peu plus de 2 km au

⁴ Le complexe de stockage comprend « le site de stockage et le domaine géologique environnant qui est susceptible d'influer sur l'intégrité et la sécurité globales du stockage, c'est-à-dire les formations de confinement secondaire » (décret n° 2011-1411, 2011).

⁵ Les limites de qualité sont des valeurs réglementaires et doivent être obligatoirement respectées. Les « références de qualité » sont des valeurs réglementaires indicatives qui peuvent

⁶ Les eaux brutes désignent les eaux, superficielles ou souterraines, telles qu'elles se présentent dans le milieu naturel, sans avoir subi de traitement.

nord du sondage minier « S » (Figure 1), a rencontré des eaux du Crétacé inférieur très peu minéralisées et présentant des caractéristiques telles qu'elles pourraient être exploitées pour de l'eau potable.

Par ailleurs, le forage de Rognes 1, situé à l'extérieur de la zone d'étude et au nord du Synclinal de l'Arc, est associé à une salinité assez relativement faible de 4,09 g/l (le Crétacé inférieur y est affleurant), pouvant probablement permettre une exploitation pour l'eau potable ;

- dans le reste de la zone d'étude, la salinité mesurée est élevée, supérieure à 10 g/l. L'analyse de l'eau à Milhaud montre d'ailleurs des dépassements importants des limites de qualité spécifiées dans l'annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007, pour les ions chlorures et sodium.

En ce qui concerne les eaux des séries du Jurassique supérieur (et Dogger, lorsque les carbonates sont en connexion et ne constituent qu'un unique aquifère), les données de salinité équivalente (ANNEXE 9) sont toutes supérieures à 9 g/l. Sept analyses d'eau sont disponibles pour cet aquifère. Elles montrent des dépassements très importants des limites de qualité pour les ions chlorures, sodium et sulfates (annexe II de l'Arrêté du 11 janvier 2007).

Sur la base de l'ensemble de ces données, il apparaît que les formations cible des zones de la Crau, de la Camargue et de l'offshore constituent des aquifères dont les eaux ne peuvent être exploitées pour l'eau potable, en raison de très fortes minéralisations. Cela permet donc de les considérer comme des cibles éligibles au stockage de CO₂.

En revanche, les eaux du Synclinal de l'Arc présentent des caractéristiques telles qu'elles pourraient être exploitées pour la consommation humaine. Ce constat conduit à écarter d'ores et déjà cette zone géographique de la recherche de réservoirs de stockage possibles pour le CO₂. Par ailleurs, les études hydrogéologiques menées dans cette zone montrent que l'aquifère du Jurassique constitue un aquifère très actif et alimente par drainance verticale les aquifères du Crétacé supérieur (Moulin, 2010)

Forages avec données de salinité et/ou analyse d'eau

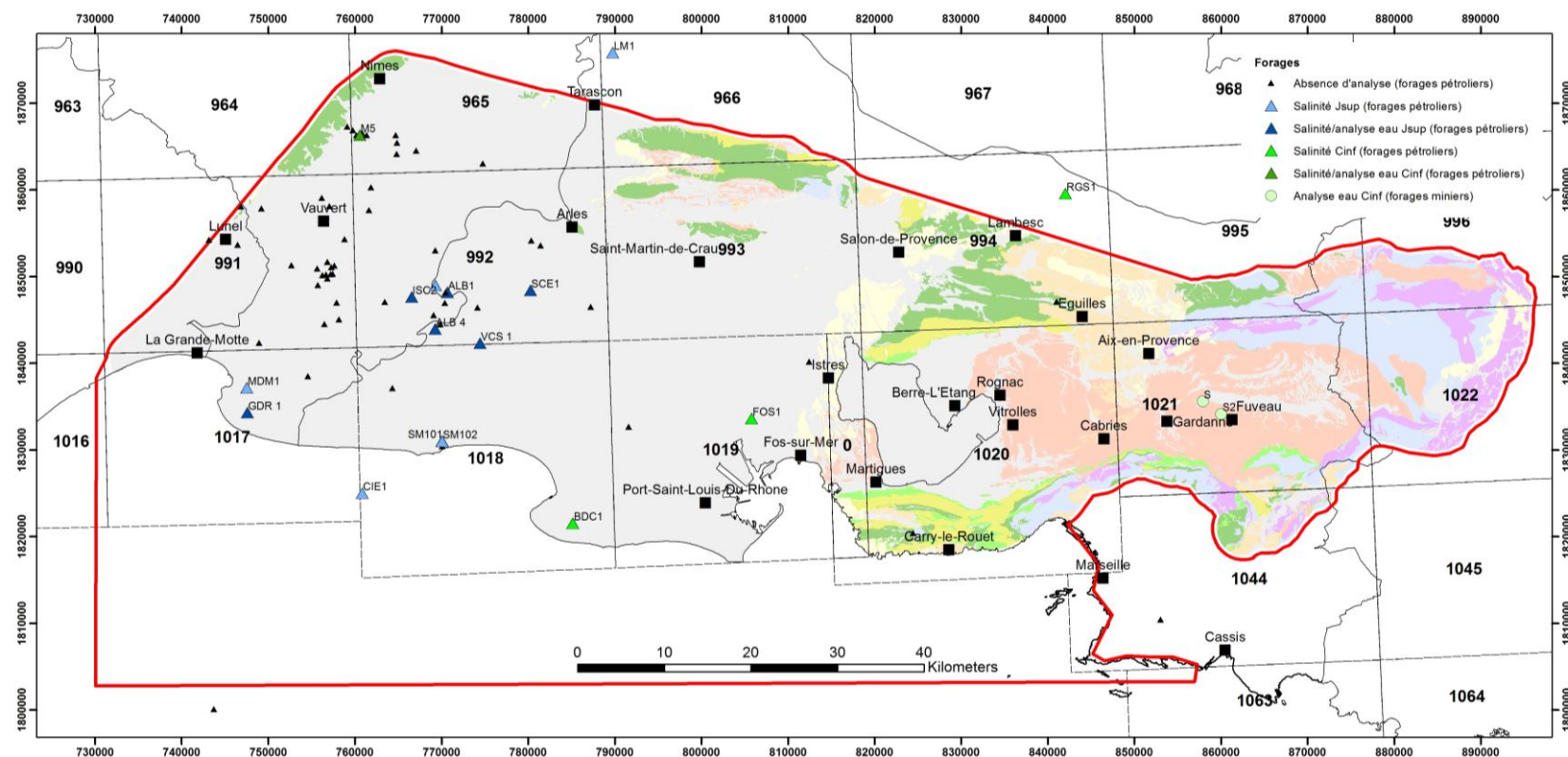


Figure 1 : Localisation des données de salinité répertoriées

1.2.3 Identification de structures géométriques favorables au stockage au niveau des formations cibles

Il s'agit ici d'identifier l'ensemble des structures géologiques présentant une géométrie favorable au niveau des formations cibles sans autre critère supplémentaire (couverture, profondeur...).

Les structures favorables correspondent à des « hauts » structuraux, c'est-à-dire des zones où les formations cibles se trouvent surélevées par rapport aux formations géologiques environnantes, ce qui peut alors créer, si l'étanchéité de ces hauts est assurée, des volumes circonscrits favorables au stockage.

Les travaux menés dans le cadre de ce projet sur la caractérisation géométrique des terrains ont principalement concerné les terrains qui constituent le recouvrement des formations cibles (intervalles stratigraphiques compris entre le Crétacé supérieur et le Quaternaire), faute de données suffisantes au niveau des formations cibles elles-mêmes pour pouvoir reconstruire de manière fiable leurs géométries 3D (Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012). La géométrie des séries Crétacé inférieur et Jurassique supérieur est donc inférée à partir de celle des terrains qui les recouvrent, puisque une corrélation géométrique a pu être établie entre ces deux unités (Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012).

Pour rappel, les données utiles à cette caractérisation géométrique sont les suivantes :

- sismique 2D interprétée. Les profils sismiques fournissent une image 2D des terrains du sous-sol. Leur interprétation permet d'identifier les principales interfaces tertiaires et quaternaire ; ce qui concerne les formations cibles, leur organisation globale peut être décrite, en revanche, il est très délicat d'identifier les interfaces d'intérêt (Chapitre 4, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012)
- isopaques cumulées des terrains post mésozoïques. Cette carte, construite à partir des données de forages, de sismique et d'affleurement, fournit une vue 2D de dessus de la géométrie des trois surfaces majeures post-mésozoïques sur la zone d'étude : base du Plio-Quaternaire, base du Miocène (base du post-rift) et base de l'Oligo-Aquitainien (base du syn-rift) (Chapitre 5, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012) ;
- gravimétrie. Afin de compléter les données précédentes et mieux contraindre les géométries, un travail spécifique a été réalisé sur les données gravimétriques disponibles sur la zone d'étude. Les anomalies gravimétriques reflètent les différences de densité de la pile de roche constitutive du sous-sol. Leur analyse permet ainsi d'identifier des structures ou des successions géologiques particulières, comme par exemple la présence de failles, de surépaississements ou au contraire de faibles épaisseurs de certains terrains... Ces données permettent donc de disposer des informations sur l'organisation 3D du sous-sol en fournissant notamment des renseignements sur la continuité latérale de structures observées sur des lignes sismiques 2D (paragraphe 3.5, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012).

L'analyse croisée de l'ensemble de ces données, combinée aux connaissances issues de la bibliographie a permis d'établir une carte structurale qui illustre les géométries majeures des terrains géologiques (Figure 2 ; Paragraphe 5.3, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012).

Cette carte met en évidence les zones de hauts mésozoïques, qui constituent justement les configurations recherchées pour le stockage. Les données de forages indiquent que ces hauts mésozoïques comportent notamment les formations cibles du Jurassique supérieur. L'ensemble de ces structures géométriques constituent donc des configurations favorables au stockage sur la zone d'étude.

La zone du synclinal de l'Arc, déjà écartée en raison de la faible minéralisation et l'hydrodynamisme des eaux crétacées et jurassiques apparaît comme défavorable au stockage du fait de la géométrie des terrains cibles, en vaste synforme.

Les structures présentant des géométries des formations cibles favorables au stockage sont donc les suivantes :

- le haut de Bellegarde,
- le haut de la Tête de la Camargue,

- le haut d'Albaron,
- la structure de Mas-de-Madame,
- la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer,
- la structure de Cicendèle,
- l'anticlinal d'Istres,
- l'anticlinal de Peaudure.

Selon les données à partir desquelles elles sont dessinées et l'interprétation faites de ces données, ces zones favorables peuvent présenter des emprises variables. La Figure 3 illustre ces différents contours pour chacune des zones favorables identifiées grâce à la synthèse structurale. Les zones ainsi délimitées sont superposées aux données ayant servi à les dessiner : données de gravimétrie et isopaques du Cénozoïque.

Dans certains cas, les emprises de ces structures favorables peuvent être plus ou moins étendues. Deux cas sont alors définis : un cas de base, qui correspond aux emprises les moins étendues et un cas dit « optimiste » qui correspond aux étendues les plus vastes, englobant les emprises de base. Dans les cas de base, les zones favorables peuvent être composées d'une ou de deux structures déconnectées.

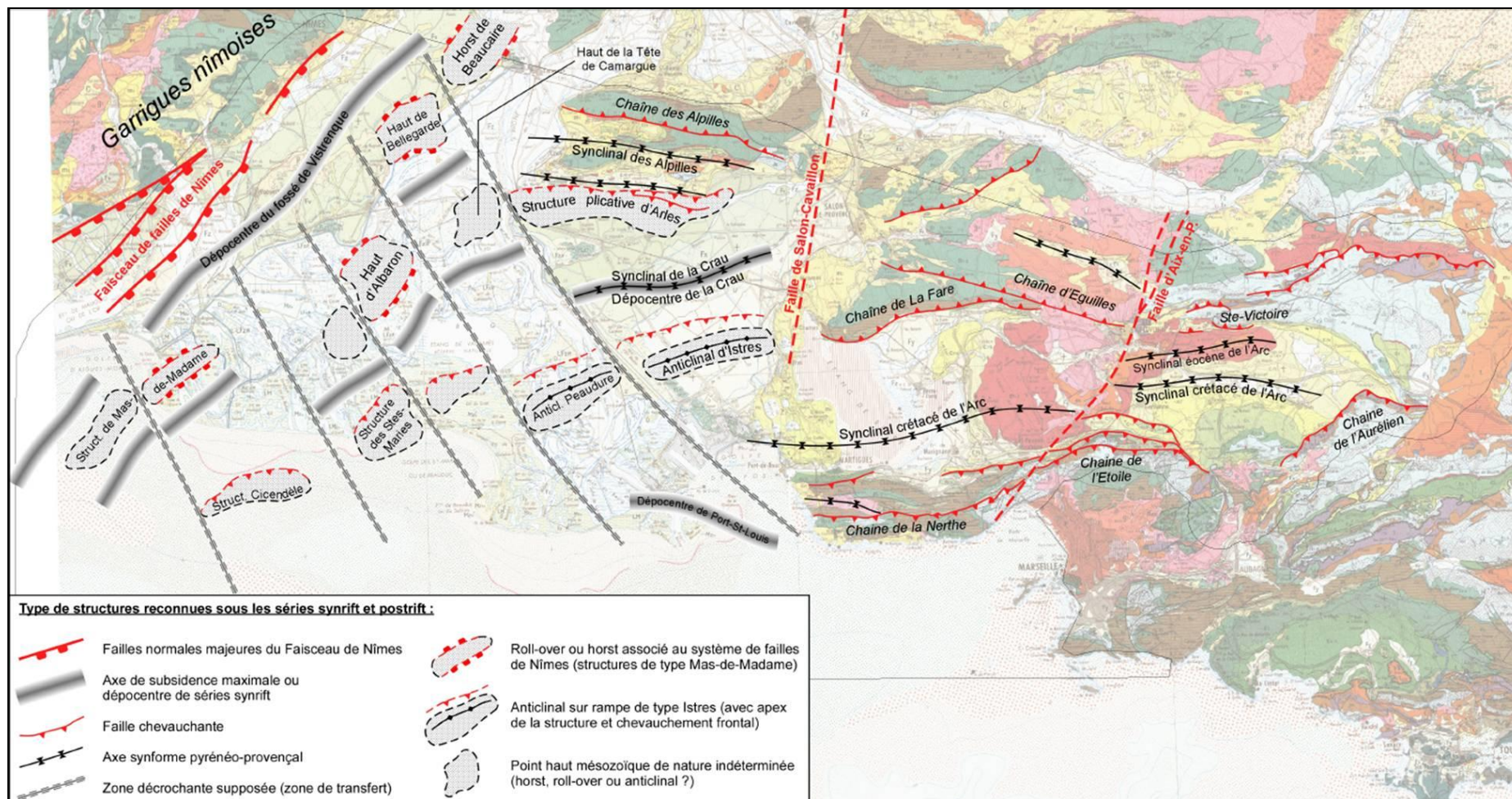


Figure 2 : Principales structures géologiques résultant des déformations pyrénéo-provençales et de l'extension oligo-aquitaine, visibles à l'affleurement ou supposées sous couverture cénozoïque en Camargue et en Provence (Paragraphe 5.3, Rapport VASCO, Tâche 5.1, BRGM, 2012). Fond : carte géologique à 1/250 000, feuille n°39 – Marseille (Rouire et al., 1979)

Projet VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins

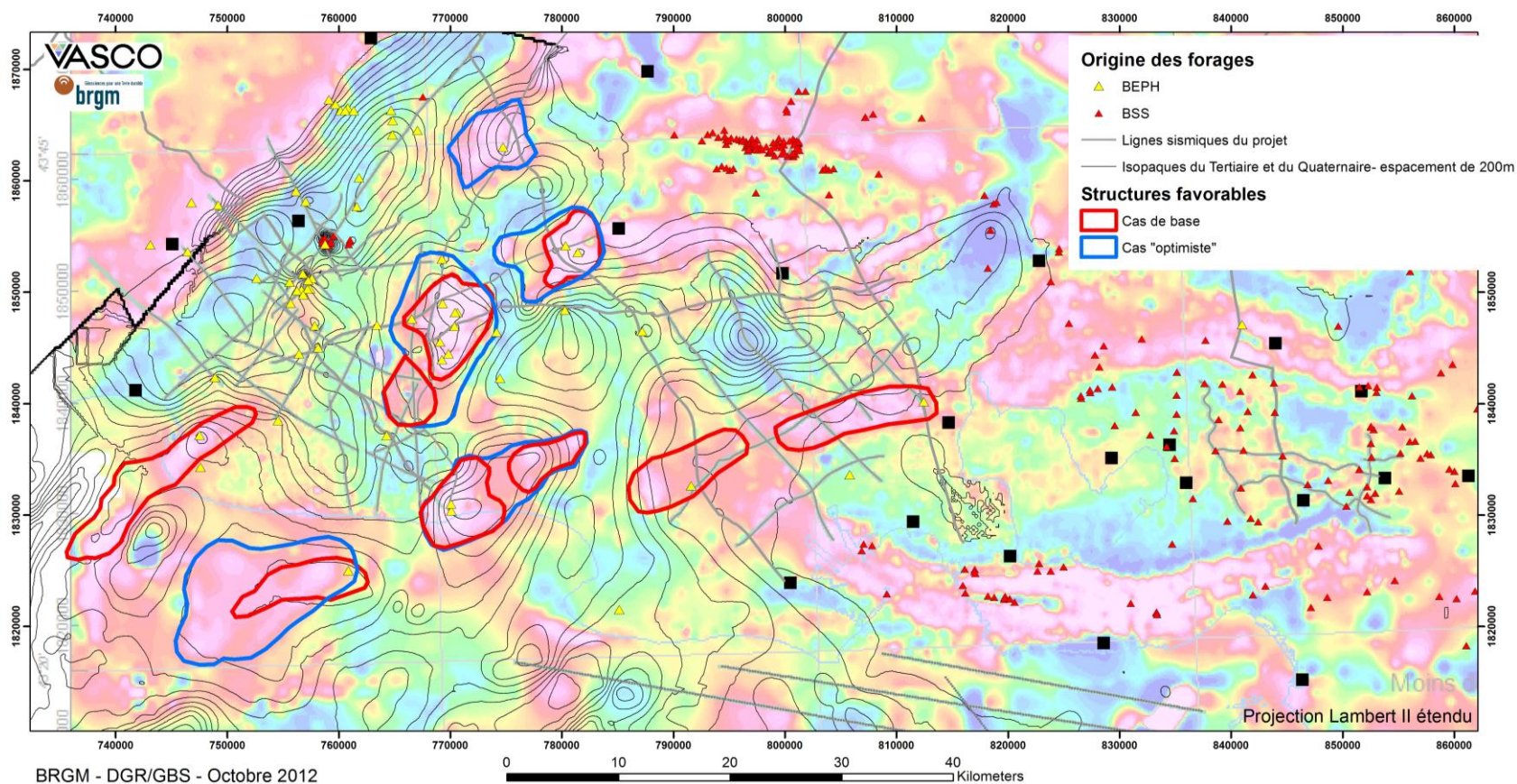


Figure 3 : Délimitation des zones où les formations réservoirs présentent une géométrie favorable. Fond : Carte du gradient vertical des anomalies de Bouguer (BRGM, 2012).

1.2.4 Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations cibles est favorable

Les caractéristiques principales des huit zones précédemment identifiées ont été compilées selon les informations disponibles. Elles sont synthétisées dans les Tableau 2 et Tableau 3 (sans ordre significatif des structures).

Les caractéristiques renseignées sont les suivantes :

- pour la cible :
 - o le niveau stratigraphique concerné ;
 - o la profondeur du toit de la cible déduite des données de forages disponibles sur chaque zone ;
 - o son épaisseur telle qu'elle peut être déduite à partir des données de forages si cela est possible ;
 - o sa qualité réservoir telle qu'elle peut être déduite à partir des données de forages (compilées au sein de tableaux de synthèse de ces données, paragraphe 2.2.1) ;
- pour la structure :
 - o son type ; deux types de structures constituent les zones favorables : les horsts et les anticlinaux sur rampe ;
 - o son moyen de reconnaissance, i.e. quels types de données ont permis de la mettre en évidence et de la délimiter ;
 - o le nombre selon les cas ;
 - o sa surface, déclinée également selon le cas, de base ou optimiste ;
 - o son épaisseur, c'est-à-dire l'épaisseur du piège maximale estimée ;
- pour la couverture:
 - o son épaisseur, déduite des données de forages ;
 - o sa qualité, également estimée à partir des données de forages ;
- les réserves sur chaque site, i.e. quelles caractéristiques du piège sont les plus incertaines et pourraient réduire à néant la potentialité de ces structures.

Un cas particulier apparaît dans cette liste : le cas aux Saintes-Maries-de-la-Mer d'un site de stockage possible dans le Dogger. En effet, ce niveau stratigraphique n'appartient pas aux formations cibles définies pour le projet, du fait de la prédominance attendue dans la zone d'étude du facies « Terres Noires », formation marneuse très épaisse. Néanmoins, l'analyse des forages des Saintes-Maries-de-la-Mer et de Cicendèle a démontré l'existence de compartiments chevauchants comportant des niveaux du Dogger à facies beaucoup plus favorables de calcaires fracturés ou de dolomies plus ou moins calcaires montrant de bonnes propriétés réservoir. De plus aux Saintes-Maries-de-la-Mer, une partie du Dogger constitue, d'après les données de forage, un aquifère de qualité associé à une couverture efficace (ANNEXE 14). Cela nous a donc poussés à considérer ce niveau comme un réservoir potentiel supplémentaire pour le stockage.

Objet	Caractéristique	Haut d'Albaron	Haut de la Tête de la Camargue	Haut de Bellegarde	Structure de Mas-de-Madame
Cible	Niveau	Jurassique supérieur	Jurassique supérieur	Jurassique supérieur (non atteint par BEL1)	Jurassique supérieur
	Profondeur du toit	env. 200m (forages) à l'apex de la structure	env. 90m (ARL2, ARL1)	? > 250m (BEL1)	492m (MDM1)
	Epaisseur	865m (ALB101)	> 80 m(ARL2)	?	≥ 300m (GRD1)
	Qualité réservoir d'après forages	excellentes propriétés réservoir	?	?	propriétés réservoir supposées très bonnes
Structure	Type	horst ?	horst ?	horst	horst
	Moyen de reconnaissance	sismique + gravimétrie + isopaques	sismique + gravimétrie	sismique + gravimétrie	sismique + gravimétrie + isopaques
	Nombre	cas de base : 2 structures indépendantes (décrochement) cas optimiste : 1 structure englobante plus vaste	cas de base : 1 structure cas optimiste : 1 structure plus vaste	1	1 possibilité de disjonction entre une structure onshore et une structure offshore ?
	Surface (km2) (d'après les contours sur SIG)	cas de base : 63,5 cas optimiste : 102,7	cas de base : 23,9 cas optimiste : 49,6	35,5	cas de base : 54,8 cas optimiste : 58,6
	Epaisseur (i.e. jusqu'au point de fuite identifiable)	env. 800m	env. 1100m	env. 500m	?
Couverture	Epaisseur	à l'apex de la structure : de 66 à 164m d'argile plaisancienne +/- sableuses (4 forages Albaron)	environ 30 m d'argile (+/- sableuse)	191 m d'argile plaisanciennes mais présence de Miocène grés-argileux et d'un recouvrement stratigraphique calcaro-marneux au toit du réservoir	250 m d'argiles plaisanciennes
	Qualité	Bonne en vertical ; Contact avec Miocène en latéral --> possibilité migration du CO2 en latéral mais scellement par argiles plaisanciennes sus-jacentes	médiocre (molasse miocène et Plio-Quaternaire)	médiocre ? (Crétacé inférieur et Miocène)	Bonne Marnes plaisanciennes (alternance argiles et sables)
Réserves sur le site		fermeture du piège	qualité de la couverture Fermeture du piège notamment vers l'est	qualité de la couverture Fermeture du piège notamment vers l'est	géométrie du piège fermeture du piège

Tableau 2 : Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations réservoir est favorable - structures de horst.

Objet	Caractéristique	Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer	Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer	Structure de Cicendèle	Anticlinal d'Istres	Anticlinal de Peaudure
Cible	Niveau	Jurassique supérieur + Callovien partiel	Dogger	Jurassique supérieur + Dogger	Jurassique supérieur	Jurassique supérieur (non atteint par PDE1)
	Profondeur du toit	< 120m (SMM102)	1443 m	559 m (CIE1)	1389,5 m (IS101)	minimum 400m (PDE1)
	Epaisseur	1068 m (SMM102)	285 m	153 m (CIE1)	1287 m (IS101)	?
	Qualité réservoir d'après forages	excellentes propriétés réservoir 800 m de hauteur productrice	très bonnes propriétés réservoir	propriétés réservoir supposées très bonnes	? Facies peu favorables (IS101)	?
Structure	Type	anticlinal sur rampe	anticlinal sur rampe	anticlinal sur rampe	anticlinal sur rampe	anticlinal sur rampe ?
	Moyen de reconnaissance	gravimétrie + sismique + isopaques	gravimétrie + sismique + isopaques	gravimétrie + isopaques	sismique + gravimétrie + isopaques	sismique + gravimétrie
	Nombre	cas de base : 2 structures indépendantes (décrochement) cas optimiste : 1 structure englobante plus vaste	cas de base : 2 structures indépendantes (décrochement) cas optimiste : 1 structure englobante plus vaste	cas de base : 1 structure cas optimiste : 1 structure plus vaste	1	1
	Surface (km2) (d'après les contours sur SIG)	cas de base : 57,5 cas optimiste : 74,7	cas de base : 57,5 cas optimiste : 74,7	cas de base : 32,8 cas optimiste : 124,2	43,7	41,6
	Epaisseur (i.e. jusqu'au point de fuite identifiable)	env. 1000 m	?	?	1500 m	?
Couverture	Epaisseur	120m de recouvrement entre le réservoir et la surface mais sans couverture satisfaisante	260m de calcaires argileux	421 m, argile plastique +/- en alternance avec des bancs calcaires et gréseux	120m	?
	Qualité	absente (6m d'argile au toit du réservoir puis cailloutis sur 60 m)	Bonne "La salinité (70g/l dans le Dogger, contre 10 g/l dans le Jurassique supérieur) prouve la valeur de la couverture callovienne"	Bonne	Recouvrement stratigraphique médiocre : calcaire microcristallin à intercalations fréquentes de marnes	? Recouvrement stratigraphique non atteint
Réserves sur le site		qualité de la couverture fermeture du piège	géométrie du piège fermeture du piège	géométrie du piège fermeture du piège	qualité du réservoir qualité de la couverture fermeture du piège	qualité du réservoir existence d'une couverture fermeture du piège

Tableau 3 : Principales caractéristiques des zones pour lesquelles la géométrie des formations réservoir est favorable - structures anticlinales.

1.2.5 Identification des sites favorables au stockage : étanchéité des structures

Les deux premières étapes de la sélection de sites ont conduit à exclure la zone du synclinal de l'Arc du fait de la faible salinité des eaux du Crétacé inférieur et de la géométrie non favorable des terrains et à considérer huit zones où la géométrie des formations cibles pourrait être favorable.

Il s'agit maintenant de vérifier que les structures mésozoïques ainsi identifiées peuvent disposer de couvertures potentiellement efficaces afin d'assurer l'étanchéité des pièges. Les structures doivent présenter une étanchéité, non seulement vers le haut, mais également sur leurs parties latérales. Cette étanchéité peut être assurée soit par la présence de couverture (roche très peu perméable) soit par celle d'une faille dont les propriétés hydrauliques en font une barrière imperméable. Le comportement hydraulique des failles est souvent l'objet d'hypothèses faute de données disponibles sur ces objets.

Les couvertures des pièges peuvent être de deux types :

- Une couverture stratigraphique : les terrains marno-calcaires de l'Albien – Aptien pour le Crétacé inférieur et les terrains marno-calcaires du Valanginien – Hauterivien pour le jurassique supérieur ;
- Une couverture non stratigraphique, résultant de l'érosion des dépôts initiaux et du dépôt postérieurs de terrains tertiaires à quaternaires. Parmi les intervalles pouvant constituer une couverture de qualité, on peut citer les facies évaporitiques ou argilo-marneux de l'Oligocène, les niveaux argileux du Miocène ou ceux du Pliocène avec en particulier les argiles plaisanciennes.

Seules les données de forages pétroliers fournissent des informations sur la qualité des terrains sus-jacents aux cibles sur les zones identifiées précédemment. Pour chacun des sites, les données de forages disponibles ont donc passées en revue afin de mettre en évidence une potentielle couverture imperméable. Ces données sont synthétisées dans les tableaux précédents (Tableau 2 et Tableau 3). Elles permettent d'évaluer le potentiel de chacune des structures vis-à-vis du stockage :

- le haut d'Albaron présente, dans sa zone sommitale une couverture de bonne qualité constituée par environ 200 m de marnes plaisanciennes, en contact direct avec le Jurassique supérieur ; en revanche, sur les parois de la structure du horst, le Jurassique est en contact avec des formations du Miocène, constitué par des proportions variables d'argiles plus ou moins sableuses et des sables plus ou moins sableux ; une migration latérale au sein de ces formations est donc une hypothèse envisageable ;
- le haut de la Tête de la Camargue : même dans sa zone sommitale, le Jurassique n'est pas recouvert directement par les marnes plaisanciennes mais par des formations argilo-sableuses du Miocène, qui ne constituent pas une bonne couverture ; par ailleurs, le toit de la formation réservoir ne se situe qu'à environ 90 de profondeur, ce qui est très faible et constitue un défaut important de ce site ; cette structure ne peut donc pas être retenue comme un site potentiel pour le stockage ;
- le haut de Bellegarde présente la même configuration de couverture que le haut de la Tête de la Camargue, avec en sus, une intercalation de Crétacé inférieur entre le Miocène et le Jurassique (non atteint pas le forage de Bellegarde 1), constitué de calcaires et marnes gréseux, facies défavorables pour une bonne couverture ; cette structure ne peut donc pas être retenue comme un site potentiel pour le stockage ;
- la structure de Mas-de-Madame présente, au contact direct du réservoir jurassique, plus de 250 m de marnes plaisanciennes qui peuvent assurer une couverture efficace ; la question se pose néanmoins sur les flancs du horst, potentiellement en contact avec d'autres niveaux stratigraphiques et faciologiques ;
- la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer : dans le cas du réservoir du Jurassique supérieur, il apparaît qu'aucune couverture satisfaisante n'existe ; en effet, les calcaires du réservoir ne sont séparés des cailloutis quaternaires peu profonds que par 6 m d'argiles, insuffisantes pour assurer l'étanchéité du système ; cette structure ne peut donc pas être retenue comme un site potentiel pour le stockage ;
- la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer : dans le cas de l'aquifère du Dogger, la consultation des documents de forages a montré que les calcaires argileux du Callovien constituent une très bonne couverture (ANNEXE 14) ;
- la structure de Cicendèle présente plus de 420 d'argiles plastiques à niveaux calcaires et gréseux au-dessus du Jurassique supérieur ; cela constitue a priori une bonne couverture ;
- l'anticlinal d'Istres : les formations du Jurassique supérieur sont surmontées par celles du Crétacé inférieur sans l'existence d'une couverture évidente entre ces deux unités ; les terrains du Crétacé inférieur directement sus-jacents au Jurassique correspondent sur 120 m à des calcaires micritique à microcristallin en alternance avec des marnes plus ou moins plastiques ; même si ces facies évoquent des niveaux pouvant être compacts (et donc assurer une étanchéité, ce qu'il faudrait vérifier) et peu perméables, ils ne constituent pas a priori une bonne couverture ; de ce fait, cette structure n'est pas retenue comme un site potentiel pour le stockage, même si des investigations plus poussées seraient nécessaires pour mieux appréhender les terrains en présence et leurs qualité respectives ;
- l'anticlinal de Peaudure devrait présenter une configuration similaire à celle de l'anticlinal d'Istres, dont il peut constituer le prolongement ; faute de données de forages directement sur cette structure (Peaudure 1 n'atteint pas le Jurassique), ce sont celles d'Istres qui sont considérées ; de la même manière que précédemment, cette structure n'est pas retenue comme un site potentiel pour le stockage.

L'analyse des couvertures permet donc de sélectionner quatre structures comme étant les plus favorables au stockage : le haut d'Albaron, la structure de Mas-de-Madame, la structure de Cicendèle

et celle des Saintes-Maries-de-la-Mer pour le Dogger. Parmi ces sites potentiels, la Structure de Mas-de-Madame est celle qui semble présenter le plus d'atouts au vu des données disponibles.

1.2.6 Prise en compte de critères de qualification de sites

En sus des critères d'exclusion, qui permettent de mettre en évidence les structures aptes au stockage ou non, il peut être intéressant de comparer les sites identifiés avec des critères supplémentaires, de qualification de site, qui peuvent par exemple permettre de comparer les différents sites entre eux et de sélectionner ceux qui sont le plus en adéquation avec les objectifs fixés.

A titre d'exemple, les sites retenus précédemment peuvent être confrontés à l'épaisseur des terrains tertiaires et quaternaires qui recouvrent les formations cibles. La Figure 4 superpose en particulier les contours des sites avec les zones où le recouvrement tertiaire-quaternaire est supérieur à 800 m, i.e. la profondeur au-delà de laquelle le CO₂ est à l'état supercritique. Les sites retenus comme favorables au stockage présentent des réservoirs jurassiques directement ou quasiment directement sous le recouvrement tertiaire et quaternaire. L'épaisseur de ce recouvrement représente alors dans ces cas-là, la profondeur du toit des structures. Dans ces cas-là (Haut d'Albaron, Structures de Mas-de-Madame et de Cicendèle), cette figure montre de manière flagrante les relatives faibles profondeurs de l'ensemble de structures considérées, en majorité développées à moins de 800 m de profondeur, ce qui n'est pas le contexte le plus favorable au stockage de CO₂ en termes de volumes stockés. Une plus ou moins grande partie du CO₂ ainsi stocké se trouverait alors à l'état gazeux.

Le réservoir du Dogger des Saintes-Maries-de-la-Mer se situe en revanche à plus forte profondeur, étant recouvert des dépôts jurassiques et d'une partie du Dogger.

De même, il faut noter que pour les structures non retenues d'Istres et de Peaudure, la profondeur du Jurassique supérieur dans ces zones est supérieure à l'épaisseur des terrains tertiaires et quaternaires, le Jurassique étant recouvert également par des dépôts du Crétacé inférieur.

Sur le même principe, il peut être important de choisir des sites qui minimisent le plus les risques de fuite. Rôle primordial de la couverture des sites de stockage, la minimisation des fuites de CO₂ peut également passer par la prise en compte de l'activité sismique des zones étudiées, puisqu'elle peut favoriser la création de chemin de migration hors du piège initial.

La Figure 5 illustre ainsi la comparaison des sites retenus avec le zonage sismique de la France et montre que l'ensemble des sites sélectionnés se situent dans les zones de très faible à faible sismicité.

Par ailleurs, l'indication de l'intensité de la sismicité permettra de concevoir les infrastructures en fonction du risque associé. Cela est particulièrement crucial pour le stockage de CO₂ puisque ce type d'exploitation du sous-sol appartient à la catégorie des Installations Classées pour la protection de l'environnement (ICPE), soumises à des normes parasismiques particulières.

Projet VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins

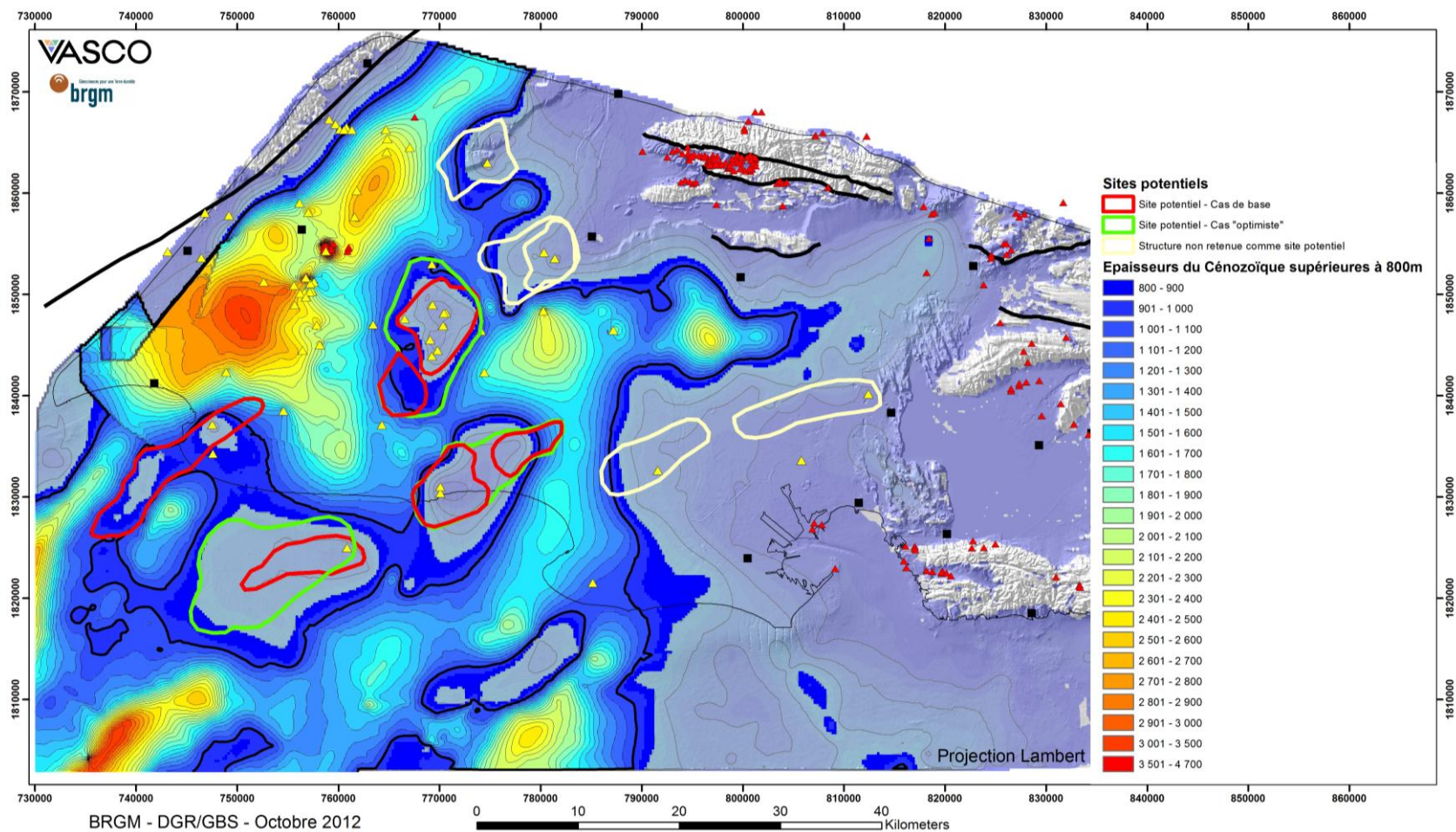


Figure 4 : Comparaison des contours des sites identifiés avec les épaisseurs de recouvrement tertiaire et quaternaire

Projet VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins

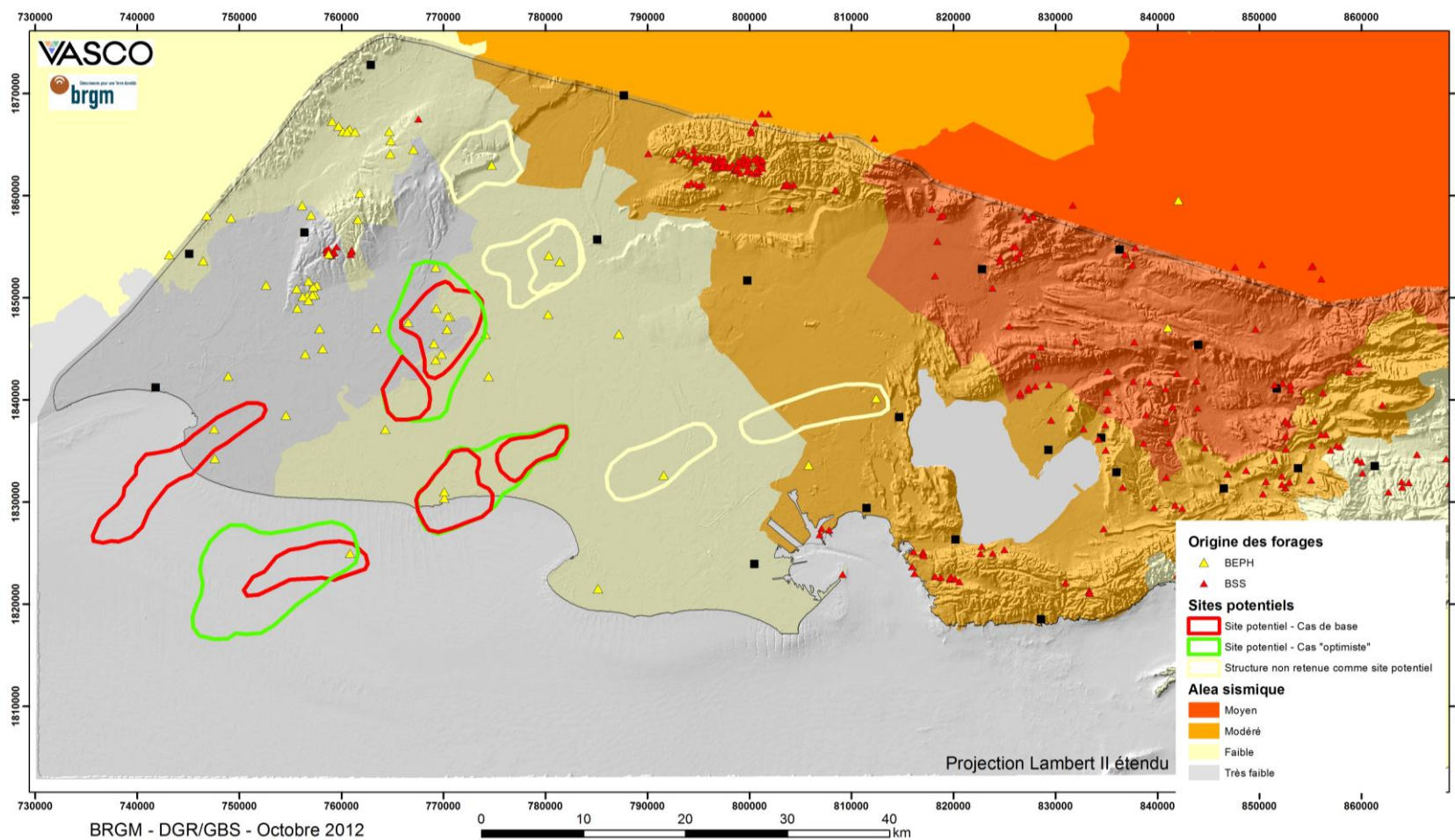


Figure 5 : Comparaison des contours des sites identifiés avec le zonage sismique de la France

2 Estimation des capacités de stockage des sites potentiellement favorables au stockage de CO₂

2.1 Méthodologie de calcul de la capacité de stockage d'un site en aquifère salin

Les capacités de stockage d'un site peuvent être estimées à différents niveaux selon les connaissances disponibles : données géologiques, connaissance des phénomènes en jeu, technologies, réglementation ou contexte économique par exemple. La Figure 6 illustre les différents types de capacités définis en fonction de ces connaissances.

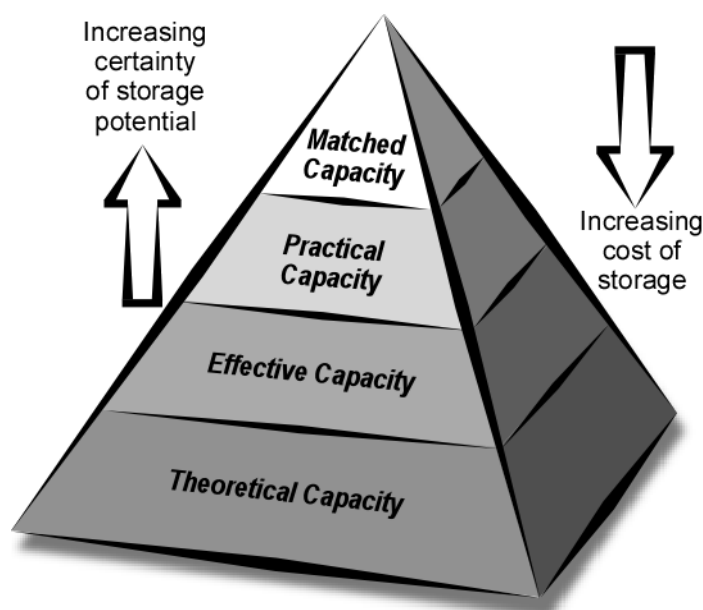


Figure 6 : Pyramide techno-économique des capacités de stockage en CO₂ (Bachu et al., 2007 ;CSLF, 2007)

La capacité théorique (Theoretical Capacity) correspond à la limite physique maximale du milieu géologique. Elle prend en compte la totalité de l'espace possible, en supposant une occupation totale par le CO₂ de toute la porosité, une dissolution maximale dans les fluides de formation ou une adsorption maximale dans les veines de charbon. Elle représente donc une limite maximale des estimations de capacités mais également une quantité irréaliste puisque les hypothèses de base sont idéales et non réalistes (Bachu et al., 2007 ;CSLF, 2007).

La capacité efficace (Effective Capacity) représente une partie de la capacité théorique et est obtenue en considérant un certain nombre de seuils limites techniques (géologiques ou technologiques) qui permettent de considérer la part de la capacité théorique réellement accessible au CO₂. Cette grandeur varie en fonction des acquisitions de nouvelles données ou connaissances sur le site (Bachu et al., 2007 ;CSLF, 2007).

La capacité pratique (Practical Capacity) correspond à la part de la capacité efficace qui est obtenue en prenant en compte les contraintes techniques, légales et réglementaires, d'infrastructures et économiques. Elle varie en fonction de l'évolution de ces contraintes (Bachu et al., 2007 ;CSLF, 2007).

La capacité contrôlée (Matched Capacity) représente la part de la capacité pratique qui est calculée en considérant l'adéquation entre émissions de CO₂ et les sites de stockage en termes de capacités, d'injectivité et de débit entrant de CO₂. La différence entre cette capacité et la capacité pratique

correspond la capacité de stockage qui ne peut être exploitée du fait de manque d'infrastructures ou de sources de CO₂ à une distance économiquement pertinente (Bachu et al., 2007 ; CSLF, 2007).

Il existe deux approches principales pour effectuer les calculs de capacités de stockage : celle du CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF, 2007 ; CSLF, 2008) et celle du NETL (National Energy Technology Laboratory, United States Department of Energy ; NETL, 2010). Seul le calcul de la capacité efficace est évoqué ici.

Le NETL propose une formule unique pour calculer les capacités efficaces, quel que soit le type de stockage (structural, hydrodynamique, dissolution...) :

$$M_{CO_2} = A \times h \times \Phi \times \rho_{CO_2} \times E_E \quad (1)$$

avec:

- M_{CO_2} masse de CO₂
- A surface d'aquifère concernée,
- h épaisseur de l'aquifère,
- Φ porosité moyenne,
- ρ_{CO_2} densité moyenne du CO₂, fonction des conditions de pression et la température du stockage (ANNEXE 10)
- E_E coefficient d'efficacité du stockage, qui traduit la fraction du volume total poreux réellement occupée par le CO₂.

Le CSLF est globalement en accord avec cette approche mais considère spécifiquement le stockage en piège structural ou stratigraphique. La grandeur $A \times h$ est ainsi assimilée à V_{trap} , le volume du piège. Par ailleurs, le CSLF considère que la capacité effective d'un tel piège est relativement difficile à évaluer puisque la densité du CO₂ stocké dépend de la pression dans le piège une fois que celui-ci est rempli de CO₂ et que cette pression, dépendante de la perméabilité, des perméabilités relatives, des dimensions et volumes en jeu et de la nature des limites du piège, est inconnue a priori. La capacité effective en CO₂ est donc comprise entre deux limites :

$$\min M_{CO_2} = \rho_{CO_2}(P_i, T) \times V_{trap} \leq M_{CO_2} \leq \max M_{CO_2} = \rho_{CO_2}(P_{max}, T) \times V_{trap}$$

avec :

- $\rho_{CO_2}(P_i, T)$ la densité du CO₂ à la pression initiale du réservoir (P_i)
- $\rho_{CO_2}(P_{max}, T)$ la densité du CO₂ à la pression d'injection maximale possible (imposée par la réglementation, afin d'éviter la fracturation de la roche, P_{max})
- T température moyenne du piège.

Le coefficient d'efficacité E_E peut être exprimé comme la fonction de trois composantes (Gorecki et al. dans IEA GHG, 2009) :

$$E_E = E_{Geol} \times E_V \times E_d$$

où:

- E_{Geol} est l'efficacité liée aux paramètres géologiques, définissant la fraction de l'espace poreux qui a des propriétés telles qu'elle est apte à stocker du CO₂. Ces paramètres consistent en l'aire, la hauteur et la porosité d'aquifère effectivement utiles au stockage avec la relation suivante :

$$E_{Geol} = \frac{A_n}{A_t} \times \frac{h_n}{h_g} \times \frac{\phi_{eff}}{\phi_t}$$

avec :

- A_n l'aire nette (convenant au stockage) d'aquifère
- A_t l'aire totale de l'aquifère considéré
- h_n l'épaisseur nette (utile) de l'aquifère

- h_g l'épaisseur totale (« gross » en anglais) de l'aquifère
 - ϕ_{eff} porosité efficace (connectée) de l'aquifère
 - ϕ_t porosité totale de l'aquifère
- E_v est l'efficacité de déplacement volumétrique qui correspond à la fraction de l'espace poreux du réservoir qui est effectivement en contact avec le CO_2 injecté. Ce coefficient dépend des hétérogénéités au sein du réservoir comme les failles, les variations de facies, de perméabilités ou de porosité ;
 - E_d est l'efficacité de déplacement microscopique qui traduit la capacité du CO_2 à remplacer l'eau initiale contenue dans les pores du réservoir. Elle est donc directement liée à la saturation irréductible en eau en présence de CO_2 .

Gorecki et al. (IEA GHG, 2009) ont procédé à l'estimation du coefficient d'efficacité en aquifère salin grâce à des simulations d'injection de CO_2 au sein de différents modèles géologiques initiaux. Ces modèles géologiques ont été construits en considérant trois variables :

- la lithologie, trois valeurs possibles : grès, dolomie ou calcaire,
- l'environnement de dépôt, dix environnements différents considérés,
- la structure du piège, cinq configurations possibles : plat, anticlinal, dôme, monoclinal à 10° et monoclinal à 5° .

Les gammes de variation des autres paramètres des modèles (profondeur, salinité, gradient géothermique, épaisseur de réservoir, ratio épaisseur utile/épaisseur totale, ratio porosité efficace/porosité totale) sont déterminées grâce à des valeurs statistiques issues de l'analyse d'une base de données constituées à partir de plus de 20 000 sites d'exploitation d'hydrocarbures à travers le monde ; seul le ratio aire nette/aire totale d'aquifère ($\frac{A_n}{A_t}$) a été extrait de l'atlas du NETL.

A critères géologiques identiques (c'est-à-dire à E_{Geol} constant), une étude de sensibilité a été menée sur cinq autres variables :

- la structure,
- la profondeur et la température (liées par le gradient géothermique),
- la perméabilité relative et la saturation irréductible en eau,
- l'anisotropie de perméabilité
- le débit d'injection.

Cette étude de sensibilité permet de mettre en évidence les effets de chacun de ces paramètres sur l'efficacité de stockage. Il est intéressant de noter la forte incidence de la structure sur le coefficient d'efficacité. En effet, plus le piège est structuré, plus les coefficients d'efficacité de déplacement augmentent. Ainsi, à paramètres constants par ailleurs, les coefficients d'efficacité en structure de dôme sont souvent plus de deux fois supérieurs à ceux en structure plate et des multiplications par 3, 4 ou 5 peuvent être relativement fréquentes.

Par ailleurs, le coefficient d'efficacité varie également fortement avec l'échelle à laquelle le calcul de capacité est réalisé. Gorecki et al. (IEA GHG, 2009) considèrent deux niveaux d'échelle de calcul :

- le calcul à l'échelle de la formation, c'est-à-dire selon leur définition, sur l'entièreté de cette formation géologique, i.e. sur toute sa zone d'existence, par exemple sur une unité aquifère entière. Sur une telle emprise, potentiellement très vaste, les paramètres utiles au calcul sont susceptibles de varier grandement. Les gammes de variation considérées sont donc larges. Le Tableau 4 présente les résultats obtenus en fonction de la lithologie :

Lithology	P10, %	P50, %	P90, %
Clastics	1.86	2.70	6.00
Dolomite	2.58	3.26	5.54
Limestone	1.41	2.04	3.27
All	1.66	2.63	5.13

Tableau 4 : P10, P50 et P90 du coefficient d'efficacité (E_E) pour différentes lithologies et l'échelle de la formation géologique (Gorecki et al. dans IEA GHG, 2009)

Ces valeurs sont en cohérence avec celles calculées par le NETL qui fournit, en fonction de ces trois mêmes lithologies, des valeurs variant entre 0.4 et 5.5% (NETL, 2010) ;

- le calcul à l'échelle du site. A cette échelle, beaucoup plus locale que la précédente, il est probable de disposer de paramètres plus précis, comme par exemple le ratio aire d'aquifère utile/aire totale d'aquifère ($\frac{A_n}{A_t}$) ou le ratio épaisseur de réservoir utile/ épaisseur totale de réservoir ($\frac{h_n}{h_g}$). Gorecki et al (IEA GHG, 2009) ont donc calculé les coefficients de stockage en considérant que la meilleure connaissance sur les paramètres précédents autorisait à considérer comme valeurs pour ces ratios les valeurs P90 de leur variation. Les résultats obtenus varient entre 3.28% et 27.77% selon les configurations (lithologie, environnement de dépôt et type de structure).

2.2 Propriétés pétrophysiques des couches cibles

Comme exposé précédemment, la capacité de stockage et la qualité d'un site vont dépendre entre autres des qualités réservoir de la formation cible considérée. Ainsi, la perméabilité renseigne sur la qualité d'injectivité tandis que la porosité est un élément de l'estimation de capacité de stockage.

Un travail de compilation de l'ensemble des informations pétrophysiques a donc été mené à partir des données des forages pétroliers dans l'objectif de caractériser les propriétés réservoir des couches cibles.

2.2.1 Inventaire des données pétrophysiques disponibles

De même que pour la chimie des eaux, les seules données pouvant apporter des informations pertinentes sur les propriétés pétrophysiques des séries carbonatées ciblées sont les forages pétroliers des zones investiguées.

Les soixante-treize dossiers de forages consultés pour la salinité des eaux l'ont également été pour rechercher les données pétrophysiques quantitatives disponibles (Tableau 5). Ces données proviennent soit de mesures effectuées sur des plugs de carottes (échantillons prélevés sur les carottes de forage) soit de calculs associés à des tests de formation. Les données de carottes renseignent sur les propriétés pétrophysiques très locales (les plugs mesurent quelques centimètres de côté) en fournissant des valeurs relatives à la matrice des réservoirs. Les données issues de tests de formation informent quant à elles sur un comportement plus global du niveau testé.

Devant la faible quantité de données quantitatives obtenues sur les porosités et perméabilités des formations, qui ne permettait pas de dresser des conclusions quant aux comportements attendus des cibles, il a été décidé d'élargir la compilation de données aux informations non quantifiées mais pouvant apporter des précisions sur les propriétés réservoir des cibles (Tableau 6). Ces informations consistent généralement en :

- Des pertes de la boue de forage ou des venues d'eau suite à la rencontre de niveaux de bonnes propriétés réservoir ; la qualité des terrains est en partie indiquée par les volumes concernés ;
- Les résultats des tests de formation réalisés qui visent à produire les fluides de formation et qualifier les terrains les contenant ; plus le débit est fort, meilleures sont les qualités réservoir ;

- Tout autre commentaire des opérateurs en lien avec les propriétés pétrophysiques et hydrauliques des formations cibles et des terrains environnants.

L'ANNEXE 6 précise ainsi de quel type de données –valeurs de porosité, valeurs de perméabilité ou informations qualitatives – chaque forage consulté dispose.

La Figure 7 et les ANNEXE 11 et ANNEXE 12 présentent les données collectées pour le Crétacé inférieur. La Figure 8 et les ANNEXE 13 et ANNEXE 14 présentent les données collectées pour le Jurassique supérieur.

De la même manière que pour la salinité, les informations relatives au Crétacé inférieur sont beaucoup moins nombreuses que pour le Jurassique supérieur (en particulier du fait de son inexistence sur une large part de la zone d'étude).

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Remarques
---------	--------	----------	-------------------------	-------	----------------------	--------------------	------------------------	--------------------------	--------------	-------------------	-----------

Tableau 5 : En-têtes des tableaux compilant les données pétrophysiques quantitatives pour les formations cibles (ANNEXE 11, ANNEXE 13)

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Données qualitatives	Remarques complémentaires
---------	--------	----------	-------------------------	-------	----------------------	---------------------------

Tableau 6 : En-têtes des tableaux compilant les données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations cibles (ANNEXE 12, ANNEXE 14)

Forages permettant de caractériser le réservoir du Crétacé inférieur

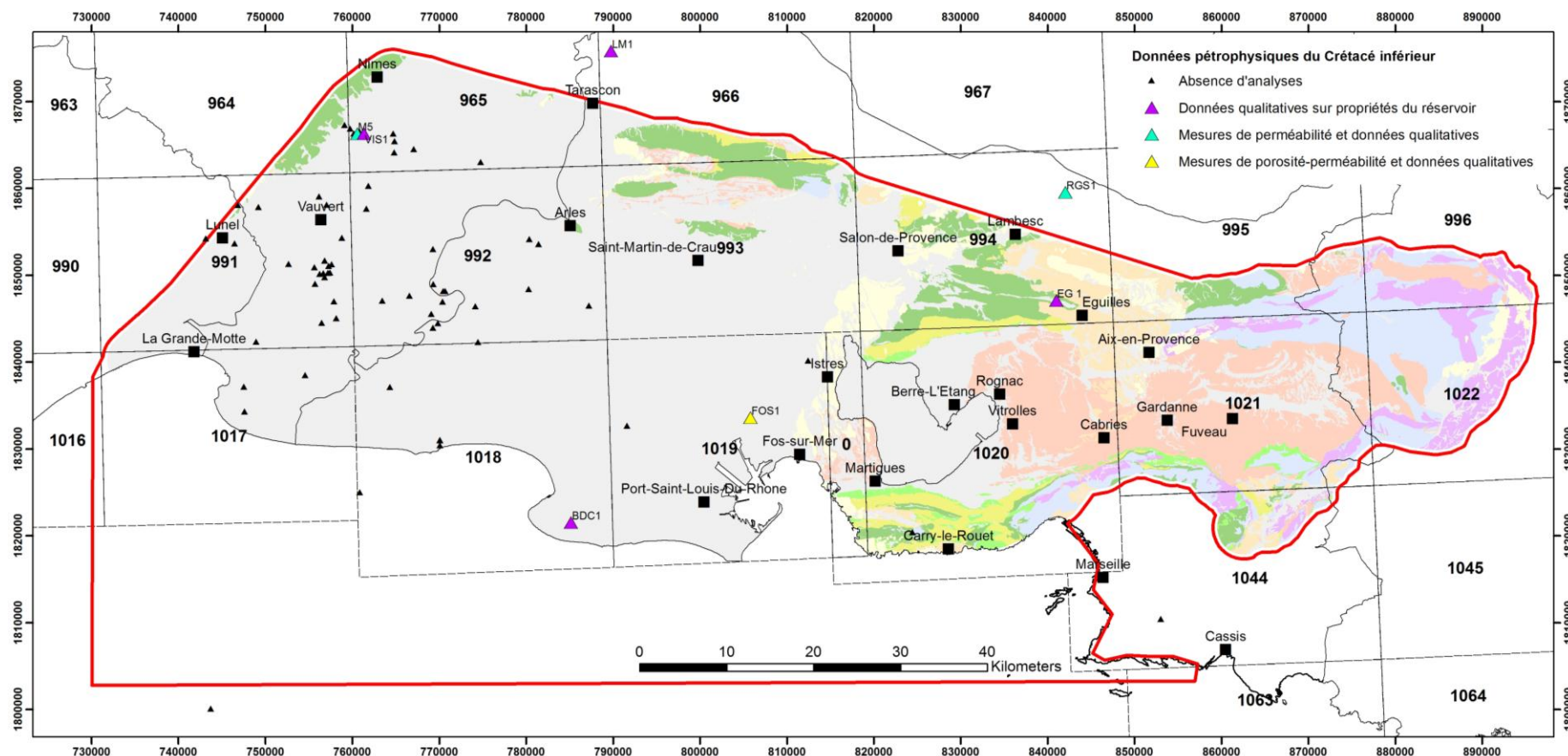


Figure 7 : Carte de position des forages disposant d'informations sur les propriétés réservoir pour le Crétacé inférieur (ANNEXE 11, ANNEXE 12)

Forages permettant de caractériser le réservoir du Jurassique supérieur

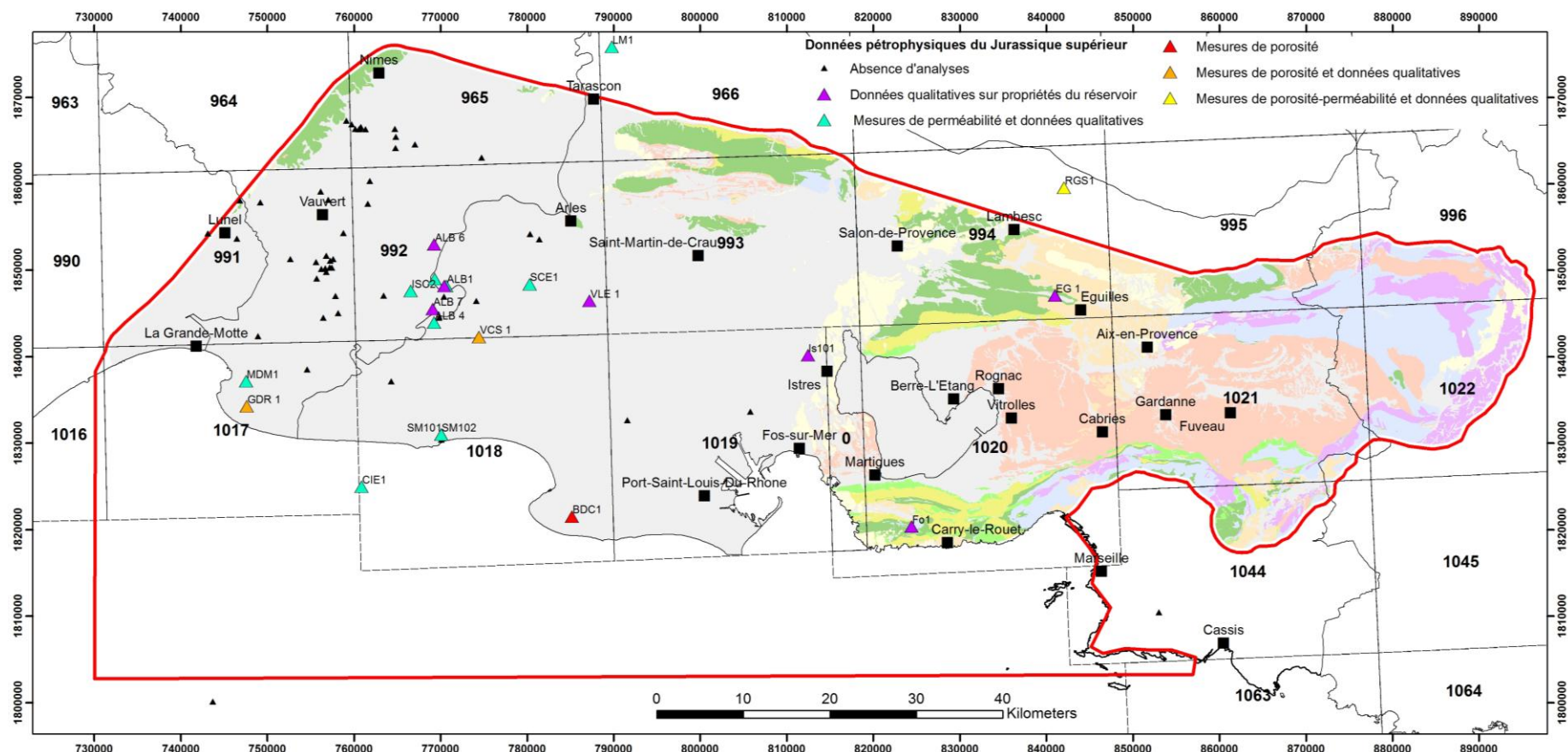


Figure 8 : Carte de position des forages disposant d'informations sur les propriétés réservoir pour le jurassique supérieur (ANNEXE 13, ANNEXE 14)

2.2.2 Evaluation des propriétés pétrophysiques des couches cibles

Malgré le fait que des données ont été collectées pour les deux formations cibles, il apparaît que ces informations sont largement insuffisantes pour caractériser les propriétés réservoir et surtout les quantifier.

Le Crétacé inférieur ne constitue finalement pas un réservoir retenu pour le stockage du CO₂ sur la zone d'étude. Les quelques données quantitatives et qualitatives réunies semblent montrer un aquifère dont les propriétés peuvent être bonnes (des pertes importantes ont pu être enregistrées), ce qui confirme l'idée générale concernant cet aquifère et les observations faites à faible profondeur (cet aquifère montre d'ailleurs, dans le Synclinal de l'Arc, des propriétés réservoir notables).

En ce qui concerne le Jurassique supérieur, les données sont largement plus nombreuses – même si elles sont encore insuffisantes pour pouvoir caractériser finement cet aquifère.

D'une part, ce niveau peut présenter des variations de facies relativement importantes semblant contrôler les propriétés réservoir :

- à Istres 101 par exemple, le Jurassique supérieur est constitué par des formations de calcaires plus ou moins micritiques, plus ou moins dolomitiques, à intercalations dolomitiques et quelques niveaux de dolomie microcristalline ; aucune mention de fracturation n'est signalée et les pertes observées en cours de forage ont été vite colmatées et n'ont apparemment pas attiré l'attention des opérateurs sur une qualité réservoir intéressante ;
- à Saintes-Maries-de-la-Mer 102, le Jurassique supérieur est composé essentiellement par des dolomies et calcaires dolomitiques vacuolaires à très fracturés, ce qui constitue d'ores et déjà des facies très favorables ; en complément, les documents de forages font état d'un excellent réservoir.

D'autre part, les données qualitatives recueillies montrent à plusieurs reprises que les formations du Jurassique supérieur peuvent constituer de bons à d'excellents réservoirs. Cet aquifère peut donc présenter de bonnes propriétés réservoir et correspond alors à un aquifère de type fracturé et karstifié.

Malheureusement, les données quantitatives ne sont pas suffisantes pour en tirer des règles générales et caractériser finement les propriétés pétrophysiques de cet aquifère. Les deux principaux forages échantillonnés (Vaccars 1 et Saintes-Maries-de-la-Mer 101) ne permettent pas de dégager de moyennes représentatives puisque les deux gammes de valeurs de porosité mesurées sont d'environ 6 à 17 % à Vaccars 1 et de 0,5 à 5,5 % à Saintes-Maries-de-la-Mer 101 (SMM101). De plus, identifier une valeur moyenne de porosité pour la matrice peut ne pas être pertinent lorsque l'aquifère est de type fracturé et karstifié comme on le suppose ici⁷.

Les données collectées ne permettent donc de caractériser quantitativement et finement les formations cibles. Néanmoins, grâce notamment aux données qualitatives, il est globalement possible d'estimer les propriétés réservoir globales attendues pour chaque site identifié (Tableau 2 et Tableau 3). Les propriétés du Jurassique supérieur dépendront donc de facteurs faciologiques et du degré de fracturation et de karstification.

⁷ Les mesures de porosité réalisées en laboratoire à partir de carottes ne sont pertinentes que pour la matrice des roches (hors fractures et karst-vacuoles importantes) puisque les échantillons sur lesquelles sont évaluées les porosités ne mesurent que quelques centimètres de côté. De telles mesures n'intègrent donc pas du tout les composantes fracturation et karstification qui améliorent sensiblement les propriétés réservoir d'une formation géologique.

2.3 Evaluation des capacités de stockage des sites potentiels identifiés

Pour chacun des sites identifiés précédemment, une gamme de variation possible de chacun des paramètres rentrant dans le calcul des capacités de stockage est définie en fonction des connaissances disponibles. Cette gamme (P10, P50, P90) représente la variation possible estimée des différents paramètres avec un intervalle de confiance de 80%.

Pour chacun des sites également, les coefficients d'efficacité sont estimés en fonction du degré de connaissance et de la publication de Gorecki et al. (2009), elle-même en partie inspirée par celle du NETL (2010). Le Tableau 7 présente ainsi les coefficients d'efficacité obtenus ainsi que les variations considérées pour chacune de leurs composantes.

P	E _{geol}			E _v	E _d	E _E (%)
	A _n /A _t	h _n /h _g	φ _{eff} /φ _{tot}			
P10	0,8	0,65	0,61	0,525	0,515	8,58
P50	0,8	0,65	0,67	0,57	0,53	10,53
P90	0,8	0,65	0,72	0,575	0,53	11,41

Tableau 7 : P10, P50 et P90 du coefficient d'efficacité calculés pour les sites identifiés

Les ratios individuels de E_{geol} et les coefficients E_v et E_d ont été déterminés en considérant parmi les simulations de Gorecki et al. (IEA GHG, 2009) :

- les lithologies « Dolomite » et « Limestone » ;
- l'environnement de dépôt « Sallow shelf ». Celui-ci ne correspond pas à l'environnement de dépôt des carbonates étudiés mais est celui qui s'en rapproche le plus parmi les environnements disponibles dans la publication ;
- que l'on connaissait suffisamment bien les aires et les épaisseurs en jeu pour considérer les P90 des variations respectives de chaque ratio [NB : l'incertitude sera apportée par la gamme de variation sur les paramètres « aire » et « épaisseur » eux-mêmes dans les calculs de capacité].

Les Tableau 8 et Tableau 9 présentent les paramètres estimés et les résultats de capacités⁸ associées pour chaque site retenu, respectivement dans les cas de base et les cas « optimistes » s'il y en a. L'ANNEXE 15 fournit à titre indicatif les paramètres et résultats équivalents pour les structures non retenues comme sites potentiels.

Les paramètres estimés, présentés sous forme de P10, P50 et P90 pour chacun des sites et qui permettront d'effectuer les calculs de capacité selon la formule (1) (paragraphe 2.1) sont les suivants :

- la surface du site considéré ; ce paramètre définit si l'on se trouve en cas de base ou cas « optimiste », i.e. si les contours des sites sont délimités de manière plus restrictive (sites en rouge dans la figure XXX) ou de manière plus large (sites en vert dans la figure XXX), en fonction des données considérées (gravimétrie ou isopaques du Cénozoïque). Les gammes de variation classique appliquée à la surface moyenne calculée par SIG sont respectivement : P10 = 0.7 x P50 et P90 = 1.2 x P50. Dans le cas du Haut d'Albaron, structure disposant de nombreux forages et nettement identifiable sur la gravimétrie, la variation est moindre autour de la valeur moyenne : +/- 10% ;
- l'épaisseur totale du réservoir ; lorsqu'aucune donnée de forage ou de sismique ne fournit d'épaisseur propre du piège au site considéré, les valeurs moyennes et limites de l'épaisseur « vraie »⁹ du Jurassique supérieur sont appliquées ;

⁸ Les calculs de capacité de stockage sont présentés sous forme de valeurs « P10, P50 et P90 ». Il faut noter que chacune de ces valeurs correspond simplement aux produits des paramètres correspondants (P10, P50, P90).

⁹ L'épaisseur « vraie » correspond à l'épaisseur stratigraphique totale du Jurassique supérieur seul lorsqu'il a été traversé dans son ensemble par le forage (i.e. qu'il est recouvert par une couverture

- le ratio du volume du piège par rapport au volume du parallélépipède correspondant ; en effet, dans la formule (1) (paragraphe 2.1), le volume du piège est exprimé par le produit $A \times h$, volume d'un parallélépipède. Or, aucune des structures ne correspond tout à fait à un parallélépipède. Un ratio correctif est donc appliqué : élevé lorsqu'il s'agit d'un horst, forme qui se rapproche du parallélépipède et moyen lorsqu'il s'agit d'une structure anticlinale¹⁰ ;
- la porosité ; étant donné la méconnaissance de ce paramètre, il a été décidé arbitrairement de fixer respectivement les P10, P50 et P90 à 10, 15 et 20 % ;
- la densité du CO₂ correspond à une valeur moyenne calculée sur l'intervalle de profondeur entre le toit et la base du piège considéré à partir de l'équation d'état de Peng-Robinson (<http://lnx.lbl.gov/gaseos/gaseos.html>) ; les gradients classiques d'augmentation de pression et de température et une température moyenne en surface de 16°C sont utilisés pour les calculs de densité.
- les coefficients d'efficacité calculés précédemment.

Les résultats montrent que les sites du Haut d'Albaron, de la structure de Mas-de-Madame et de la structure des Saintes-Marie-de-la-Mer pour le Dogger présentent en P50 pour le cas de base des capacités de stockage appréciables, comprises entre environ 80 et 180 Mt. La structure de Cicendèle présente des volumes beaucoup plus réduits, même dans le cas « optimiste », essentiellement en raison de sa faible profondeur et donc de la faible valeur de la densité de CO₂, ainsi que de la limitation de volume du fait que ce soit un anticlinal sur rampe.

Les incertitudes sur les paramètres de calcul sont néanmoins très importantes, ce qui engendre des variations notables entre les différents cas de figures possibles (capacités P10 à P90 pour un même site, cas de base et cas « optimiste »). Les variations possibles sont telles que les capacités en jeu peuvent correspondre à des volumes relativement limités comme à des volumes très importants. Affiner la connaissance et la précision des paramètres de calcul est donc primordial afin de manipuler des capacités plus réalistes.

stratigraphique et donc n'a pas été érodé). Quatre forages seulement (Istres 101, La Jassette 1, Rognes 1 et Jouques 1) sur la zone d'étude et ses environs fournissent une information sur cette grandeur. La valeur minimale est d'environ 500 m, la valeur moyenne est d'environ 800 m et la valeur maximale observée est d'environ 1300 m.

¹⁰ Le ratio de 0.5 a été calculé en se basant sur les rapports de volume entre une « calotte sphérique » et le parallélépipède la contenant et a été généralisé aux structures anticlinales.

Sites		Haut d'Albaron			Structure de Mas-de-Madame			Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer - Dogger			Structure de Cicendèle		
Paramètres		P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90
Surface	km2	57,15	63,5	69,85	41,02	58,6	70,32	40,25	57,5	69	22,96	32,8	39,36
Epaisseur totale du réservoir	m	700	865	1000	500	800	1300	200	285	350	100	153	300
Ratio volume piège / volume parallélépipède		0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
Porosité		0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Densité du CO2 (moyenne sur gamme de profondeurs concernées)	kg/m3	260	260	260	290	290	290	566	566	566	180	180	180
EE	P10	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	9,90	9,90	9,90	8,58	8,58	8,58
	P50	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	12,14	12,14	12,14	10,53	10,53	10,53
	P90	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	13,17	13,17	13,17	11,41	11,41	11,41
Capacités de stockage (Mt) - cas de base	P10	62	147	280	36	140	409	18	69	162	1	6	22
	P50	77	180	344	44	172	502	22	84	199	2	7	27
	P90	83	196	373	48	186	544	24	92	216	2	8	29

Tableau 8 : Paramètres de calcul et résultats des estimations de capacités de stockage dans le cas de base pour les sites potentiels

Sites		Haut d'Albaron			Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer - Dogger			Structure de Cicendèle		
Paramètres	Unité	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90
Surface	km2	71,89	102,7	123,24	52,29	74,7	89,64	86,94	124,2	149,04
Epaisseur totale du réservoir	m	700	865	1000	200	285	350	100	153	300
Ratio volume piège / volume parallélépipède		0,7	0,8	0,9	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
Porosité		0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Densité du CO2 (moyenne sur gamme de profondeurs concernées)	kg/m3	260	260	260	566	566	566	180	180	180
EE	P10	8,58	8,58	8,58	9,90	9,90	9,90	8,58	8,58	8,58
	P50	10,53	10,53	10,53	12,14	12,14	12,14	10,53	10,53	10,53
	P90	11,41	11,41	11,41	13,17	13,17	13,17	11,41	11,41	11,41
Capacités de stockage (Mt) - cas optimiste	P10	79	238	495	23	89	211	5	22	83
	P50	96	292	607	29	110	259	7	27	102
	P90	105	316	658	31	119	281	7	29	110

Tableau 9 : Paramètres de calcul et résultats des estimations de capacités de stockage dans le cas « optimiste » pour les sites potentiels

3 Perspectives pour des études complémentaires

Il est important de garder en tête que l'étude menée s'est attachée à :

- une emprise géographique donnée
- et à deux cibles géologiques présélectionnées.

Il pourrait être intéressant de compléter le travail déjà réalisé par des investigations :

- sur des zones géographiques très peu renseignées comme la zone de transition entre la Crau et la Camargue qui peut peut-être receler des structures intéressantes, comme par exemple la structure secondaire vers le nord-est de la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer, pouvant éventuellement se situer à des profondeurs plus favorables ;
- sur des zones géographiques non incluses dans la présente étude ; à titre d'exemple, la zone offshore semble présenter des structures d'intérêt important dans sa partie occidentale mais qui n'ont pu être caractérisées géométriquement faute de sismique retraitée alors que de nombreux profils existent dans cette région ; un retraitement de ces lignes et une interprétation homogène, si possible calée sur des données de forages pourraient donc largement améliorer la connaissance de ces structures ;
- sur des cibles géologiques différentes telles que par exemple le réservoir du Dogger identifiée aux Saintes-Maries-de-la-Mer, non initialement compris dans les objectifs de l'étude ; en revanche de tels travaux pourraient être rendus très difficiles par le manque de données profondes, vu les contraintes déjà fortes sur le Crétacé inférieur et le Jurassique supérieur.

Un certain nombre de travaux complémentaires peuvent être suggérés afin de progresser sur la connaissance géométrique des sites et des zones peu renseignées :

- retraitement sismique en offshore, les quatre lignes disponibles dans VASCO étant largement insuffisantes pour imager les géométries du sous-sol ; en particulier, ces compléments pourraient permettre de caractériser plus précisément les structures de Mas-de-Madame et de Cicendèle ;
- acquisitions sismiques à terre, ciblées sur les plans d'eau (pour des raisons économiques) comme l'étang de Vaccarès, situé au nord - nord-est de la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer et à la transition entre les domaines de la Crau et de la Camargue ;
- des acquisitions complémentaires en gravimétrie seraient très utiles, aussi bien à terre dans les zones d'intérêt peu échantillonnées qu'en mer où de grandes lacunes d'acquisition existent ; la gravimétrie s'est révélée être un excellent et indispensable outil de prédiction de la géométrie des structures conservées sous la couverture cénozoïque ;

Par ailleurs, afin d'améliorer la caractérisation des formations géologiques en jeu, les études suivantes pourraient également être menées :

- l'étude grâce aux données d'affleurement (campagnes de terrain), de forages et de carottes des variations faciologiques et type d'aquifère attendu ;
- la caractérisation des propriétés pétrophysiques des séries cibles et des couvertures par traitement des données de forages si cela est possible et analyses des carottes et/ou par une caractérisation du degré de fracturation ou de la karstification en fonction de l'histoire géologique des différents terrains et zones géographiques ;
- l'amélioration des connaissances sur les couvertures, en termes de qualité et variabilité, grâce à des études de terrain et corrélation avec les données de forages.

Il faut enfin bien retenir également que les travaux menés sont pertinents à l'échelle régionale, étant donné la faible densité de données à disposition. Pour toute étude plus locale – sur un site par exemple- l'acquisition de données plus nombreuses d'avèrera indispensable.

Conclusion

L'objectif de cette tâche était d'identifier les zones favorables au stockage géologique du CO₂ dans l'emprise de la zone d'étude et pour les deux formations cibles considérées et d'estimer des premières capacités de stockage au sein de ces sites.

La tâche précédente du projet VASCO (5.1) avait permis de caractériser la géométrie des terrains tertiaires et quaternaires recouvrant les formations cibles et de qualifier celles des couches cibles, notamment au travers de l'interprétation sismique de 44 profils sismiques et de la réalisation d'une carte de synthèse sur la structuration des séries pré-rift.

La prise en compte et la combinaison de critères de sélection relatifs à la salinité des aquifères cibles, la géométrie des couches cibles et la présence ou non de couverture efficace a permis d'identifier quatre sites favorables au stockage géologique de CO₂. La synthèse structurale issue de la tâche 5.1 a entre autre permis de mettre en évidence que deux types de structures sont favorables au stockage : les horsts, structures liées à un régime extensif et les anticlinaux sur rampe, liées à des épisodes compressifs.

Grâce aux données disponibles (données de forages, de sismique, de gravimétrie), les caractéristiques majeures de chaque site ont pu être décrites, qualitativement et quantitativement. Des premières estimations de capacités de stockage ont enfin pu être calculées grâce à ces estimations de paramètres. Elles montrent des capacités de stockage significatives dans la zone d'étude mais le processus de calcul a aussi démontré la nécessité de disposer de paramètres plus précis sur les formations et les sites potentiels pour être en mesure de fournir des estimations de capacité plus fiables.

Bibliographie

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. NOR: SANP0720201A. JORF n°31 du 6 février 2007 page 2180, texte n° 17. <http://www.journal-officiel.gouv.fr/>

Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Buruss R., Holloway S., Christensen N. P., Mathiassen O. M., 2007. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. International Journal of Greenhouse gas control.

Bouc O., Fabriol H., Brosse E., Kalaydjian F., Farret R., Gombert Ph., Berest P., Lagneau V., Pereira JM, Fen-Chong T., 2012. Lignes de conduit pour la sécurité d'un site de stockage géologique de CO₂. Rapport BRGM/RP-60369-FR.

BRGM, 2012. Reconstruction géométrique des couches cibles pour le stockage géologique de CO₂ en aquifères salins. PROJET VASCO - Phase 5 : Stockage en aquifères salins - Tâche 5.1. Rapport final

CSLF, 2007. Estimation of CO₂ storage capacity in geological media – Phase 2. Phase II Final report from the Task Force for review and identification of standards for CO₂ storage capacity estimation. CSLF-T-2008-04.

<http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityEstimationTaskForce0408.pdf>

CSLF, 2008. Comparison between methodologies recommended for estimation of CO₂ storage capacity in geological media - "Phase III report. CSLF-T-2008-04.

<http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf>

Décret n° 2011-1411 du 31 octobre 2011 relatif au stockage géologique de dioxyde de carbone afin de lutter contre le réchauffement climatique. NOR: DEVR1118638D. JORF n°0254 du 1 novembre 2011 page 18415, texte n° 10. <http://www.journal-officiel.gouv.fr/>

Durozoy G., Gouvernet Cl., Guieu G., Sauzedde E., 1966. Le bassin de Gardanne (Bouches-du-Rhône) - Nouvelles données sur l'hydrogéologie et compléments d'études possibles. Rapport BRGM DSGR.66.A35.

<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/66-DSGR-A-035>

Grataloup S., Bonijoly D., Brosse E., Dreux R., Garcia D., Hasanov V., Lescanne M., Renoux P., Thoraval A., 2008. A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: case of the Paris Basin. GHGT-9, poster.

Grataloup S., Bonijoly D., Brosse E., Dreux R., Garcia D., Hasanov V., Lescanne M., Renoux P., Thoraval A., 2009a. A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: case of the Paris Basin. GHGT-9, Energy Procedia, 2929-2936.

<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/48/94/56/PDF/DG-EP-1-1-2929.pdf>

Grataloup, S., Bonijoly D., Brosse E., 2009b. CO₂ storage in deep saline aquifers: from basin screening to site selection in the Paris Basin. Proceedings of the IFP conference "Deep Saline Aquifers for Geological Storage of CO₂ and Energy", Rueil Malmaison, May 2009.

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>

IEA GHG, 2009. Development of storage coefficients for CO₂ storage in deep saline formations. Report n° 2009/13.

Moulin M., avec la collaboration de Dufour P., 2010. Etude hydrogéologique des ressources en eaux souterraines profondes du bassin d'Aix - Gardanne. Synthèse des résultats de la dernière phase : bilan et conclusion. Rapport BRGM/RP-57641-FR.

<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-57641-FR>

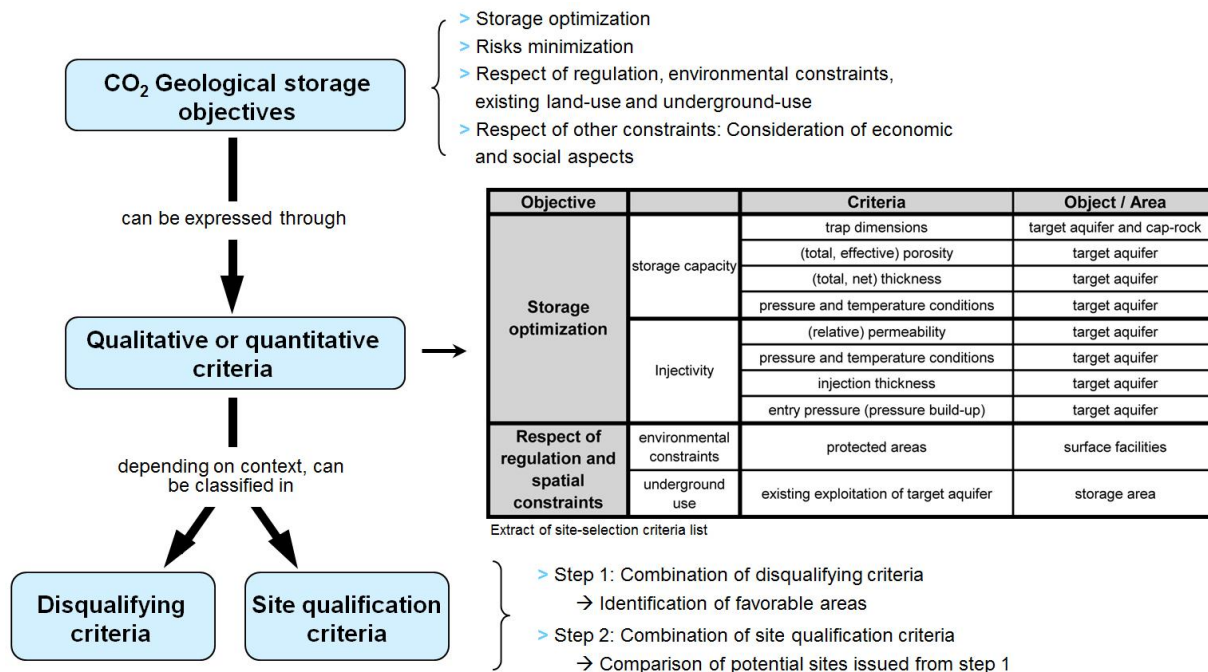
NETL, 2010. Carbon sequestration atlas of the United States and Canada. Third Edition.
http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/atlasIII/2010atlasIII.pdf

Rouire J., L'Homer A., Blanc J.-J. et Gabert J., 1979. Carte Géologique de la France à 1/250 000, Feuille n°39, Marseille. Edition BRGM. Orléans.

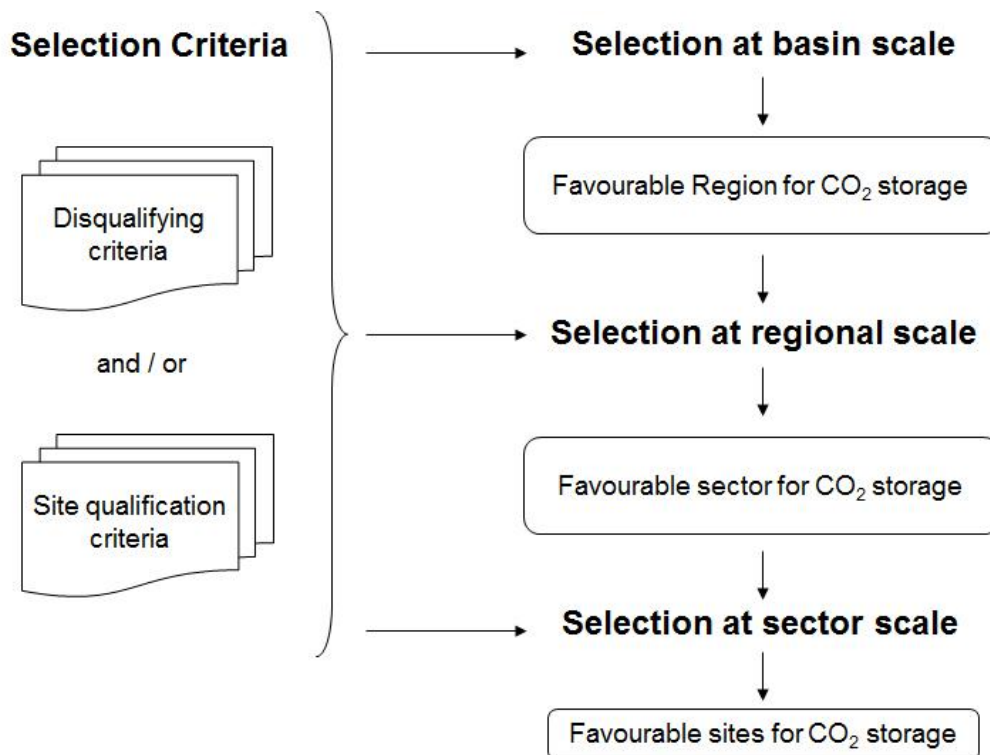
Annexes

ANNEXE 1 : Principes de la sélection de site pour le stockage géologique de CO₂	43
ANNEXE 2 : Eléments d'un stockage géologique de CO₂	44
ANNEXE 3 : Diagramme de phase du CO₂	45
ANNEXE 4 : Densité du CO₂ en fonction de la profondeur	46
ANNEXE 5 : Types de pièges pour le stockage géologique de CO₂	47
ANNEXE 6 : Liste des forages pétroliers et miniers consultés pour la compilation des données de salinité et de pétrophysique	48
ANNEXE 7 : Données de salinité et analyses d'eau compilées pour le Crétacé inférieur	50
ANNEXE 8 : Données de salinité et analyses d'eau compilées pour le Jurassique supérieur	51
ANNEXE 9 : Notions de salinité	53
ANNEXE 10 : Exemple d'abaque fournissant la densité du CO₂ (en kg/m³) en fonction de la pression et de la température	54
ANNEXE 12 : Données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations du Crétacé inférieur	56
ANNEXE 13 : Données pétrophysiques quantitatives compilées pour le Jurassique supérieur	57
ANNEXE 14 : Données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations du Jurassique supérieur	60
ANNEXE 15 : Calculs de capacité indicatifs pour les structures non retenues comme favorables au stockage	63

ANNEXE 1 : Principes de la sélection de site pour le stockage géologique de CO₂



Modifié d'après Grataloup *et al.*, 2008



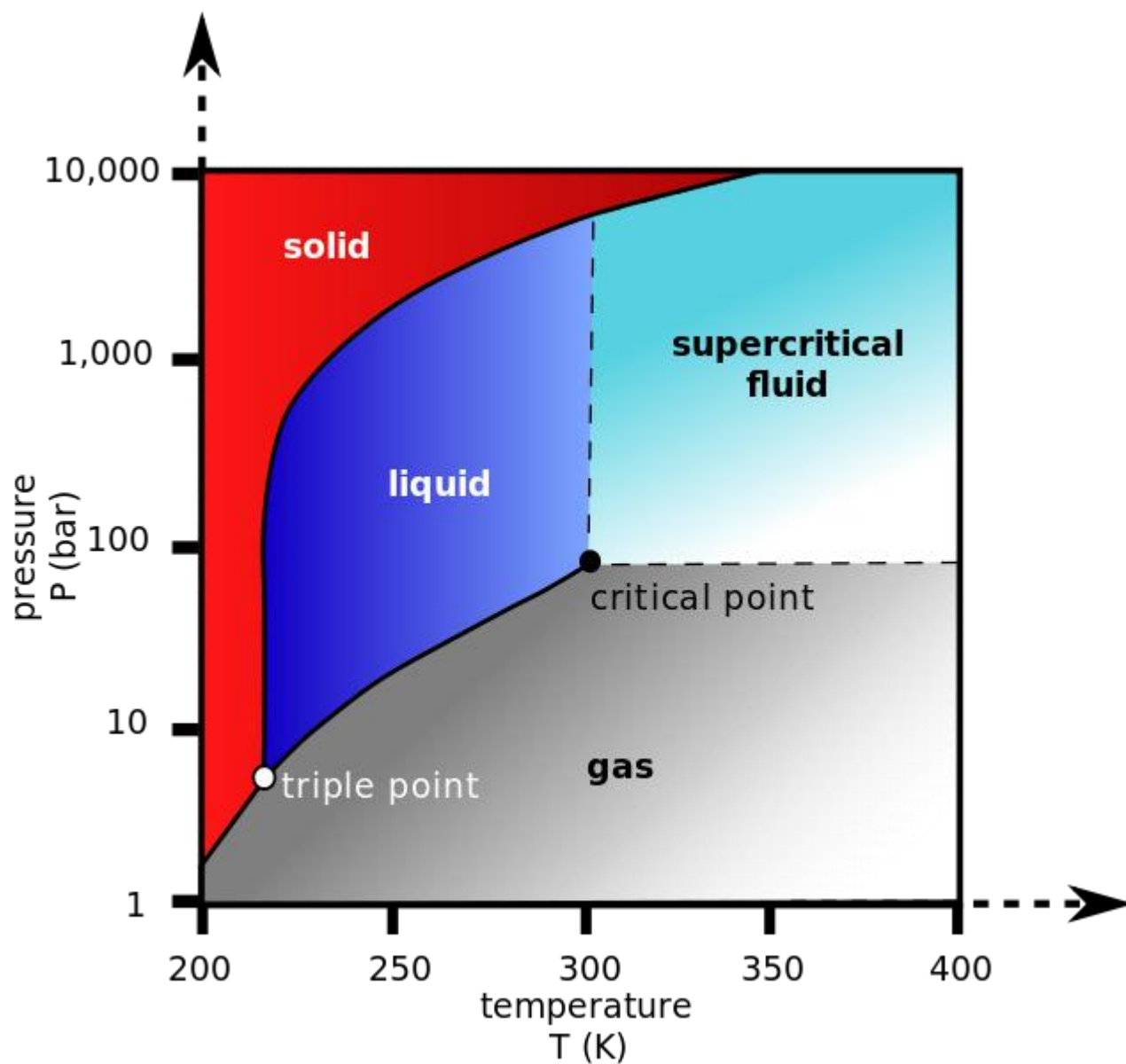
Modifié d'après Grataloup *et al.*, 2009b

ANNEXE 2 : Eléments d'un stockage géologique de CO₂



<http://www.co2crc.com.au/aboutccs/>

ANNEXE 3 : Diagramme de phase du CO₂



http://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_fluid

Rappel :

$$T_K = T_C + 273,15$$

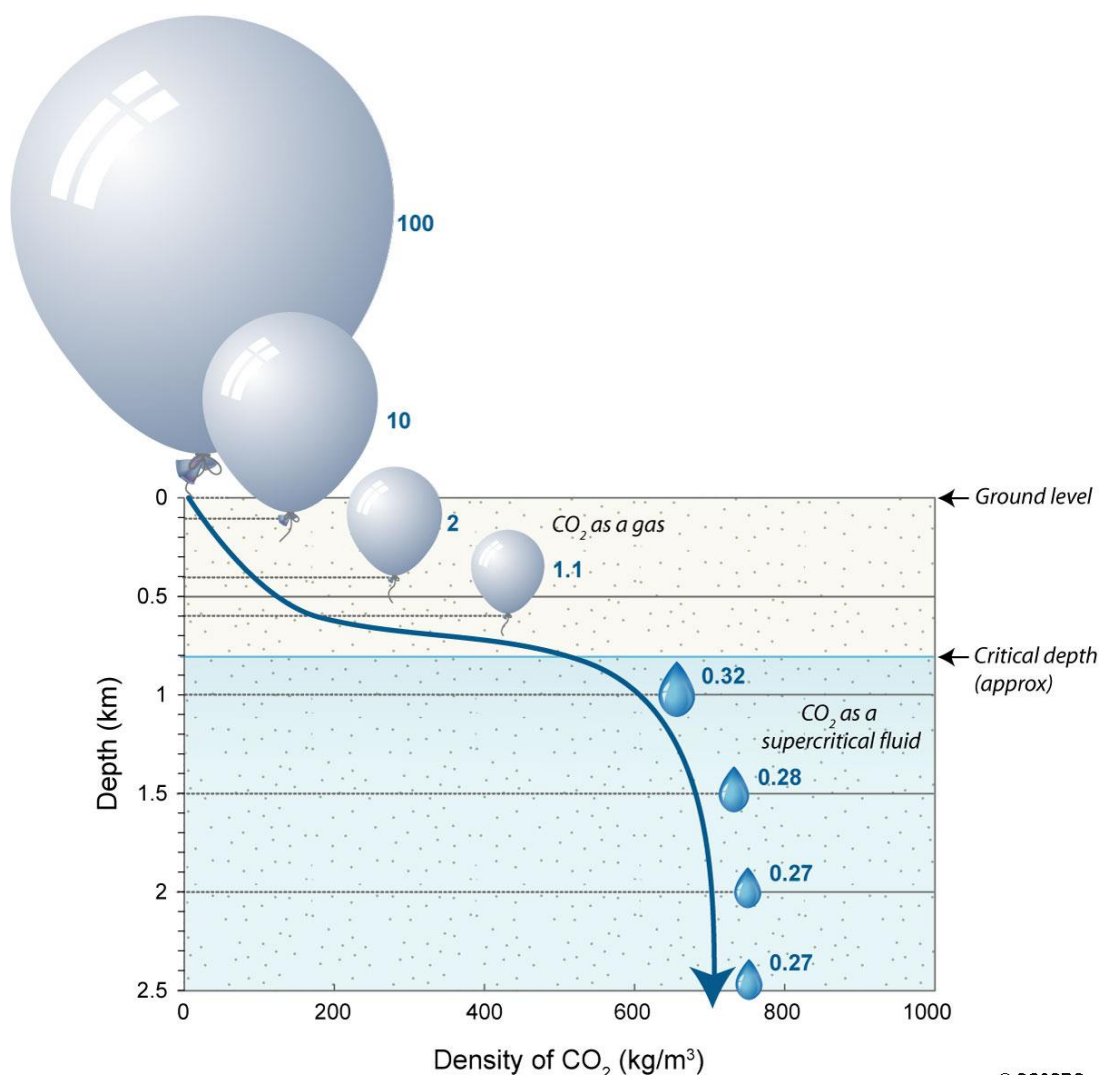
avec :

- T_K la température en Kelvin.
- T_C la température en °C.

ANNEXE 4 : Densité du CO₂ en fonction de la profondeur

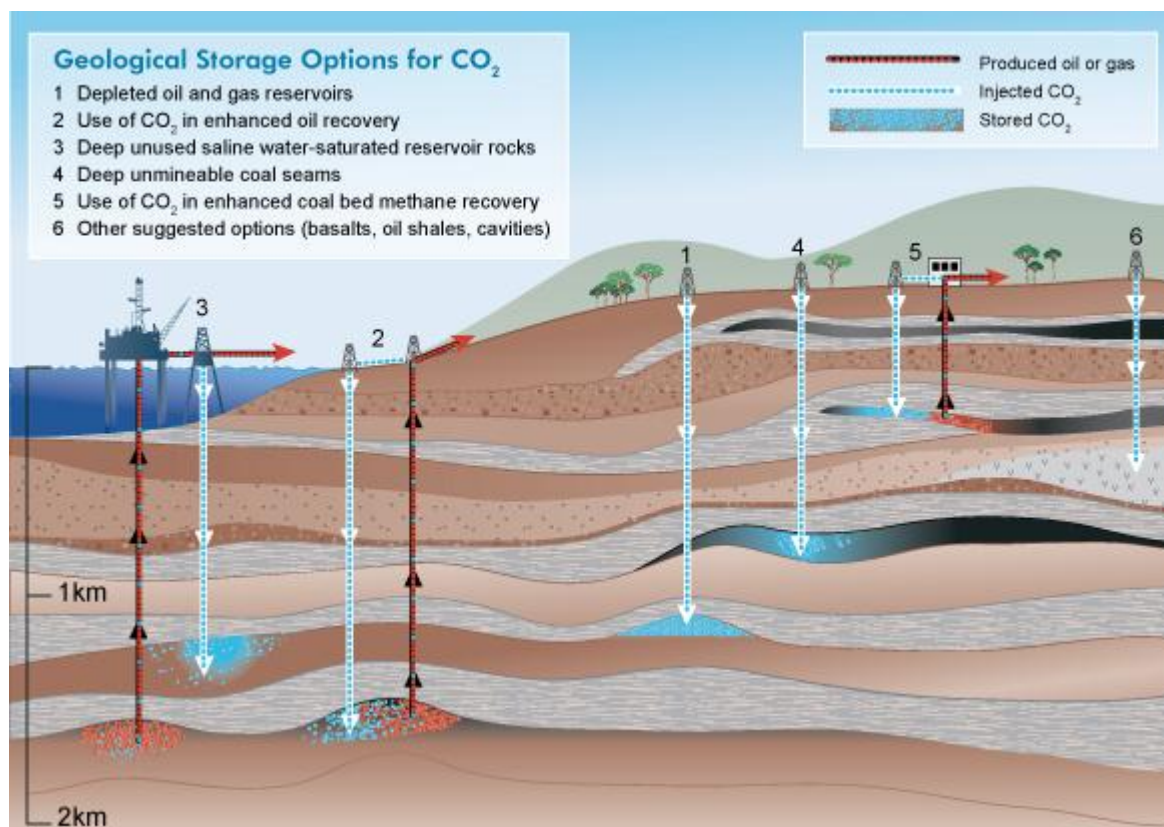
Le gradient géothermique considéré est de 25°C/km, avec une température de surface de 15°C. La pression est considérée hydrostatique.

Le point critique au-delà duquel le CO₂ est dans un état supercritique se situe à : 31°C et 73 bars. La profondeur minimale nécessaire pour assurer ces conditions, en considérant les gradients précédemment exposés, est de 800M (appelée "profondeur critique" dans la figure).



http://www.co2crc.com.au/aboutccs/stor_injecting.html

ANNEXE 5 : Types de pièges pour le stockage géologique de CO₂



<http://www.co2crc.com.au/aboutccs/storage>

ANNEXE 6 : Liste des forages pétroliers et miniers consultés pour la compilation des données de salinité et de pétrophysique

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	X (m) Lambert 2E	Y (m) Lambert 2E	Zsol (m)	Ztable (m)	Référence	Donnée de salinité Crétacé inférieur	Donnée de salinité Jurassique supérieur	Analyses d'eau	Donnée quantitative de porosité Crétacé inférieur	Donnée quantitative de perméabilité Crétacé inférieur	Donnée qualitative sur les propriétés réservoir Crétacé inférieur	Donnée quantitative de porosité Jurassique supérieur	Donnée quantitative de perméabilité Jurassique supérieur	Donnée qualitative sur les propriétés réservoir Jurassique supérieur
Crau - Alpilles sud	10193X0066	18-1170	FOS 1	FOS1	805823	1833613	2	5,3	table	X			X	X	X			
Crau - Alpilles sud Synclinal de l'Arc	10194X0117	18-1278	ISTRES 101	Is101	812459	1840168	28,1	33,2	table									X
Fossé de Camargue	10174X0201	18-1151	AIGUES-MORTES 1	AM1	754586	1838494	3,26	-	sol									
Fossé de Camargue	09926X0001	18-1048	ALBARON 1	ALB1	770685	1848166	1,43	-	sol		X	X				X		X
Fossé de Camargue	09926X0011	18-1349	ALBARON 101	ALB101	770463	1848165	1,9	11,1	table									X
Fossé de Camargue	09926X0002	18-1062	ALBARON 2	ALB 2	774153	1846420	2,16	-	sol									
Fossé de Camargue	09926X0003	18-1049	ALBARON 3	ALB3	769336	1848983	1,27	-	sol		X					X		X
Fossé de Camargue	09926X0004	18-1063	ALBARON 4	ALB 4	769271	1843938	1,83	-	sol		X	X				X		X
Fossé de Camargue	09926X0201	18-1064	ALBARON 5	ALB 5	770396	1846936	1,00	-	sol									
Fossé de Camargue	09922X0206	18-1065	ALBARON 6	ALB 6	769274	1852992	1,40	-	sol									X
Fossé de Camargue	09926X0202	18-1066	ALBARON 7	ALB 7	769101	1845533	1,00	-	sol									X
Fossé de Camargue	09926X0005	18-1067	ALBARON 8	ALB 8	769853	1844482	1,00	-	sol									
Fossé de Camargue	09923X0002	18-1053	ARLES 1	ARL-CD 1	781442	1853569	3,90	-	sol									
Fossé de Camargue	09923X0001	18-1054	ARLES 2	ARL-CD 2	780356	1854159	2,72	-	sol									
Fossé de Camargue	09914X0040	18-1123	AUBORD 1	AUB 1	756179	1859063	16,51	19,67	table									
Fossé de Camargue	10181X0064	18-1350	BAUMELLES 1D	BAM1D	764328	1837131	1,67	-	sol									
Fossé de Camargue		18-1244	BEAUDUC 1	BDC1	784875	121666	1,3	-	sol	X					X	X		
Fossé de Camargue	09655X0082	18-1120	CAISSARGUES 1	CAI 1	764721	1866313	53,00	55,39	table									
Fossé de Camargue	09655X0087	18-1148	CAISSARGUES 2	CAI2	764863	1865421	62,63	-	sol									
Fossé de Camargue	09655X0081	18-1122	CAMPAGNE 1	CAM 1	764815	1864125	83,70	86,54	table									
Fossé de Camargue	09918X0010	18-1149	CHARNIER 1	CHA 1	757876	1846988	0,72	-	sol									
Fossé de Camargue	09921X0010	18-1147	COSTIERES 1	COS 1	761629	1857670	109,24	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0164	18-1353	CROS DE LAGNON 1	CDL1	757402	3151375	15	19,3	table									
Fossé de Camargue	09918X0001	18-1125	GALLICIAN 1	GAL1	756678	1850214	3,93	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0002	18-1133	GALLICIAN 2	GAL 2	756252	1850135	6,41	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0003	18-1146	GALLICIAN 3	GAL 3	757200	1850269	1,12	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0004	18-1137	GALLICIAN 4	GAL 4	757452	1850296	0,88	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0005	18-1138	GALLICIAN 5	GAL 5	757213	1850278	1,08	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0006	18-1144	GALLICIAN 6	GAL 6	755633	1850910	23,25	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0007	18-1140	GALLICIAN 7	GAL 7	756816	1849771	0,79	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0008	18-1141	GALLICIAN 8	GAL 8	755708	1849005	0,39	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0009	18-1158	GALLICIAN 9	GAL 9	757267	1851077	15,00	19,50	table									
Fossé de Camargue	09656X0096	18-1052	GARONS 1	GAS1	767079	1864525	90,25	-	sol									
Fossé de Camargue	09921X0011	18-1058	GENERAC 1	GEN 1	761851	1860281	80,00	-	sol									
Fossé de Camargue	10173X0001	18-1127	GRAU-DU-ROI 1	GDR 1	747620	1834291	1,50	3,93	table		X	X				X		X
Fossé de Camargue	09925X0201	18-1163	ISCLES 1	ISC1	763210	147166	1,5	4,8	table									
Fossé de Camargue	09925X0202	18-1176	ISCLES 2	ISC2	766337	147734	0,81	4,11	table		X	X						
Fossé de Camargue	09917X0016	18-1240	MARETTE 1	MRT1	748920	1842341	0,84	-	sol							X		X
Fossé de Camargue	09917X0017	18-1143	MARSILLARGUES 1	MSG1	752658	1851274	2,81	4,75	table									
Fossé de Camargue	10173X0015	18-1336	MAS-DE-MADAME 1	MDM1	747547	1837166	1	3,35	table		X						X	X
Fossé de Camargue	09648X0023	18-1041	MILHAUD 1	M1	759129	1867284	26,42	-	sol									
Fossé de Camargue	09655X0084	18-1042	MILHAUD 2	M2	759741	1866860	22,53	-	sol									
Fossé de Camargue	09655X0085	18-1043	MILHAUD 3	M3	760707	1866400	20,50	23,34	table									
Fossé de Camargue	09655X0045	18-1262	MILHAUD 3bis	M3bis	760816	1866554	21,18	-	sol									
Fossé de Camargue	09655X0086	18-1044	MILHAUD 4	M4	760172	1866304	20,95	23,79	table									
Fossé de Camargue	09655X0036	18-1264	MILHAUD 5	M5	760598	1866286	20,87	-	sol	X		X		X	X			
Fossé de Camargue	09918X0011	18-1126	MONTCALM 1	MM 1	756468	1844488	2,51	7,01	table									
Fossé de Camargue	09918X0012	18-1145	MONTCALM 2	MM2	758177	1845026	1,47	-	sol									
Fossé de Camargue	10195X0005	18-1124	PEAUDURE 1	PDE 1	791613	1832647	1,20	4,40	table									
Fossé de Camargue	09914X0001	18-1259	PIERREFEU 1	PRF1	758800	1854295	67,4	-	sol									

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	X (m) Lambert 2E	Y (m) Lambert 2E	Zsol (m)	Ztable (m)	Référence	Donnée de salinité Crétacé inférieur	Donnée de salinité Jurassique supérieur	Analyses d'eau	Donnée quantitative de porosité Crétacé inférieur	Donnée quantitative de perméabilité Crétacé inférieur	Donnée qualitative sur les propriétés réservoir Crétacé inférieur	Donnée quantitative de porosité Jurassique supérieur	Donnée quantitative de perméabilité Jurassique supérieur	Donnée qualitative sur les propriétés réservoir Jurassique supérieur
Fossé de Camargue	09927X0001	18-1247	STE-CECILE 1	SCE1	780309	1848392	2,55	-	sol		X	X					X	X
Fossé de Camargue	10186X0003	18-1057	STES-MARIES-DE-LA-MER 1	SMM 1	770099	1830391	1,10	-	sol									
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	770098	1831007	1,03	-	sol		X					X	X	X
Fossé de Camargue	10186X0002	18-1260	STES-MARIES-DE-LA-MER 102	SM102	770091	1830991	1,14	-	sol		X						X	X
Fossé de Camargue	09914X0006	18-1268	ST-VERAN 1	SV1	757041	1858119	27,35	31,75	table									
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	774470	1842295	1,01	3,75	table		X	X				X		X
Fossé de Camargue	09918X0013	18-1132	VAUVERT 1	VVT 1	756814	1851653	27,43	-	sol									
Fossé de Camargue	09918X0014	18-1156	VAUVERT 1bis	VVT1bis	756814	1851653	27,40	-	sol									
Fossé de Camargue	09928X0002	18-1128	VILLENEUVE 1	VLE 1	787224	1846470	2,50	7,09	table									X
Fossé de Camargue	09655X0083	18-1051	VISTRENQUE 1	VIS1	761350	1866285	23,04	-	sol						X			
Costières - horst des Angles Bassin de Carpentras	09657X0017	18-1055	BELLEGARDE 1	BEL 1	774765	1863023	2,50	-	sol									
Costières - horst des Angles Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNETTE 1	LM1	789801	1875841	11	-	sol		X				X		X	X
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09948X0006	18-1270	EGUILLES 1	EG 1	841016	1847090	235,00	239,70	table						X			X
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	842061	1859555	205,00	-	sol	X				X	X	X	X	X
Offshore		18-1344	CALMAR 1	CAL1	715356	1801343	-86	21	table									
Offshore		18-1337	CICINDELE 1	CIE1	760871	1824994	-22	28	table		X						X	X
Offshore		18-1295	SIROCCO 1	SI1	743709	1800097	-94	17	table									
Massif de l'Estaque - Etoile- Ste Baume -Bassins de Marseille et du Beausset	10445X0002	18-1237	CARPIAGNE 1	CAR1	853025	1810409	145,05	-	sol									
Massif de l'Estaque - Etoile- Ste Baume -Bassins de Marseille et du Beausset	10431X0027	18-1296	LA-FOLIE 1	Fo1	824449	1820378	21,7	25,4	table									X
Bordure cévenolle - Garrigues néocomiennes	09913X0003	18-1238	LA JASSETTE 1	LJE1	746824	1858056	13	17,60	table									
Bordure cévenolle - Garrigues néocomiennes	09913X0025	18-1026	LUNEL 1	LL1	749205	1857830	12,60	12,90	table									
Pli de Montpellier - Massif de la Gardiole	09913X0026	18-1040	LUNEL 2	LL2	746479	1853635	6,30	6,60	table									
Pli de Montpellier - Massif de la Gardiole	09912X0056	18-1050	LUNEL 3	LL3	743135	1854236	7,70	8,00	table									

Nombre de forages disposant d'informations 5 13 8 2 4 8 6 12 21

Domaine	N° BSS	Nom du forage minier	Sigle	XL2E	YL2E	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Analyses d'eau Crétacé inférieur
Synclinal de l'Arc	10212X0012	Gardanne Nord	S	857912,9	1835427,1	740	773,3	X
Synclinal de l'Arc	10216X0003	Gardanne Sud	S2	860019	1833933,6	613	623	X

ANNEXE 7 : Données de salinité et analyses d'eau compilées pour le Crétacé inférieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Salinité (g/l)	Remarques	Analyses d'eau (en g/l)
Crau - Alpilles sud	10193X0066	18-1170	FOS 1	FOS1	1430,31	1467	Valanginien - Hauterivien	Alternance de calcaire marneux et marno-calcaire gris avec quelques barres plus calcaires Calcaires blancs, graveleux. Pyrite et chlorite	20-25	(mélange eau-boue) --> Couche aquifère salée dont l'eau représentative n'a pu être obtenue (salinité 4 g/L) L'interprétation de la PS (difficilement interprétable) pourrait indiquer une eau salée à 20-25g/L	
Fossé de Camargue		18-1244	BEAUDUC 1	BDC1	1340,5	1371	Urgonien	Calcaire beige clair graveleux microcristallin fissuré. Lamellibranches, Miliolites, Orbitolines, Coskinolines.	66	Barrémien sup - Urgonien (1340.5-1371) : straddle test : 11.4m3 en 63', eau salée à 66g/L avec forte odeur de H2S. Prouve la valeur du réservoir Urgonien et de sa couverture albienne	
Fossé de Camargue	09655X0036	18-1264	MILHAUD 5	M5	745,26	780,5	Barrémien	Calcaire gris clair, légèrement argileux. Passées pseudo-bréchiques, avec argile verte. Vacuoles et fissures ouvertes, contenant de l'huile partiellement oxydée.	10 à 11,7	test (745.26-780.5m) : durée d'ouverture 15 minutes. Débit au compteur en surface 3665L. Recueilli dans les tiges 3400 litres (473m) d'eau salée à 10g/L. Kh aux abords du puits = 1000mD x m ; Kh dans l'aire de drainage = 1215 mD x m. FGE : 15 minutes. 3890 L d'eau salée à 11,7g/l émulsionnée de gaz avec traces d'huile oxydée.	Cl = 6,141 - SO4 = 0,011 - HCO3 = 0,561 - Br = 0,030 - I = traces - Na = 4 - Ca = 0,160 - Mg = 0,097 - K = 0,025 - Fe3+ et Al3+ = traces
Bassin d'Aix et de Pertuis, Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	359,3	387	Valanginien inférieur	Alternances de calcaire gris-beige, de calcaire argileux gris-beige et de marno-calcaire gris. Epaisseur moyenne des bancs de l'ordre du mètre. Bancs de dolomie gréseuse grise de 516 à 525 m. De 340 à 450 m : Calpionella elliptica. De 340 à 528 m : Tintinopsella carpatica. De 460 à 528 m : Calpionella Undelloides.	4,09	test (359.3-387m) : 2 m3 en 10 min de boue et d'eau douce, salinité = 4,09 g/l ; "forte perméabilité"	

Domaine	N° BSS	Nom du forage minier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Analyses d'eau (mg/l)
Synclinal de l'Arc	10212X0012	Gardanne Nord	S	740	773,3	Urgonien	Calcaires blancs cristallins ou crayeux	Ca ²⁺ = 44 - Mg ²⁺ = 26,5 - Na ⁺ + K ⁺ = 46 - Cl ⁻ = 18 - SO4 ²⁻ = 44 - CO3 ⁻ = 140
Synclinal de l'Arc	10216X0003	Gardanne Sud	S2	613	623	Urgonien	Calcaires blancs à oolithes et miliolites	Ca ²⁺ = 44 - Mg ²⁺ = 23 - Na ⁺ + K ⁺ = 26 - Cl ⁻ = 7 - SO4 ²⁻ = 37 - CO3 ⁻ = 120

ANNEXE 8 : Données de salinité et analyses d'eau compilées pour le Jurassique supérieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Salinité (g/l)	Remarques	Analyses d'eau (en g/l)
Fossé de Camargue	09926X0001	18-1048	ALBARON 1	ALB1	777	836	Séquanien ? à Jurassique indéterminé	Calcaire gris-brun, légèrement marneux et gréseux dolomitique. Les rhomboédres de dolomite parsèment le calcaire granuleux. Présence de qq joints stylolithiques à enduit jaune verdâtre Dolomie vacuolaire de couleur brunâtre	33,5	dolomies à grande perméabilité ; débit d'eau artésienne à 800l/min.	SO4 = 1,32 g/L - lode = 0,3mg/L - Brome = 6,5 mg/L
Fossé de Camargue	09926X0003	18-1049	ALBARON 3	ALB3	492,6	505,7	Jurassique supérieur non différencié	Dolomie et calcaire dolomitique clair; Calcaire dolomitique à clypéines	27,6	test (492.6-505.7m) : débit eau artésienne de 1,5 m3/h à 27.6g/L NaCl avec traces de Br et I	Traces de Br et I
Fossé de Camargue	09926X0003	18-1049	ALBARON 3	ALB3	623,14	654,1	Jurassique supérieur non différencié	Dolomie crème plus ou moins vacuolaire	25,15	test (623.14-654.1m) : débit d'eau à 25.15g/L NaCl avec traces de Br et I	Traces de Br et I
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	2136,15	2174,95	Jurassique supérieur	Dolomie vacuolaire gris marron - Passées de calcaire graveleux à clypéines envahi par la dolomie. Dolomie plus compacte gris marron à la base.	41,53	Jurassique supérieur : test (2136.5-2174.95m) : Débit initial : 50 m3/h, débit total 8m3/h en 35 min. Eau à NaCl = 41,53 g/l	Cl = 25,17 - SO4 = 1,52 - CO3 = 0,52 - FE2O3 = 0,19 - Ca = 1,84 - Mg = 0,55 - K = 0,39 - Na = 14,1 - I = 1,75 mg/L - Br = 5 mg/L
Fossé de Camargue	09926X0004	18-1063	ALBARON 4	ALB 4	465,08	524,15	Jurassique supérieur	Calcaire crème fissuré plus ou moins dolomitique à Clypéines	24	test (465.08-524.15m) : eau artésienne 1,8 m3/h à 24 g/l de NaCl	Cl = 17,73 - SO4 = 1,063 - CO3 = 0,282 - Ca = 1,180 - Mg = 0,306 - K = 0,658
Fossé de Camargue	10173X0001	18-1127	GRAU-DU-ROI 1	GDR 1	891,5	925	Tithonique	de 891,5 à 899m : Oligocène ? : Conglomérat polygénique à éléments calcaires et ciment calcaréo-quartzeux de 899 à 925m : Calcaire sublithographique crème, à Calpionella alpina, C. undeiloides, C elliptica, diacaté avec filonnets de calcite. Zone poreuse et perméable à la base	11,6	test n°3 (891.5-925m) : 40L/h note : donnée pas forcément représentative : part d'Oligocène dans l'intervalle testé	Cl = 6,4 - SO4 = 0,8 - Na = 8,05 - K = 0,44 - Ca = 0,41 - Mg = 0,18
Fossé de Camargue	10173X0001	18-1127	GRAU-DU-ROI 1	GDR 1	981,5	1059	Tithonien et Kimméridgien	de 899 à 1051 m : Tithonique : Calcaire sublithographique crème, à Calpionella alpina, C. undeiloides, C elliptica, diacaté avec filonnets de calcite. Zone poreuse et perméable à la base de 1051 à 1216,21 m : Kimm : Calcaire sublithographique gris, très fissuré, avec remplissage de calcite et d'argile rouge vif	29	(981.5-1059m) : 16,3 m3 d'eau boueuse salée à 29 g/l . venue de sable miocène imprégné d'huile qui pourrait être un remplissage d'un karst dans le calcaire jurassique sup curage : venue de 40m3 d'eau salée, débit moyen : 1660L/h	Cl = 18,1 - SO4 = 1,12 - CO3 = 2,16 - Na = 13,57 - K = 0,17 - Ca = 0,2 - Mg = 0,1 + huile
Fossé de Camargue	09925X0020	18-1176	ISCLES 2	ISC2	682,55	710	Portlandien	Calcaire brun-beige plus ou moins dolomitique et calcaire crayeux (Clypéines et Coprolithes). Calcaire très dolomitique et dolomie beige plus ou moins vacuolaire.	20	test (682.55-710m) : débit de 2386L tombant à 0 en 15'. "la salinité des eaux du Jurassique d'iscles 2 est comparable à la salinité des eaux d'Albaron."	Cl = 12,07 - SO4 = 0,93 - HCO3 = 0,383 - Br = 0,08 - I : traces - Na = 6,272 - K+Li = 0,169 - Ca = 1,08 - Mg = 0,364
Fossé de Camargue	09927X0001	18-1247	STE-CECILE 1	SCE1	2817,85	2828	Argovien	Dolomie beige légèrement vacuolaire.	53	test (2817.85-2828m) : 0,77 m3 en 75' d'eau salée à 53g/L	Cl = 32,305 - SO4 = 1,32 - HCO3 = 0,360 - Br = traces - Na = 17,3 - K = 0,780 - Li = 0,012 - Ca = 2,280 - Mg = 0,680 - Fe + Al = 0,175 - NH4 = 0,08
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	525	525	Rauracien - Argovien	à la limite de deux passes : Calcaire légèrement argileux et dolomitique brun clair à mouchetures de calcite. Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	sept-24	Venue éruptive d'eau salée à 24 g/L NaCl et légèrement sulfureuse. Forage à l'eau claire - D'après les indications sur la boue de forage, les abaques Schlumberger donnent une salinité de 9 g/L NaCl	
Fossé de Camargue	10186X0002	18-1260	STES-MARIES-DE-LA-MER 102	SM102	575	575	Rauracien - Argovien	Description lithologique inconnue : forage en perte totale. D'après les carottes environnantes : dolomie cristalline vacuolaire, fracturée, beige foncé.	10	pendant la remontée de l'outil, le puits débite à raison de 90m3/heure. Eau à 10g/L de NaCl. Odeur d'H2S. Forage à l'eau claire.	

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Salinité (g/l)	Remarques	Analyses d'eau
Fossé de Camargue	10173X0015	18-1336	MAS-DE-MADAME 1	MDM1	492	511,5	Réservoir karstifié jurassique	Calcaire gréseux à grès fortement calcaire gris-beige à fines inclusions de calcite ou de calcaire sublithographique beige. Calcaire sublithographique beige (mudstone) compact à veinules, filonnets et micro-fissures de calcite Calcaire mudstone beige localement vacuolaire à fissures, fractures et stylolithes généralement tapissés de calcite	≥ 12,5	test 492-511,5m : récupération de 1140 L d'un mélange salé à 12,5 g/L d'eau des pertes (totales de 500.7-525.2m) et d'eau de formation Le réservoir Jurassique est envahi d'eau salée dont la salinité n'a pu être évaluée avec certitude étant donné l'importance de la pollution par la boue de forage des échantillons recueillis aux tests. les 2 tests ont vu leur débit diminuer régulièrement puis s'annuler lorsque la contre-pression exercée par la colonne de liquide atteignit la pression de couche.	
Fossé de Camargue	10173X0015	18-1336	MAS-DE-MADAME 1	MDM1	492	525,2	Tithonique inférieur - Kimméridgien supérieur	Calcaire gréseux à grès fortement calcaire gris-beige à fines inclusions de calcite ou de calcaire sublithographique beige. Calcaire sublithographique beige (mudstone) compact à veinules, filonnets et micro-fissures de calcite Calcaire mudstone beige localement vacuolaire à fissures, fractures et stylolithes généralement tapissés de calcite Calcaire mudstone à micro-fissures et rares fractures généralement tapissées de calcite. Quelques vacuoles éparses	> 9,4	test 492-525,2m : récupération de 1655 L d'un mélange salé à 9,4 g/L d'eau des pertes (totales de 500.7-525.2m) et d'eau de formation. Le réservoir Jurassique est envahi d'eau salée dont la salinité n'a pu être évaluée avec certitude étant donné l'importance de la pollution par la boue de forage des échantillons recueillis aux tests. les 2 tests ont vu leur débit diminuer régulièrement puis s'annuler lorsque la contre-pression exercée par la colonne de liquide atteignit la pression de couche.	
Costières - horst des Angles - Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNE TTE 1	LM1	1701,16	1722	Kimméridgien	Calcaire gris beige clair à pâte fine et calcaire beige clair plus ou moins crayeux. A la base, calcaire gris beige cristallin.	57,3	5665 l d'eau salée avec une forte odeur sulfureuse : 57,3 g/l ClNa et de faibles indices	
Offshore		18-1337	CICINDELE 1	CIE1	559	879.4	Kimméridgien inférieur, Bathonien, Callovien à Série métamorphique supérieure	de 559 à 589m : Kimméridgien inf : Dolomie calcaire crypto- à microcristalline compacte, Dolomie calcaréo-argileuse, microcristalline, compacte. Dolomie saccharoïde, poreuse mais argileuse. Calcaire M. crypto à microcristallin, compact. Ensemble très fracturé avec dans les fractures des bourrages d'argile, calcite et dolomite, placages de pyrite. De 589 à 753 m : Bathonien sup à Callovien : Dolomie calcaire, microcristalline. Plages saccharoïdes. Présence de dolomie argileuse. Dolomie calcaire à calcaire dolomitique +/- argileux micro à cryptocristallin. Dolomie microcristalline grenue. Calcaire W. +/- silteux et argileux. Fracturation importante. Argile à marne silteuse, pyriteuse. de 753 à 801 m : Jurassique (probable) : Calcaire M. argileux, légèrement anhydritique et dolomitique. Dolomie cryptocristalline, localement silicifiée. Dolomie cryptocristalline anhydritique. Calcaire cryptocristallin, argileux, parfois légèrement silicifié. Ensemble complexe de (i) Argile silicifiée, (ii) Silstone hématitique schisteux, (iii) Quartz, (iv) Anhydrite, (v) Dolomie cryptocristalline. de 801 à 943 m : Série métamorphique supérieure : schistes et micaschistes. Localement, présence	> 62	Test (559-879.4) : Ouverture env. 90°. Excellent débit d'environ 4m3 d'eau salée à au moins 62 g/L, mélange +/- important avec la boue sous packer. Calcaires du Dogger en continuité avec ceux du Kimméridgien (30m)	

ANNEXE 9 : Notions de salinité

La salinité correspond à la concentration d'une eau en sels dissous ou la quantité totale des résidus solides (en grammes) contenu dans 1 kg de liquide. Cette grandeur peut être sans unité ou exprimée en g/l.

La salinité est difficilement estimable par analyse chimique directe (séchage et pesée du résidu solide), car certains corps présents, comme les chlorures, s'échappent au cours du séchage. Sachant que les proportions des constituants principaux de l'eau de mer sont quasiment constantes, le dosage de l'un d'entre eux peut donner la teneur de tous les autres ainsi que la salinité. Les ions chlore, brome et iode peuvent par exemple être facilement dosés.

La salinité peut également être mesurée à partir de la valeur de conductivité électrique de l'eau.

Pour caractériser une eau on utilise souvent la notion de salinité équivalente. C'est la salinité en NaCl qui provoquerait une résistivité égale à celle de l'eau considérée.

Différentes classifications des eaux existent en fonction de leur salinité :

Type d'eau	Salinité = concentration totale de sel dissous (g/l)
Eau douce	< 0.5
Eau saumâtre	0.5 - 30
Eau de mer	30 - 50
Saumure	> 50

Type d'eau	Salinité = concentration totale de sel dissous (g/l)
Eau oligohaline	0.5 - 3
Eau mésohaline	3-16
Eau polyhaline	16-30
Eau euhaline	30 - 40
Eau hypersaline	> 40

Masse des principaux ions dissous (en g par kg d'eau) dans une eau de mer de salinité 35 g/kg :

Anions	Cations
Cl ⁻ : 18,9799	Na ⁺ : 10,5561
SO ₄ ²⁻ : 2,6486	Mg ²⁺ : 1,2720
HCO ₃ ⁻ : 0,1397	Ca ²⁺ : 0,4001
Br ⁻ : 0,0646	K ⁺ : 0,3800

ANNEXE 10 : Exemple d'abaque fournissant la densité du CO₂ (en kg/m³) en fonction de la pression et de la température

Pressure (bar)	Température (°C)													
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	125	150	175	200
1	1,815	1,754	1,697	1,644	1,594	1,5474	1,5031	1,4613	1,4218	1,3882	1,375	1,253	1,1865	1,1198
2	3,65	3,525	3,409	3,301	3,2	3,1047	3,015	2,9304	2,8505	2,79135	2,6876	2,5147	2,4	2,2417
3	5,505	5,314	5,137	4,971	4,817	4,6719	4,5355	4,4071	4,28569	4,1945	4,03775	3,6765	3,573	3,3658
4	7,381	7,121	6,88	6,655	6,445	6,2493	6,065	5,8916	5,7282	5,59765	5,388	5,038	4,766	4,492
5	9,279	8,946	8,638	8,352	8,086	7,8369	7,6034	7,384	7,1775	7,0008	6,738	6,3	5,96	5,6204
6	11,198	10,79	10,413	10,063	9,738	9,4348	9,1508	8,8843	8,6336	8,43144	8,1114	7,578	7,1656	6,7508
7	13,14	12,653	12,203	11,788	11,402	11,0433	10,7074	10,3926	10,0969	9,86208	9,4848	8,856	8,3717	7,8835
8	15,106	14,535	14,011	13,527	13,079	12,6624	12,2733	11,909	11,5672	11,29272	10,8582	10,134	9,5778	9,0182
9	17,095	16,438	15,836	15,281	14,768	14,2923	13,8485	13,4336	13,0446	12,72336	12,2316	11,412	10,7839	10,1551
10	19,11	18,361	17,678	17,05	16,47	15,9332	15,4332	14,9664	14,5293	14,154	13,605	12,69	11,99	11,2941
20	40,806	38,866	37,153	35,621	34,238	32,9802	31,8283	30,7677	29,7863	28,97	27,77	25,77	24,28	22,8004
30	66,202	62,25	58,925	56,06	53,548	51,3167	49,3119	47,4953	45,8872	44,504	42,53	39,24	36,87	34,5165
40	97,51	89,782	83,774	78,869	74,734	71,1683	68,0394	65,2574	62,7575	60,826	57,94	53,13	49,775	46,489
50	140,532	123,995	113,019	104,805	98,258	92,8294	88,2032	84,1821	80,6331	78,014	74,045	67,43	62,99	58,5641
60	784,972	171,486	149,201	135,098	124,789	116,6919	110,044	104,4213	99,5619	96,148	90,91	82,18	76,535	70,8868
70	810,026	268,984	198,315	171,921	155,337	143,2873	133,8636	126,1549	119,6536	115,314	108,585	97,37	90,4	83,4016
80	828,801	699,939	281,328	219,584	191,481	173,3417	160,038	149,5915	141,029	135,64	127,15	113	104,58	96,1015
90	844,105	743,739	484,09	287,528	235,732	207,8317	189,0221	174,9649	163,8144	157,18	146,65	129,1	119,1	108,9786
100	857,159	771,414	622,64	389,912	291,658	247,9632	221,3241	202,5164	188,1318	180	167,1	145,6	133,9	122,0235
120	875,38	801,7	689,34	510,56	415,56	359,62	303,68	274,86	246,04	233,024	213,5	180,96	165,1	149,24
140	894,46	831,9	749,98	636,72	541,12	463,44	385,76	344,62	303,48	286,048	259,9	216,32	196,3	176,28
160	919,64	855,72	792,22	716,72	627,88	544,07	460,26	411,05	361,84	340	307,23	252,62	228,13	203,64
180	923,92	873,16	816,06	750,56	675,84	601,51	527,18	474,15	421,12	394,87	355,49	289,86	260,59	231,32
200	937,723	891,127	840,193	784,233	723,192	658,6143	594,159	534,2812	482,0222	449,74	403,75	327,1	293,05	258,4521
220	947,56	903,36	855,78	804,04	749	695,05	631,1	577,47	523,84	491,532	443,07	362,3	324,17	286,04
240	957,92	916,12	871,66	824,4	774,2	721,15	668,1	617,69	567,28	533,324	482,39	397,5	355,29	313,08
260	967,42	927,62	885,68	841,64	795,44	746,96	698,48	651,07	603,66	569,032	517,09	430,52	384,86	339,2
280	976,06	937,86	897,84	856,12	812,72	767,48	722,24	677,61	632,98	598,656	547,17	461,36	412,88	364,4
300	984,07	948,01	910	870,6	830	788	746	704,15	662,3	628,28	577,25	492,2	440,9	389,6

ANNEXE 11 : Données pétrophysiques quantitatives compilées pour le Crétacé inférieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Remarques
Crau - Alpilles sud	10193X0066	18-1170	FOS 1	FOS1	1447,7	1467	Valanginien	Calcaire blanchâtre finement graveleux à ciment cristallin. Nombreux joints stylolithiques à enduit noirâtre. Diaclases tapissées de calcite. Rares fissures.	2 à 3	perméabilité de matrice nulle mais fines fissures	carottes 7 et 8
Fossé de Camargue	09655X0036	18-1264	MILHAUD 5	M5	745,26	780,5	Barrémien	Calcaire gris clair, légèrement argileux. Passées pseudo-bréchiques, avec argile verte. Vacuoles et fissures ouvertes, contenant de l'huile partiellement oxydée.		Kh = 1215mD x m	test (745.26-780.5m) : RFS : durée d'ouverture 15 minutes. Débit au compteur en surface 3665L. Recueilli dans les tiges 3400 litres (473m) d'eau salée à 10g/L. IP = 9m3/j/kg/cm2. Kh aux abords du puits = 1000mD x m ; Kh dans l'aire de drainage = 1215 mD x m. Pression statique 74,6 kg/cm2 à 739,88m. FGE : 15 minutes. 3890 L d'eau salée à 11,7g/l émulsionnée de gaz avec traces d'huile oxydée.
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	664,3	679,8	Berriasien	Calcaire brun-beige, finement cristallin, compact à zones plus argileuses, et calcaire dolomitique brun-beige. Ce calcaire est plus épais à partir de 662 m. De 662 à 717 m : Calpionella alpina Lorentz.		voisine de 30 md	test (664.3-679.8m) : débit = 3600 l en 108 min de boue et d'eau douce (pertes de 3m3 de boue en 10' ayant conduit au test) ; "perméabilité moyenne, voisine de 30mD"

ANNEXE 12 : Données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations du Crétacé inférieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Crétacé inférieur	Remarques complémentaires
Crau - Alpilles sud	10193X0066	18-1170	FOS 1	FOS1	Valanginien à Santonien : Fortes pertes d'injection journalière, de 2 à 45m3. (914.3-1605.05) Hauterivien : pertes totales (vers 1235m) Valanginien - Hauterivien : 1 test (1431.3-1467) : (mélange eau-boue de salinité non représentative de l'aquifère L'interprétation de la PS (difficilement interprétable) pourrait indiquer une eau salée à 20-25g/L Deux réservoirs possibles ont été traversés par ce forage : calcaire coniacien et calcaire valanginien (1450-1605m), peu poreux (2 à 3%) sans perméabilité et présentant quelques fines fissures de faible productivité. Ce magasin est saturé d'eau à 25g/L et serait mis en charge par l'étang de Berre.	Le Jurassique supérieur pourrait faire l'objet d'une étude à faible profondeur sur les anomalies positives.
Fossé de Camargue		18-1244	BEAUDUC 1	BDC1	Barrémien sup - Urgonien : vers 1402 m : pertes totales Barrémien sup - Urgonien (1340.5-1371) : straddle test : 11.4m3 en 63', eau salée à 66g/L avec forte odeur de H2S. Prouve la valeur du réservoir Urgonien et de sa couverture albienne	
Fossé de Camargue	09655X0036	18-1264	MILHAUD 5	M5	Barrémien : test (745.26-780.5m) : durée d'ouverture 15 minutes. Débit au compteur en surface 3665L. Recueilli dans les tiges 3400 litres (473m) d'eau salée à 10g/L. Kh aux abords du puits = 1000mD x m ; Kh dans l'aire de drainage = 1215 mD x m. d'après la fiche géologique : 3890 L d'eau salée à 11,7g/l émulsionnées de gaz avec traces d'huile oxydée.	
Fossé de Camargue	09655X0083	18-1051	VISTRENQUE 1	VIS1	Oligocène conglomératique à Crétacé inférieur test (1020.5-1322) : 800L de boue en 1h	
Costières - horst des Angles - Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNETTE 1	LM1	Berriasien : 2 tests (1319.74-1350.5 ; 1405.62-1435m) : secs --> K nulle vers 1373m : d'après la PS, zone poreuse à eau salée. Vitesse d'avancement augmente entre 1374 et 1376 m Valanginien : Grande épaisseur des marnes valangiennes qui doivent assurer une bonne couverture. Hauterivien : Les calcaires de l'Hauterivien, fissurés à leur sommet, ont donné lieu à des pertes dès l'entrée : ces pertes partielles ont été continues durant tout le forage. En cours d'avancement aucune indication particulière de réservoir n'a été notée lors de la traversée du Crétacé ; le CE montre une zone plus poreuse entre 815 et 860 correspondant en résistivité à un niveau plus calcaire	
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09948X0006	18-1270	EGUILLES 1	EG 1	Valanginien supérieur (156.4m) : Perte partielle de 40 m3	Passage d'un accident chevauchant à 1873 m., entraînant le redoublement du Crétacé inférieur et d'une partie du Jurassique terminal
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	Valnginien et Berriasien (0-717m) : pertes partielles dans les calcaires, une perte plus importante de 383 à 387,5 m Valanginien inférieur : test (359.3-387m) : 2 m3 en 10 min de boue et d'eau douce, salinité = 4,09 g/l ; "forte perméabilité" Berriasien : test (664.3-679.8m) : débit = 3600 l en 108 min de boue et d'eau douce (pertes de 3m3 de boue en 10' ayant conduit au test) ; "perméabilité moyenne, voisine de 30mD"	Les pertes d'injection en cours de forage ont été pratiquement continues dans les horizons calcaires traversés sans qu'il soit toujours possible de localiser avec précision les zones de pertes nouvelles effectives.

ANNEXE 13 : Données pétrophysiques quantitatives compilées pour le Jurassique supérieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Remarques
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	1712	1712	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire sublithographique gris beige à cassure esquilleuse fissuré, structure graveleuse, stylolithes	6		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	1844	1844	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire vacuolaire fissuré, joints stylolithiques et filonnets de calcite	17		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	1931	1931	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire bréchique très diaclasé - remplissage argileux verdâtre, des fissures.	10		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	1934	1934	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire bréchique très diaclasé - remplissage argileux verdâtre, des fissures.	6		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	1936	1936	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire bréchique très diaclasé - remplissage argileux verdâtre, des fissures.	8		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	2080	2080	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire dolomitique blanc graveleux à clypéines - la dolomie en rhomboédre envahit le ciment et peut être à l'intérieur des gravelles	10		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	2120	2120	Jurassique supérieur indifférencié	Calcaire dolomitique blanc graveleux à clypéines - la dolomie en rhomboédre envahit le ciment et peut être à l'intérieur des gravelles	4		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	2150	2150	Jurassique supérieur indifférencié	Dolomie vacuolaire gris marron - Passées de calcaire graveleux à clypéines envahi par la dolomie. Dolomie plus compacte gris marron à la base.	9		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	2174	2174	Jurassique supérieur indifférencié	Dolomie vacuolaire gris marron - Passées de calcaire graveleux à clypéines envahi par la dolomie. Dolomie plus compacte gris marron à la base.	13		origine mesure : carottes lecture sur LFO au 1/2000 - document ancien profondeur : papier millimétré mais parfois invisible porosité : barres sur échelle millimétrée parfois invisible
Fossé de Camargue	10173X0001	18-1127	GRAU-DU-ROI 1	GDR 1	1043	1045	Tithonien	Calcaire sublithographique crème, à Calpionella alpina, C. undeiloides, C elliptica, diaclasé avec filonnets de calcite. Zone poreuse et perméable à la base	15		logs SPE saturation en eau > 25 % (Zone à indices) 1040-1050 : zone poreuse et perméable (prosélec, cf LFO)

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Remarques
Fossé de Camargue	09927X0001	18-1247	STE-CECILE 1	SCE1	2817.85	2828	Argovien	Dolomie beige légèrement vacuolaire.		Kh = 10,9 mD x m - K = 1 mD	Argovien : test (2817.85-2828m) : 0.77 m3 en 75' d'eau salée à 53,23 g/L. Kh = 10,9 mD x m. K = 1 mD.
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	147	147	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	2	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	147,5	147,5	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	3	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	148	148	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	2	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	148,5	148,5	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	3,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	149	149	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	3	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	149,5	149,5	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	3,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	150	150	Portlandien	Calcaire beige sublithographique, légèrement dolomitique à Coprolithes. Fissures et joints stylolithiques à argile.	2	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	319,6	319,6	Kimméridgien - Séquanien	Dolomie beige foncé à texture graveleuse et oolithique fantôme avec de rares intercalations calcaires	5,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	320	320	Kimméridgien - Séquanien	Dolomie beige foncé à texture graveleuse et oolithique fantôme avec de rares intercalations calcaires	2,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	320,5	320,5	Kimméridgien - Séquanien	Dolomie beige foncé à texture graveleuse et oolithique fantôme avec de rares intercalations calcaires	4	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	321	321	Kimméridgien - Séquanien	Dolomie beige foncé à texture graveleuse et oolithique fantôme avec de rares intercalations calcaires	3	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	321,5	321,5	Kimméridgien - Séquanien	Dolomie beige foncé à texture graveleuse et oolithique fantôme avec de rares intercalations calcaires	4	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	465	465	Kimméridgien - Séquanien	Calcaire beige à brun clair, plus ou moins dolomitique. Fissures avec calcite et argile. Echinodermes, Gastéropodes, Lituolidés.	0,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	556	556	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	0,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	557	557	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	1	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	558	558	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	0,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	601	601	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	0,5	< 0,1	carotte

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	Niveau stratigraphique	Description lithologique	Porosité (%)	Perméabilité (mD)	Remarques
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	602	602	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	0,5	< 0,1	carotte
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	603	603	Rauracien - Argovien	Dolomie cristalline brune, vacuolaire. Texture graveleuse et oolithique fantôme.	0,5	< 0,1	carotte
Costières - horst des Angles - Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNETTE 1	LM1	1319,74	1350,5	Berriasien	Berriasien. Calcaire gris beige sublithographique à raies passées marneuses gris foncé. L'ensemble est compact, rares fissures.		nulle	Test sec, recueilli 90 l de boue dans les tiges
Costières - horst des Angles - Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNETTE 1	LM1	1405,62	1435	Berriasien	Berriasien. Calcaire gris beige sublithographique à raies passées marneuses gris foncé. L'ensemble est compact, rares fissures.		nulle	Test sec
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	664,3	679,8	Berriasien	Calcaire brun-beige, finement cristallin, compact à zones plus argileuses, et calcaire dolomitique brun-beige. Ce calcaire est plus épais à partir de 662 m. De 662 à 717 m : Calpionella alpina Lorentz.		voisine de 30 md	test (664.3-679.8m) : débit = 3600 l en 108 min de boue et d'eau douce (pertes de 3m3 de boue en 10' ayant conduit au test) ; "perméabilité moyenne, voisine de 30mD"
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	1313,5	1318,5	Argovien	Calcaire argileux brun-beige et marno-calcaire gris-foncé, finement micacé.	0,5 à 3	0,1 md	carotte n°1
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	1314,8	1314,8	Argovien	Calcaire argileux brun-beige et marno-calcaire gris-foncé, finement micacé.		0,8 md	carotte n°1
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	1313,5	1326	Argovien	Calcaire argileux brun-beige et marno-calcaire gris-foncé, finement micacé.	2	0,1 md	programme d'essai de production de gaz combustible sur la zone 1313,5-1326 : évaluation sommaire de la couche, faible proportion de fissures, absence de réservoir, mauvaises caractéristiques physiques.
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	1527	1528,7	Oxfordien - Callovien	Marne gris-foncé finement micacées (terres noires).	nulle	nulle	test n°5 : l'examen des courbes S.P.E. correspondant à cette zone indique un terrain marneux sans aucune porosité

ANNEXE 14 : Données qualitatives renseignant sur les propriétés réservoir des formations du Jurassique supérieur

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Jurassique supérieur	Remarques complémentaires
Crau - Alpilles sud Synclinal de l'Arc	10194X0117	18-1278	ISTRES 101	IS101	Tithonique (1765-1840) : pertes, au niveau de passées riches en calcite (zone de faille), vite colmatées	
Fossé de Camargue	09926X0001	18-1048	ALBARON 1	ALB1	Purbeckien ? : pertes 3m ³ /h vers 299m Kimméridgien ? : pertes totales de 625.7 à 630m Les niveaux situés à 625-630 m (zone fissurée) et de 777 à 836 m (dolomies à grande perméabilité) ont débité une eau salée artésienne avec un peu de gaz combustible. Débit de la couche 777-836 m (dolomies vacuolaires) : 800 l/min ; eau à 33,5 g/l de NaCl	
Fossé de Camargue	09926X0011	18-1349	ALBARON 101	ALB101	La série calcaire jurassique présente plusieurs niveaux poreux dans des carbonates très propres. Cette porosité est liée à la fissuration et à la karstification.	
Fossé de Camargue	09926X0003	18-1049	ALBARON 3	ALB3	Jurassique supérieur non différencié : pertes totales vers 525.5m test (356-404) : sec test (481.61-525.75m) : débit initial 25 m ³ /h test (492.6-505.7m) : débit eau artésienne de 1,5 m ³ /h à 27.6g/L avec traces de Br et I test (623.14-654.1m) : débit d'eau à 25.15g/L avec traces de Br et I	
Fossé de Camargue	09926X0004	18-1063	ALBARON 4	ALB 4	Jurassique supérieur : pertes : 3 m ³ /h (410-444m) et pertes partielles de 494 à 507m de 0.6m ³ /h test (405.8-434.51m) : pas de débit test (465.08-524.15m) : eau artésienne 1,8 m ³ /h à 24 g/l NaCl	
Fossé de Camargue	09922X0206	18-1065	ALBARON 6	ALB 6	Tithonique ? : test (813-829m) : pas de débit	
Fossé de Camargue	09926X0202	18-1066	ALBARON 7	ALB 7	Purbeckien : pertes totales	
Fossé de Camargue	10173X0001	18-1127	GRAU-DU-ROI 1	GDR 1	Tithonique : pertes (1000-1025 et 1032-1050m) : 3.6 et 2.6m ³ Tithonien (1043-1045m) : phi = 15%, saturation en eau > 25% (diag) - Zone à indices Tithonique : test (891.5-925m) : 40L/h à 11.6 g/L Tithonique : 1040-1050m : zone poreuse et perméable (prosélec, cf LFO) Tithonique et Kimméridgien (981.5-1059m) : 16,3 m ³ d'eau boueuse salée à 29 g/l . venue de sable miocène imprégné d'huile qui pourrait être un remplissage d'un karst dans le calcaire jurassique sup - curage : venue de 40m ³ d'eau salée, débit moyen : 1660L/h - Analyse d'eau en g/L : Cl = 18,1 SO ₄ = 1,12 CO ₃ = 2,16 Na = 13,57 K = 0,17 Ca = 0,2 Mg = 0,1	Le Portlandien-Tithonique, très diaclasé, présente le "facies Vaunage" typique (calcaire sublithographique de couleur crème, microfaune caractéristique de Calpionelles). Dans la plupart des sondages de Camargue, le Tithonique est représenté par un calcaire +/- dolomitique à Clypéines (facies purbeckien) et le facies Vaunage du Tithonique n'a été rencontré, avant Grau, qu'au sondage Albaron 6. Le Kimméridgien présente un facies de calcaire sublithographique gris +/- foncé (micro-facies granuleux à mouches de calcite) sous le facies tithonique à Calpionelles. La formation est très fissurée, avec remplissage (selon carotte) d'argile rouge vif et de calcite.
Fossé de Camargue	09925X0202	18-1176	ISCLES 2	ISC2	Jurassique supérieur : importantes pertes d'injection, 18 à 40m ³ de 587 à 760m Portlandien : test (682.55-710m) : débit de 2386L tombant à 0 en 15'. eau salée à 20g/L. La salinité des eaux du Jurassique d'Isclès 2 est comparable à la salinité des eaux d'Albaron. Les dolomies du Jurassique supérieur (calcaire dolomitique de 656 à 692m et dolomie de 692 à 760m), largement fissurées et vacuolaires, paraissent présenter de bonnes qualités de magasins. Le test semble indiquer une forte perméabilité et un réservoir d'excellentes caractéristiques. Comme à Albaron, le Jurassique est noyé. Les opérations électriques (carottage et gamma ray) confirment ces observations et aucune couche nouvelle susceptible d'intérêt n'apparaît sur les diagrammes enregistrés.	

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Jurassique supérieur	Remarques complémentaires
Fossé de Camargue	10173X0015	18-1336	MAS-DE-MADAME 1	MDM1	Tithonique inférieur - Kimméridgien supérieur carottes : abondantes fissures, vacuoles et fractures. Pertes totales (500.7-525.2m) de la boue de densité 1,10 2 tests : récupération de 1140 L et 1655 L de mélange d'eau des pertes (densité de la boue = 1,10) et d'eau de formation, salinité : 9.4 à >12.5 g/L Le réservoir Jurassique est envahi d'eau salée. La salinité de cette eau n'a pu être évaluée avec certitude vue la pollution importante par la boue de forage des échantillons recueillis aux tests. les 2 tests ont vu leur débit diminuer régulièrement puis s'annuler lorsque la contre-pression exercée par la colonne de liquide atteignit la pression de couche égale à env. 49.7 kg/cm2. "Le forage a confirmé l'existence d'un réservoir karstifié d'âge jurassique, en amont pendage par rapport au sondage Grau du Roi 1. Le réservoir est envahi d'eau de salinité $\geq$ 12.5	
Fossé de Camargue	09927X0001	18-1247	STE-CECILE 1	SCE1	Kimméridgien - Tithonique : test (2507-2541m) : sec Rauracien - Argovien : test (2683.58-2711.3m) : sec Argovien : test (2817.85-2828m) : 0.77 m3 en 75' d'eau salée à 53,23 g/L. Kh = 10,9 mD x m. K = 1 mD. Les calcaires fissurés du Jurassique sup (Tithonique-Rauracien) ne renferment aucun réservoir. Existence d'un magasin dolomitique dans l'Argovien inférieur, eau salée à 53,23 g/L. L'Argovien inf. est constitué de 15m (les 15 derniers mètres du forage) de dolomie analogue à celle rencontrée à Albaron et Stes-Maries et qui montre de médiocres qualités réservoir. Il est vraisemblable que ces qualités se seraient améliorées en pénétrant un peu plus profondément dans le massif dolomitique.	
Fossé de Camargue	10186X0001	18-1249	STES-MARIES-DE-LA-MER 101	SM101	Portlandien (140-192m) : pertes Portlandien (147-150m) : phi = 2 à 3.5% - K< 0.1 (Carotte) Kimméridgien (319.6-321.5 et 465m) : phi = 0.5 à 5.5% - K<0.1 (carotte) Rauracien-Argovien (525m) : Venue éruptive d'eau salée à 24 g/L Na Cl + H2S Rauracien-Argovien (556-558 et 601-603m) : phi = 0.5 à 1% - K<0.1 (carottes) Rauracien-Argovien (575-714m) : pertes totales "La dolomie vacuolaire à partir de 525m constitue, comme à Albaron1 et à Vaccarès1, un excellent réservoir et a fourni un débit éruptif non mesuré d'une eau légèrement sulfureuse à 24g/L NaCl."	
Fossé de Camargue	10186X0002	18-1260	STES-MARIES-DE-LA-MER 102	SM102	Portlandien (vers 116 et 180m) : pertes 40m3/h et 30m3/h (forage à l'eau claire) Kimméridgien à Bathonien (435 -1423) : pertes totales Rauracien - Argovien (vers 575) : pendant la remontée de l'outil, le puits débite à raison de 90m3/heure. Eau à 10g/L de NaCl. Odeur d'H2S. Salinité représentative car forage à l'eau claire. La dolomie du Jurassique supérieur (Portlandien à Callocien) constitue un excellent réservoir sur toute son épaisseur, soit environ 800m. "Dans la zone forée en perte totale (435-1423m), la lithologie n'est connue que par des carottes systématiques prélevées tous les 50m environ, à partir de 720m. La stratigraphie proposée est donc hypothétique et établie par corrélations, soit avec les sondages Castelnau2, Castries1, Vacquières1, soit avec les données de terrain."	Dogger : test (1446.1-1466.1m) : récupéré : 9500L d'eau salée à 70g/l + H2S en 30' pertes : vers 1450, 1460 et 1500m ; 1525, 1550, 1565, 1585, 1600m... Les calcaires siliceux fracturés et la dolomie du Dogger constituent un très bon réservoir à eau salée ; seule la partie supérieure (calcaires siliceux) a été testée (test ci dessus). La salinité prouve la valeur de la couverture callovienne
Fossé de Camargue	09926X0006	18-1059	VACCARES 1	VCS 1	Oligocène série rouge à Jurassique supérieur : test (1402.07-1925m, 219m dans le Jur.sup.) : Sorti par pistonage 52 m3 de boue et 51,7 m3 d'eau. Débit initial 35 m3/h. NaCl = 33,5 g/l Jurassique supérieur (diverses prof entre 1712 et 2174m) : phi = 4 à 17% (carottes) Jurassique supérieur : test (2136.5-2174.95m) : Débit initial : 50 m3/h. débit total 8m3/h en 35 min. - NaCl = 41,53 g/l	
Fossé de Camargue	09928X0002	18-1128	VILLENEUVE 1	VLE 1	Le substratum tithonique à faciès "Vaunage" indique la présence d'une série jurassique pauvre en magasins. Aucun réservoir ne pouvant être prévu à profondeur raisonnable, le sondage a été arrêté dès que la certitude d'avoir atteint le Jurassique en place a été acquise (Jurassique supérieur seulement traversé sur 40m avant le fond du forage)	

Domaine	N° BSS	N° DHYMA	Nom du forage pétrolier	Sigle	Jurassique supérieur	Remarques complémentaires
Costières - horst des Angles - Bassin de Carpentras		18-1226	LA MONTAGNETTE 1	LM1	Tithonique : 1522-1699m : quelques zones poreuses (PS) peu marquées sur les courbes d'avancement Kimméridgien : test (1701.16-1722) : en 33', 5665 l d'eau salée à 57,3 g/l ClNa avec une forte odeur sulfureuse 1712-1791m : perte brutale en cours de carottage - vers 1750 : niveaux fissurés (PS) Parmi les réservoirs possibles testés, seul celui du Kimméridgien montre de bonnes qualités. Les calcaires très fissurés du Kimméridgien constituent un excellent réservoir (aquifère).	
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09948X0006	18-1270	EGUILLES 1	EG 1	Portlandien : nombreuses pertes partielles de 7 à 19m3 (entre 3287.1 et 3830m) test (3293.3-3305.2m) : 4435 L d'eau douce en 24' Kimméridgien : pertes partielles entre 4000 et 4500m Oxfordien sup : test (4979-4995m) : sec	Passage d'un accident chevauchant à 1873 m., entraînant le redoublement du Crétacé inférieur et d'une partie du Jurassique terminal
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	Berriasien : test (664.3-679.8m) : débit = 3600 l en 108 min de boue et d'eau douce (pertes de 3m3 de boue en 10' ayant conduit au test) ; "perméabilité moyenne, voisine de 30mD" Argovien : pertes de 9,2 m3 en 60 min à 1313,5 m test 1298.26-1313.5m : 10m3 de gaz en 15', perméabilité assez faible du niveau testé. Test 1313.7-1328m : débit de gaz 500m3/h, bonne perméabilité 2 essais de production sur zone à gaz (1314-1318m) : phi = 2% - K<= 0.1mD ; décroissance rapide des débits de gaz --> Absence de réservoir pour une exploitation commerciale du gaz. Carotte (entre 1313.5 et 1314.8m) : phi = 0.5 à 3% - K<= 0.1 mD et 0.8mD Oxfordien - Callovien, "Terres Noires" : test (1524.58-1528.7m) : test sec, Marnes sans porosité.	Les pertes d'injection en cours de forage ont été pratiquement continues dans les horizons calcaires traversés sans qu'il soit toujours possible de localiser avec précision les zones de pertes nouvelles effectives.
Bassin d'Aix et de Pertuis. Plateaux crétacés de Provence occidentale	09944X0007	18-1239	ROGNES 1	RGS1	Jurassique supérieur calcaire : test (1745.78-1771.25m) : débit = 4 m3 d'eau douce en 90 min. Les diagrammes de test montrent une bonne perméabilité qui d'après les courbes S.P.E. doit être attribuée à une fissuration de la roche plutôt qu'à une porosité de matrice. La nature du fluide et la pression de ce réservoir sont très comparables à celles obtenues dans le Jurassique supérieur du compartiment chevauchant. test (1927.85-1935.1m) : test sec. Zone compacte des calcaires du Jurassique supérieur.	Le forage a traversé à 1746 m un plan de chevauchement. Sous moins de 300 m de Terres Noires il est rentré dans le Jurassique supérieur calcaire. Cet accident qui affecte toute la série du Callovien au Crétacé ne semble pas avoir une flèche horizontale très importante.
Massif de l'Etoile - Ste Baume - Bassins de Marseille et du Beausset	10431X0027	18-1296	LA-FOLIE 1	Fo1	Tithonique basal à Kimméridgien : 360-633 m : Pertes ; vers 400m : pertes totales La dolomie kimméridgienne (360-633m) est aquifère test en vue de production d'eau potable : stabilisation du débit d'eau à 40m3/h. Durant les essais, présence de sable fin jaune dans l'eau (remplissage de karst vers 400m ?)	
Offshore		18-1337	CICINDELE 1	CIE1	Calcaires du Dogger en continuité avec ceux du Kimméridgien (30m) Pertes totales de circulation dans les calcaires et dolomies karstifiés (606m, Bathonien supérieur à Callovien) pertes partielles de l'ordre de 10 à 40 m3/h (à partir de 626m, Bathonien supérieur à Callovien et Jurassique probable) Test (559-879.4) : Kimméridgien inférieur, Bathonien, Callovien à Série métamorphique supérieure : Excellent débit d'environ 4m3 (90' d'ouverture) d'eau salée à au moins 62 g/L (mélange +/- important avec la boue sous packer). Le seul réservoir rencontré a été le Jurassique karstique (minimum 559-684m), dont la qualité a pu être appréciée par le test. La partie inférieure du Jurassique située sous les marnes bathoniennes (753-801 m) ne peut constituer un réservoir (calcaire argileux mudstone).	

ANNEXE 15 : Calculs de capacité indicatifs pour les structures non retenues comme favorables au stockage

Un coefficient particulier a été calculé pour la structure des Saintes-Maries-de-la-Mer dans le Jurassique. En effet, il s'agit du seul site pour lequel une information sur l'épaisseur utile de réservoir est disponible : le forage SMM102 indique en effet une hauteur productrice de 800 m pour une épaisseur totale de réservoir de 1068m, ce qui fournit un ratio $(\frac{h_n}{h_g})$.spécifique, plus précis que celui issu des bases de données mentionnées dans le rapport référence de l'IEA (2009) :

P	E _{geol}			E _v	E _d	E _ε (%)
	A _n /A _t	h _n /h _g	φ _{eff} /φ _{tot}			
P10	0,8	0,75	0,61	0,525	0,515	9,90
P50	0,8	0,75	0,67	0,57	0,53	12,14
P90	0,8	0,75	0,72	0,575	0,53	13,17

		Cas de base															Cas optimiste					
Sites		Haut de la Tête de la Camargue			Haut de Bellegarde			Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer Jurassique supérieur			Anticlinal d'Istres			Anticlinal de Peaudure			Haut de la Tête de la Camargue			Structure des Saintes-Maries-de-la-Mer Jurassique supérieur		
Paramètres		P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90	P10	P50	P90
Surface	km ²	16,73	23,9	28,68	24,85	35,5	42,6	40,25	57,5	69	30,59	43,7	52,44	29,12	41,6	49,92	34,72	49,6	59,52	52,29	74,7	89,64
Epaisseur totale du réservoir	m	500	800	1300	500	800	1300	700	1068	1200	900	1287	1300	500	800	1300	500	800	1300	700	1068	1200
Ratio volume piège / volume parallélépipède		0,7	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4	0,5	0,6
Porosité		0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Densité du CO ₂ (moyenne sur gamme de profondeurs concernées)	kg/m ³	110	110	110	210	210	210	270	270	270	550	550	550	180	180	180	110	110	110	270	270	270
EE	P10	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	9,90	9,90	9,90	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	8,58	9,90	9,90	9,90
	P50	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	12,14	12,14	12,14	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	12,14	12,14	12,14
	P90	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	13,17	13,17	13,17	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	13,17	13,17	13,17
Capacités de stockage (Mt) - cas de base	P10	6	22	63	16	61	180	30	123	265	52	199	386	9	39	120	11	45	131	39	160	345
	P50	7	27	78	19	75	220	37	151	326	64	244	474	11	47	148	14	55	161	48	196	423
	P90	7	29	84	21	82	239	40	164	353	69	265	513	12	51	160	15	60	175	52	213	459



Centre scientifique et technique

Direction des Géoressources

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr